### МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧСЕКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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

## ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Богомолов Василий Юрьевич

Москва – 2025

## оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. Анализ источников гидрофизических коэффициентов и использование их в модели деятельного слоя суши TerM	.23
1.1. Описание модели деятельного слоя суши TerM и используемых в ней параметризаций и подходов для воспроизведения основных гидрофизических процессов в почве	.23
1.2. Способы определения гидрофизических коэффициентов почвы	.27
1.3. Существующие глобальные наборы почвенных характеристик для использования в моделях ДСС	.29
1.4. Сравнение источников гидрофизических коэффициентов для использования в модели деятельного слоя суши TerM	.35
ГЛАВА 2. TerMPS: программное обеспечение для подготовки данных о параметрах поверхности суши, используемых в моделях деятельного слоя суши и моделях Земной системы	.50
2.1. Агрегирование данных на горизонтальную широтно-долготную сетку	.51
2.2. Проекция данных, имеющих вертикальное измерение, на произвольную неравномерную вертикальную сетку	.54
2.3. Алгоритмы и программная реализация	.56
2.4. Примеры выходных данных	.64
Глава 3. Чувствительность модели деятельного слоя к способу задания гидрофизических коэффициентов и их пространственному разрешению	.70
3.1. Локально-одномерный эксперимент (эксперимент 1)	.71
3.2. Региональные численные эксперименты.	.78
Эксперимент 2.1 – эксперимент на чувствительность решения модели деятельного слоя суши к способу задания гидрофизических коэффициентов	.78
Эксперимент 2.2а – эксперимент на чувствительность решения модели деятельного слоя суши к пространственному разрешению гидрофизических коэффициентов почвы	.85
Эксперимент 2.2b – эксперимент на чувствительность решения модели деятельного слоя суши к методам агрегирования гидрофизических коэффициентов почвы	.90
Эксперимент 3 – эксперимент на чувствительность решения модели деятельного слоя суш к горизонтальному разрешению модели	и .91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	.93
Список сокращений и условных обозначений	.95
Список использованной литературы	.96
Благодарности1	10

#### введение

На данный момент модели деятельного слоя суши представляют один из основных инструментов для исследования процессов, протекающих на земной поверхности и в деятельном слое почвы, а также для определения роли земной поверхности в Земной системе в формировании произошедших, современных и будущих климатических изменений.

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 (M3C) 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 ТегМ. Для анализа результатов моделирования используются методы статистической обработки данных.

#### Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Климатическую систему планеты Земля образуют следующие, взаимодействующие между собой компоненты (IPCC, 2013; Рисунок 1):

- атмосфера газовая оболочка Земли сложного состава (кислород, азот, углекислый газ, водяной пар и т.д.), воздействующая на перенос к поверхности Земли солнечной радиации, поступающей на ее верхнюю границу, и являющаяся наиболее изменчивой составляющей рассматриваемой системы;
- океан главный водный резервуар в системе, состоящий из соленых вод Мирового океана и прилегающих к нему морей, поглощающий

основную часть, поступающей на его поверхность солнечной радиации и представляющий собой, благодаря высокой теплоемкости воды, мощный аккумулятор энергии;

- суша поверхность континентов с ее гидрологической системой (внутренние водоемы, болота и реки) и почвой (в том числе с грунтовыми водами);
- криосфера континентальные и морские льды, горные ледники, снежный покров и криолитозона («многолетняя мерзлота»).



Рисунок 1. Компоненты климатической системы Земли (Пол Ульрих, Калифорнийский университет).

Состояние этих компонент в фиксированный момент времени в различных точках определяет состояние системы в целом. Погода показывает текущее состояние системы, климат же показывает некоторое среднее состояние. По определению ВМО (Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм, 2017 г.) климат – это среднее состояние системы за 30-летний период. На изменение климатической системы Земли влияют две группы факторов:

- естественные (смещение орбиты и угла наклона Земли, изменение солнечной активности, вулканические извержения и изменение количества атмосферных аэрозолей естественного происхождения;
- антропогенные (повышение концентрации в атмосфере парниковых газов, в основном CO<sub>2</sub>, образующегося при сжигании ископаемого топлива, а также выброс аэрозольных частиц, сведение лесов, изменения в землепользовании, урбанизация и т.п.).

Начиная с конца 1970-х наблюдается рост глобальной температуры воздуха относительно доиндустриального период с 1850 по 1900 гг. (рисунок 2).



Рисунок 2. Изменения содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере и глобальной приземной температуры от глубокого прошлого до следующих 2300 г. (относительно периода 1850-1900 гг.) (IPCC, 2021).

Основной группой экспертов, которая занимается оценкой климатических изменений и их влиянием на человечество, является Межправительственная группа экспертов по изменению климата – МГЭИК (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). Основная цель этой группы состоит в проведении анализа всех рецензируемых опубликованных материалов, связанных с климатическими изменениями, по результатам которого публикуется итоговый отчет. В последних

докладах (IPCC, 2013; 2021) было отмечено, что из-за происходящих климатических изменений современный период характеризуется увеличением повторяемости и интенсивности экстремальных природных явлений. Такие явления наносят достаточно ощутимый ущерб не только хозяйственной деятельности человека, но и всей системе в целом. Поэтому на сегодняшний день, главной целью климатических исследований является не только прогноз изменений климата в зависимости от концентрации парниковых газов в атмосфере, но и использование полученной информации для смягчения последствий таких изменений. Одним из основных инструментов для получения такой информации являются глобальные климатические модели или модели земной системы (M3C).

Первые попытки по координации климатического моделирования начались ещё в 1970-х годах, когда была создана Рабочая группа по численным экспериментам (WGNE, Working Group on Numerical Experimentation) (Gates, 2015). К концу 80-х годов для более полного исследования климатических изменений стало необходимо более систематическое и всестороннее изучение результатов глобального моделирования, полученных по расчетам различных моделей. В связи с чем, Объединенный научный комитет Всемирной программы исследования климата (Joint Scientific Committee (JSC) of the World Climate Research Program (WCRP)), под руководством У. Лоуренса Гейтса при поддержке Министерства энергетики США создал в 1989 году программу по диагностике и сопоставлению климатических моделей (Program for Climate Diagnosis and Intercomparison) (Gates, 1992). В 1990 году, был запущен первый крупный проект моделей атмосферы (Atmospheric по сравнению результатов Model Intercomparison Project (AMIP)). Участвовать в этом проекте с учетом специальных требований могли любые модели общей циркуляции атмосферы (General Circulation Models (GCMs)) (Gates, 1992). Этот международный проект стал важным шагом в развитии климатического моделирования – ученые впервые получили возможность сравнения и оценки работы моделей в одинаковых условиях. Этот эксперимент стал «наиболее заметным международным

6

мероприятием, посвященным диагностике, валидации и взаимному сравнению способности глобальных атмосферных моделей воспроизводить климат» (Gates et al., 1999). К 1995 году в эксперименте участвовала 31 модельная группа, представляющая почти все сообщество того времени, занимающееся разработкой атмосферных моделей. Это стало началом следующих проектов, в частности проекта взаимного сравнения связанных моделей (Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)). Проект CMIP изначально был разделен на две взаимодополняющие фазы (Meehl et al., 1997): СМІР1 и СМІР2. Из-за технических ограничений в обработке и хранении результатов моделирования на тот момент времени, результаты CMIP1 и CMIP2 имели низкое временное и пространственное разрешение и включали лишь небольшой набор переменных (температура поверхности суши, осадки, давление на уровне моря). Результаты проектов СМІР1 и СМІР2 сыграли большую роль в третьем оценочном докладе МГЭИК. Этот отчет включал призыв к увеличению сценариев моделирования и ансамбля самих моделей (Giorgi et al., 2001). В результате чего было принято решение начать новый этап СМІР – СМІРЗ. Главное новшество в СМІРЗ – это сценарных экспериментов, т.е. климатических прогнозов при включение сценариях выбросов СО<sub>2</sub>. Такой подход при моделировании различных представляет большой интерес для лиц, принимающих решения, поскольку его результаты можно использовать в качестве основы для выбора между различными стратегиями для смягчения последствий климатических изменений и адаптации к ним. Основная цель этого этапа заключалось в том, чтобы обеспечить Четвертому отчету МГЭИК «лучшую оценку состояния человеческих знаний об изменчивости и изменении климата на основе моделей» (Meehl et al., 2007). СМІРЗ также был этапом CMIP, который предоставил открытый доступ ко всем первым результатам экспериментов (около 30 терабайт данных). Более подробный анализ начальных этапов CMIP можно найти в работе (Ludovic Touzé-Peiffer et al., 2020).

После успеха СМІР3 следующим этапом стал СМІР5, который уже был направлен не только на цели ученых, занимающихся непосредственно моделированием климата, но и ученых из смежных отраслей. В данном этапе участвовало более 20 научных групп с более чем 50 МЗС, результаты которых легли в основу Пятого оценочного доклада МГЭИК (2013 год). Также результаты СМІР5 использовались в эксперименте по региональному даунскейлингу (Coordinated Regional климатических моделей Downscaling Experiment (CORDEX)). Проект CMIP5 включал в себя уже более усовершенствованные M3C с более высоким пространственным разрешением (для атмосферы диапазон от 0.5° до 4°, для океана – от 0.2 ° до 2°). Также проводилось большое количество экспериментов, направленных на изучение более широкого спектра научных вопросов. По результатам этих экспериментов было получено большое количество полей различных переменных (атмосфера – 60, океан – 77, поверхность суши и углеродный цикл – 58, биогеохимия океана – 74, морской лед - 38, лед и снег - 14, облака - 100). Объем выходных данных этапа СМІР5 превысил 3 Пб (1 Пб =  $10^6$  Гб), что в 100 раз больше чем результаты этапа СМІРЗ. Подробное описание этапа СМІР5 представлено в работе (Taylor, 2012). Таким образом, проекты СМІР дали большой толчок для развития климатического стали моделирования, ключевым а также инструментом для оценки климатических изменений при написании международных докладов МГЭИК.

В настоящее время закончился шестой этап проекта СМІР (СМІР6), результаты которого легли в основу уже 6 оценочного доклада МГЭИК (ІРСС, 2021). На этом этапе СМІР использовалось новое поколение климатических моделей (Eyring et al., 2016) с обновленными физическими параметризациями, с повышенным пространственным разрешением И с новыми блоками. описывающими деятельной слой (биогеохимические циклы, ледниковые циклы и т.д.). В СМІР6 вместо 4-х сценариев концентрации парниковых газов RCP (van Vuuren et al., 2011) используются социо-экономические пути развития SSP (O'Neill et al., 2014). Согласно множеству работ, посвященных сравнению пятого и шестого этапов проектов CMIP, результаты шестого этапа являются более репрезентабельными и лучше согласуются с данными измерений за исторический период (Bock et al., 2020; Davy and Outten, 2020; Notz and Community, 2020).

На рисунке 3 схематически представлен процесс эволюции климатических моделей. С развитием вычислительных ресурсов, повысилось как пространственное разрешение моделей, так и их сложность (количество и детализация физических процессов).



Рисунок 3. Схема развития климатических моделей (ІРСС, 2021).

Стоит отметить, что все модели Земной системы состоят из нескольких отдельных блоков, соответствующих компонентам климатической системы Земли (рисунок 1). Основные блоки – это блоки атмосферы и океана (с морским льдом), но другой не менее важный блок – это блок земной поверхности или деятельного слоя суши (ДСС), отвечающий за воспроизведение почвенных процессов, углеродного цикла поверхности, растительности и процессов с ней связанных, внутренних водоемов и болот и т.д. На рисунке 4 представлена общая схема моделей деятельного слоя суши, показывающая взаимосвязи между eë компонентами процессами и модулями — на различных временных масштабах, от одного часа до одного десятилетия.



Рисунок 4. Общая схема моделей деятельного слоя суши (Blyth et al., 2021).

От России во всех этапах проекта СМІР участвовала МЗС ИВМ РАН (INM-CM, Institute of Numerical Mathematics Climate Model) – МЗС Института вычислительной математики (ИВМ) РАН (Volodin et al., 2018). В настоящее время из данной МЗС отдельным блоком выделена модель деятельного слоя суши – модель ИВМ РАН-МГУ (Terrestrial model, TerM) (Stepanenko, 2024). Ее развитием занимается отдельная группа ученых из НИВЦ МГУ, ИМКЭС СО РАН, ИВМ РАН под руководством В.М. Степаненко. Сейчас существует возможность автономного запуска этого блока (отдельно от климатической модели) с предписанным атмосферным воздействием (данные наблюдения или реанализа) на различном горизонтальном разрешении поверхности суши. На рисунке 5 представлена общая концепция блока деятельного слоя суши TerM.



Рисунок 5. Концепция блока ДСС TerM.

Как отмечалось выше, при развитии вычислительных возможностей закономерно усложняются как модели Земной системы, так и все их компоненты по отдельности. В настоящее время для развития моделей ДСС выделяются три наиболее актуальных направления: управление сложностью параметризаций физических и биогеохимических процессов, учёт эффектов неоднородности земной поверхности (обусловлено ростом пространственного разрешения моделей), временная и пространственная изменчивость параметров модели (Fisher and Koven, 2020). С такими же задачами столкнулся и наш коллектив при развитии модели ДСС ТегМ.

Как видно из рисунков 4 и 5, модели ДСС, в частности модель ДСС ТегМ, состоят из различного набора модулей, каждый из которых отвечает за описание какого-либо процесса, происходящего в деятельном слое. В данной работе рассматривается только часть модели ДСС, отвечающая за описание тепломассопереноса в почве. В большинстве моделей ДСС, также, как и в модели ТегМ, для воспроизведения динамики влаги в почве используется уравнение

11

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 (Brooks and Corey, 1964; Clapp and Hornberger, 1978), либо параметризация Муалем-ван Генухтена (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980, Schaap and Genuchten, 2006). В эти функции входят почвенно-гидрологические константы, которые по сути своей константами не являются. В данной работе будем придерживаться другого названия – гидрофизические коэффициенты (ГФК). Они зависят от свойств среды и определяются полуэмпирическими способами. Обычно в моделях ДСС они задаются как внешние входные параметры.

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 используется одно 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 and Rawls, 2004; Shein and

Arhangel'skaya, 2006; Guber et al., 2009), в которых показано, что 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, 2002).

На данный момент существует как минимум три способа получения гидрофизических коэффициентов: прямые методы (полевые измерения), педотрансферные функции (ПТФ) и глобальные наборы данных, построенные на некоторой оптимальной комбинации ПТФ для всей области определения ГФК. В **первой главе** проводится подробный анализ этих источников и возможности их использования в модели ДСС TerM. В качестве оптимального варианта ГФК для модели ДСС ТеrM предлагается использование глобального набора высокого разрешения, содержащего необходимые данные (Dai et al., 2019).

Пространственное разрешение моделей ДСС может варьироваться в зависимости от целей и задач исследователей, использующих такие модели. Сейчас возможное пространственное разрешение для моделей ДСС при региональных расчетах находится в пределах от 1° до 0.1°. При изменении пространственного разрешения модели каждый раз нужны внешние наборы характеристик поверхности суши, разрешение которых будет соответствовать разрешению модели. Помимо ГФК, для работы ДСС TerM необходимы и другие физико-географические различные внешние данные, описывающие характеристики поверхности суши. Обычно, к ним относят: почвенные характеристики (гранулометрический состав гидро-, теплофизические И характеристики), земной поверхности, типы включая водоемы И урбанизированные территории (геометрические и теплофизические параметры городской застройки), параметры растительности (LAI индекс), параметры водоемов (средняя глубина, гипсометрическая кривая), направление И аккумуляции речного потока, параметры рельефа и т.д. Для этих данных в качестве основного источника также используются уже готовые наборы данных высокого пространственного разрешения. Созданием таких наборов занимаются определенные научные группы, деятельность которых происходит на стыке узкой специализации (почвоведение, растительность т.д.) водоемы, И И геоинформационных наук. Приведем примеры некоторых таких продуктов: глобальный набор почвенных характеристик (Dai Y. et al., 2019) - содержит гранулометрического состава почвы, теплофизические параметры И гидрофизические характеристики почвы; набор данных GLCCv2 (GLCC, 2017) содержит типы растительного покрова; набор данных GLDB (Choulga M., 2014) содержит параметры внутренних водоемов. И это перечислена лишь малая часть таких наборов данных и необходимых для моделирования характеристик. Современные наборы данных имеют достаточно высокое пространственное разрешение – 30" x30", что составляет около 1x1 км на ячейку.

Для использования таких наборов у большинства моделей (ДСС и МЗС) существуют специальное программное обеспечение (ПО) для подготовки таких данных ввиду несогласованности пространственных разрешений в глобальных наборах и разрешения целевой сетки модели. Например, в M3C Community Earth System Model (CESM2) (Danabasoglu et al, 2020), которая включает в себя модель ДСС Community Land Model (CLM) (Lawrence et al., 2019), подготовка данных осуществляется через пакет CLM Tools, состоящий из отдельных программ на языке Fortran и NCL скриптов. Для агрегации используются методы из ESMF regridding program. Для платформы SURFEX (Voldoire et al., 2013), используется база данных о параметрах поверхности суши ECOCLIMAP (Masson et al., 2003). В зависимости от выбранной схемы моделирования поверхности суши У рассчитывают нужные физико-географические поля. дополнительно большинства крупных моделей прогноза погоды также существуют такие системы. Например, модель WRF (Weather Research and Forecasting) (Skamarock et al., 2019) – численная модель прогноза погоды имеет свою систему подготовки

данных WPS (WRF Preprocessing System, https://github.com/wrf-model/WPS), которая состоит из набора программ на языке С и Fortran. Для подготовки внешних параметров для модели прогноза погоды COSMO (Baldauf et al., 2011) используется система EXTPAR (Asensio et al., 2021), состоящая из 12 автономных программ, написанных на языке Fortran и Python с использованием методов из CDO. Если же рассматривать модель ДСС ИВМ РАН–МГУ (TerM), во многом совпадающую и повторяющую блок ДСС МЗС ИВМ РАН (INMCM), то для нее, также, как и для блока ДСС модели климата, не существует отечественного программного обеспечения, позволяющего решить задачу агрегирования данных о параметрах поверхности суши на нужную для модели сетку. В связи с этим представляется необходимым создание такого типа программного обеспечения (вторая глава).

Еще один важный вопрос, связанный с входными параметрами поверхности суши (в том числе и ГФК) в моделях ДСС, это сам подход к их агрегированию. Как уже отмечалось выше, свойства почвы достаточно сильно варьируются по Общая проблема увеличения территории. масштаба ИЛИ изменения пространственного разрешения входных данных малого масштаба путем их агрегирования некоторая неопределенность выходных данных И ЛЛЯ использования в моделях были описаны, например, в работах (Cale et al., 1983; Rastetter et al., 1992; Pierce and Running, 1995; Hoffmann et al., 2016; Kuhnert et al., 2016).

В узкоспециализированных моделях, например, в гидрологических моделях формирования стока в речных бассейнах такая задача агрегирования параметров в какой-то степени решена. Например, в модели ECOMAG (ECOlogical Model for Applied Geophysics) (Мотовилов и Гельфан, 2018) применена «концепция агрегирования процессов и параметров модели на характерных для описываемого речного бассейна пространственных масштабах (репрезентативных элементарных площадях), определяемых его физико-географическими факторами». Таких масштабов в модели выделено три – микромасштаб (точка), мезомасштаб (пространственно-однородная область) и макромасштаб (ячейка крупного

15

водосбора состоит из множества пространственно-однородных областей). Также для этой модели были подобраны и реализованы методы агрегирования ГФК и других параметров. Но для моделей ДСС, в целом такая задача не решалась, поскольку, как было отмечено выше, применялся другой подход (одно значение ГФК по типам почвы). Поэтому помимо создания самого инструмента для агрегирования почвенных данных высокого пространственного разрешения, необходимо исследовать чувствительность ДСС ТегМ к способу задания гидрофизических коэффициентов, а также к их пространственному разрешению и способам агрегирования. Другими словами, насколько способ задания ГФК и их пространственное разрешение будут влиять на результаты моделирования тепломассопереноса модели ДСС ТегМ и необходимо ли использовать новые почвенные данные высокого разрешения в модели. Этому вопросу будет посвящена **третья глава** работы.

Целью работы является исследование чувствительности переменных, описывающих тепломассоперенос 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:

- 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.
- Исследовать репрезентативность источников получения гидрофизических коэффициентов почвы (натурные наблюдения, педотрансферные функции, глобальные наборы данных) для модели ДСС ТегМ
- 3. Оценить качество воспроизведения тепломассопереноса в почве и на ее поверхности моделью ДСС TerM при варьировании гидрофизических коэффициентов почвы с привлечением данных натурных измерений.

4. Исследовать для тестовой территории чувствительность оценок тепловлагопереноса в модели ДСС TerM к горизонтальному разрешению модели и полям 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 ТегМ. 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 тепломассопереноса 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 гидрофизических коэффициентов на сетку модели, что в свою очередь упрощает задачу тестирования модели на чувствительность к способу задания ГФК в модели ДСС TerM.

#### Положения, выносимые на защиту.

 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 разница за 30 лет для температуры верхнего слоя почвы между указанными расчётами составляет 0.5 °C, при этом для отдельных участков разница составляет 3 °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 тепломассоперенос в почве и на ее поверхности. Для южной части Западной и Восточной Сибири разница за 30 лет для температуры верхнего слоя почвы между экспериментом с самым низким разрешением (5°х4°) и экспериментом с высоким разрешением увеличивается по мере уменьшения разрешения (разница между 5°х4° и 1°х1° − 1.3 °С, разница между 5°х4° и 0.5°х0.5° − 1.4 °С, разница между 5°х4° и 0.25°х0.25° − 1.45°С).
- 3. Созданное программное обеспечение для модели ДСС ТегМ позволяет ответить на вопросы, связанные с агрегированием гидрофизических коэффициентов, с влиянием способа их задания на корректную локализацию паттернов температуры и влажности почвы. Также позволяет существенно автоматизировать процесс подготовки входных данных о параметрах поверхности суши для любого пространственного разрешения.

#### Степень достоверности результатов.

В работе используется модель ДСС ТегМ, основанная на блоке деятельного слоя суши M3C INMCM - единственной отечественной модели, участвующей в программе сравнения глобальных климатических моделей СМІР; этот блок также служит частью модели оперативного прогноза погоды ПЛАВ Гидрометцентра России (Травова и др., 2022). Ранее было показано, что модель ДСС ТегМ удовлетворительно воспроизводит тепломассоперенос в почве (Володин и Лыкосов, 1998а; 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 M3C INMCM. Использованные 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.).

#### Список работ, опубликованных по теме диссертации.

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

 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. Vol. 50, N 5. P. 585-601. DOI: 10.31857/S0321059623600114

<u>На английском:</u> **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 2023 – 0.9 (Q4), JCI 2023 – 0.19) (Авторский вклад: анализ литературы, обработка и подготовка данных, постановка задачи, проведение расчетов, анализ результатов, формулирование выводов и подготовка к публикации в журнале).

 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, vol. 39, no. 6, 2024, pp. 363-377. https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0031

(JIF 2023 – 0.5 (Q4), JCI 2023 – 0.28) (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).

 Рязанова А.А. ТегМРS: 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: 0.32, двухлетний импактфактор РИНЦ: 0.54) (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).

 Voropay N. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia / Voropay N., Ryazanova A., Dyukarev E. // Atmospheric Research. 2021. Volume 254. 105528. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528. (JIF 2023 – 4.5 (Q1), JCI 2023 – 1.20) (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:

- Программа подготовки входных данных для модели деятельного слоя почвы, совместимая с климатической моделью INM-CM6, № 2023682880, 2023.
- Программная реализация расчетной модели для определения статистических характеристик результатов работы моделей деятельного слоя, № 2023666746, 2023.
- 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.

#### Личный вклад.

Автор диссертационной работы лично проводила анализ литературных данных, активно участвовала в постановке цели и задач исследования, принимала непосредственно личное участие в постановке численных экспериментов, лично проводила все численные эксперименты с моделью ДСС TerM, обрабатывала и анализировала результаты, проводила сравнения и формулировала выводы. Автором лично разработано программное обеспечение для подготовки входных данных о параметрах поверхности суши для модели ДСС TerM. Автор активно участвовала в подготовке публикаций, а также докладов на научных конференциях.

#### 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 ТегМ и разработка ПО для агрегирования параметров поверхности суши для модели ДСС ТегМ (Глава 2). Представлены результаты серии численных экспериментов, показывающих чувствительность модели ДСС ТегМ 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.

## ГЛАВА 1. Анализ источников гидрофизических коэффициентов и использование их в модели деятельного слоя суши TerM

1.1. Описание модели деятельного слоя суши TerM и используемых в ней параметризаций и подходов для воспроизведения основных гидрофизических процессов в почве

Почва – это одна из основных компонент в земной системе, которая играет важную роль водном, энергетическом и углеродном балансах, а также в других биогеохимических процессах, поэтому блоки деятельного слоя суши входят в состав всех систем прогноза погоды и моделей Земной системы, независимо от пространственных и временных масштабов воспроизводимых процессов. Для адекватного воспроизведения влажности и температуры почвы в моделях деятельного слоя суши требуется набор параметров, представляющих гидравлические, термические И радиационные свойства Модель почвы. деятельного слоя суши обычно состоит из множества математических уравнений, при этом описание процессов, происходящих в почве, обычно представляется одномерным, поскольку вертикальная компонента градиентов температуры и состояниях обычно влаги В различных значительно превосходит ee горизонтальные компоненты.

Уравнения тепловлагопереноса (1D) в почве с учетом корневой системы растительности для модели ДСС ТегМ записываются в виде:

$$(\rho c)_{s} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{T} \frac{\partial T}{\partial z} - L_{m} \rho_{d} F_{m} - L_{e} \rho_{d} F_{e}, (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{W} \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{WT} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial \gamma}{\partial z} + F_{m} - F_{e} - R_{root} - R_{r,sub}, (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{V} \frac{\partial V}{\partial z} + F_{e}, (3)$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} = -F_{m}. (4)$$

начальные условия для *T*, *W*:

$$T(z, t_0) = T_0(z), W(z, t_0) = W_0(z), (5)$$

граничные условия для *T*, *W* (на нижней границе ставится условие непроницаемости):

$$T(0,t) = T_s(t), \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \qquad \lambda_w \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=0} = B_w, \qquad \lambda_w \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0.$$
(6)

Здесь z – направленная вдоль вектора силы тяжести координата, t – время, T – температура, W, V и I – массовые доли влаги, водяного пара и льда, соответственно (масса фазы на единицу массы сухой части почвы), ( $\rho c$ )<sub>s</sub> – суммарная объёмная теплоёмкость фаз внутри почвы,  $\lambda_i$ , i = T, W, V – коэффициенты тепло-, влаго-, и паропроводности,  $\lambda_{WT}$  – коэффициент термической влагопроводности,  $\gamma$  – гравитационный (фильтрационный) поток воды,  $F_m$  и  $F_e$  – скорости таяния и испарения воды, соответственно,  $R_{root}$  – скорость впитывания влаги корнями растений,  $R_{r,sub}$  – скорость подповерхностного стока воды в водотоки,  $\rho_d$  – плотность сухой почвы,  $L_m$  и  $L_e$  – удельная теплота таяния и испарения.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda_T$  задаётся обобщёнными в случае наличия льда зависимостями от W по формулам Пильке (McCumber and Pielke, 1981), Йохансена (Johansen, 1977) (по умолчанию) или Коте-Конрада (Côté and Konrad, 2005; Drozdov et al., 2020). Влияние влажности задаётся через нормированный коэффициент теплопроводности (число Керстена). Отметим, что диффузионное слагаемое относительно W в (1.2) появляется из-за зависимости капиллярно-сорбционного потенциала от влажности почвы. Эта зависимость задаётся в модели функцией Клаппа-Хорнбергера (формула 7 и 8) или обобщённой в случае насыщения почвы функцией Муалема-ван Генухтена (формула 9 и 10) (по умолчанию); выбор этой зависимости определяет форму функций  $\lambda_W(W)$  и  $\gamma(W)$ , причём в обоих случаях вид уравнения (2) справедлив для однородного по вертикали механического состава почвы; в противном случае "диффузией" диффузионное слагаемое следует заменить капиллярносорбционного потенциала  $\psi: \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma \left[ \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \right).$ 

Подход Клаппа-Хорнбергера ( $\gamma = K$ ):

$$\psi = \psi_s \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{-1/\lambda}, (7)$$
$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{3+\frac{2}{\lambda}}, (8)$$

где  $\theta_s$  – максимальная насыщаемость почвы влагой (совпадает с пористостью почвы), см3/см3;  $\theta_r$  - остаточная влажность, см3/см3;  $\psi_s$  – капиллярно-сорбционный потенциал при насыщении, см;  $\lambda$  – индекс распределения пор по размерам,  $K_s$  - гидравлическая проводимость при максимальном насыщении влагой; см/день.

Подход Муалема-ван Генухтена:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n}\right]^{1 - 1/n}, (9)$$
$$K = K_s \Theta^{1/2} [1 - (1 - \Theta^{1/(1 - 1/n)})^{1 - 1/n}]^2, (10)$$

где *α* – величина, обратно пропорциональная давлению входа воздуха, 1/см; *n* – индекс распределения пор по размерам, характеризующий наклон Θ.

В этих формулах (7, 8, 9 и 10) используются величины ( $\lambda$ ,  $\psi_s$ ,  $\alpha$ , n,  $\theta_s$ ,  $K_s$ ) – это и есть гидрофизические коэффициенты. Как было отмечено выше, в исходной версии модели (Алексеев и др., 1998) реализован подход, при котором гидрофизические коэффициенты задаются одним значением для типа почвы по треугольнику Ферре (рисунок 6а) из работы (Clapp and Hornberger, 1978) (таблица 1, далее будем обозначать как «ПН98»). Для определения типа почвы используются входные данные о гранулометрическом составе из глобального набора типов земного покрова и почвы Вилсона и Хендерсона-Селлерса 1985 года (рисунок 6б) (Wilson and Henderson-Sellers, 1985) (также отнесем этот набор к ПН98) с исходным пространственным разрешением 1°х1°, при условии, что базовое разрешение модели ДСС в настоящее время составляет 0.5°х0.5°. Этот набор данных 1985 г. является устаревшим и по качеству данных и по исходному горизонтальному разрешению.



Рисунок 6. Треугольник Ферре (а); распределение типов почв по треугольнику Ферре по данным ПН98 (б).

В таблице 1 представлены ГФК по типам почвы треугольника Ферре для параметризации Клаппа-Хорнбергера и Муалема-ван Генухтеан (ПН98).

Тин наши	Параметр,	$\psi_s,$	Параметр	Параметр	$\theta_s,$	$K_s$ ,
Тип почвы	1/λ, -	см	α, 1/см	<i>n</i> , -	см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	см/сек
1 (песок)	4.05	3.5	0.1351	1.53	0.395	0.0176
2 (суглинистый	4.38	1.78	0.12	1.43	0.41	0.0156
песок)						
3						
(опесчаненный	4.9	7.18	0.11	1.33	0.435	0.0034
суглинок)						
4 (суглинок)	5.39	14.6	0.1	1.43	0.451	0.00069
5 (пылеватый	5.3	56.6	0.0095	1.22	0.485	0.00072
суглинок)						
6	7 12	8 63	0.09	1 10	0.42	0.00063
(опесчаненный	1.12	0.05	0.09	1.17	0.42	0.00003

Таблица 1 – Гидрофизические коэффициенты по типам почвы треугольника Ферре (ПН98).

глинистый						
суглинок)						
7 (глинистый	8 5 7	36.1	0.08	1 18	0.476	0.00024
суглинок)	0.32	50.1	0.08	1.10	0.470	0.00024
8 (пылевато-						
глинистый	7.75	14.6	0.07	1.16	0.477	0.00017
суглинок)						
9						
(опесчаненная	10.4	6.16	0.06	1.15	0.426	0.00021
глина)						
10 (пылеватая	10.4	174	0.05	1 14	0 492	0.0001
глина)	10.7	1/.7	0.05	1.17	0.772	0.0001
11 (глина)	11.4	18.6	0.0042	1.13	0.482	0.00013

Такой подход не всегда дает надежные результаты. Например, при попадании значений гранулометрического состава в границы типов почвы по какой-либо классификации ГФК могут сильно отличаться от предписанных табличных значений в силу того, что непрерывные педотрансферные функции, которые используются для их расчета, при данном подходе заменяются кусочнопостоянными зависимостями. Также в описанном выше подходе не учитывается влияние органического вещества почв на гидрофизические параметры.

#### 1.2. Способы определения гидрофизических коэффициентов почвы

На данный момент существует как минимум три способа получения гидрофизических коэффициентов: прямые методы (полевые измерения), педотрансферные функции (ПТФ) и глобальные наборы данных, построенные на некоторой оптимальной комбинации ПТФ для всей области определения ГФК.

В первом варианте для определения гидрофизических коэффициентов почвы проводятся прямые in situ измерения почвенных образцов, что достаточно

трудоемко и не может охватывать большие территории. 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.

Второй вариант предполагает использование педотрансферных функций (ПТФ) (Bouma and van Lanen, 1986). По Е.В. Шеину (Шеин, 2005), ПТФ – это эмпирические зависимости, позволяющие восстанавливать основные гидрофизические функции почв, в том числе ОГХ, по известным из материалов Почвенных служб и массово определяемым базовым свойствам почв, таким как гранулометрический состав, пористость, плотность и содержание органического ΠΤΦ вешества. Использование позволяет получить гидрофизические коэффициенты с тем же пространственным охватом и разрешением, что и базовые свойства.

Существует множество ПТФ, они условно делятся на три большие группы: классовые, непрерывные и полученные на основе нейронных сетей. В классовых ПТФ гидрофизические коэффициенты определяются только по типам почвы, в предположении, что почвы близких типов имеют схожие гидравлические свойства. Непрерывные ПТФ в качестве аргументов принимают объемное содержание глины  $V_{\rm clav},$ ила  $V_{\rm silt}$ , песка  $V_{\rm sand}$ , т. e. компоненты гранулометрического состава, и в некоторых случаях органического вещества  $V_{\text{SOM}}$ , а также пористости  $\theta_s$ . В качестве примера непрерывной ПТФ для определения ГФК Клаппа-Хорнбергера приведем ПТФ Косби (Cosby et al, 1984):

$$\psi_s = 10^{(1.54 - 0.0095V_{sand} + 0.0063V_{silt})}, b = 3.10 + 0.157V_{clay} - 0.003V_{sand}, K_s = 10^{(-0.6 + 0.0126V_{sand} - 0.0064V_{clay})}, (11)$$

где  $V_{\text{clay}}$ ,  $V_{\text{silt}}$ ,  $V_{\text{sand}}$  – объемное содержание фракций крупности частиц (песка, ила, глины) в гранулометрическом составе, т. е.  $V_{\text{clay}} + V_{\text{silt}} + V_{\text{sand}} = 100\%$ .

Третий вариант подхода – использование глобальных наборов данных высокого разрешения почвенного состава и гидрофизических характеристик.

Необходимо было найти такой набор, который бы обеспечивал модель не только данными о составе почвы, но и данными о её гидро- и теплофизических характеристиках, поскольку правильный учет этих характеристик достаточно сильно влияет на результаты моделирования тепломассопереноса в почве. Например, анализ чувствительности, проведенный в работе (Demaria et al, 2007), показывает, что такие параметры как скорость инфильтрации воды в почву и распределение пор по размеру влияют на правильность разделения осадков на поверхностный сток и влажность почвы. Аналогичные работы (Prihodko et al, 2008; Cuntz et al, 2016) демонстрируют, что не только потоки воды, но и потоки энергии и углерода чувствительны к параметрам почвы.

# Существующие глобальные наборы почвенных характеристик для использования в моделях ДСС

Для моделирования различных процессов, происходящих в деятельном слое почвы, как на глобальном, так и региональном масштабе, требуются данные о свойствах почвы (Luo et al., 2016). Однако, в настоящее время почвенные наборы, которые используются при моделировании в современных моделях, ещё недостаточно обновлены или используются не в полной мере. (Sanchez et al., 2009; FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012).

При наблюдениях за почвой исследователи собирают следующие характеристики: состав почвы (песок, ил и глина), органическое вещество почвы, крупные фрагменты, плотность почвы и ее цвет, питательные вещества в почве (углерод, азот, фосфор, калий и сера), количество корней и т.д. Вариативность сбора этих характеристик зависит от площади исследуемой территории и ее особенностей, а также от целей исследования, что приводит к тому, что их доступность в различных почвенных базах разная. А гидравлические и термические почвенные характеристики обычно вообще не измеряются, а рассчитываются с помощью педотрансферных функций (van Looy et al., 2017).

Физические свойства почв, например, такие как гранулометрический состав, имеют большую пространственную неоднородность как по горизонтали, так и по вертикали. Поэтому в моделях ДСС используются пространственные наборы данных о свойствах почвы для нескольких слоев, а не одна глобальная константа один слой. В настоящее время существует тенденция уменьшения ИЛИ пространственного разрешения, используемого как в M3C, так и в ДСС (Singh et al., 2015; Ji et al., 2017). Таким образом, пространственные данные о свойствах почвы с высоким разрешением необходимы для улучшения результатов моделирования. Поскольку почвенные характеристики наблюдаются в каких-то определенных получения трехмерного точках, то для представления распределения почвы необходимо картирование почвы или использование моделей для пространственного прогнозирования этих свойств почвы. В результате исследований и измерений могут быть получены два вида данных: данные о типах почв и данные о профилях почвенных характеристик. В моделях ДСС обычно используют пространственное распределение профилей почвенных характеристик (карты гранулометрического состава), а не данные о типах почв. Существует два метода получения таких карт: метод связывания и метод цифрового картирования почвы.

Метод связывания (метод таксонопереноса на основе правил) основан на объединении почвенных карт (почвенных полигонов) и почвенных профилей (с почвенными свойствами) в соответствии с правилами таксономического переноса. Подробное описание метода представлено в (Shangguan et al., 2012). Существует большое количество почвенных наборов, созданных с помощью этого метода. Перечислим наиболее известные и используемые глобальные наборы: FAO SMW (FAO, 2003а), информационная система данных Международной гео-биосферной программы IGBP-DIS (Global Soil Data Task, 2000), база данных почвы и ландшафтов (Van Engelen and Dijkshoorn, 2012), карта свойств почвы ISRIC-WISE (Batjes, 2006), HWSD (FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012), глобальный почвенный набор для M3C (GSDE), (Shangguan et al., 2014), WISE30sec (Batjes, 2016). Наиболее свежие наборы это HWSD, GSDE и WISE30sec. GSDE и

WISE30sec являются улучшенными версиями HWSD и включают в себя больше почвенных карт и профилей: 8 почвенных слоев до глубины 2.3 метра в GSDE и 7 почвенных слоев до глубины 2 метра в WISE30sec, в то время как HWSD включает в себя данные по 2 слоям до глубины 1 метр.

Метод цифрового картографирования почв (McBratney et al., 2003) – это метод, позволяющий создавать почвенную базу данных с географической привязкой с заданным пространственным разрешением на основе полевых и лабораторных наблюдений в сочетании с данными об окружающей среде. Использование этого метода позволяет получать пространственно непрерывные данные, в то время как метод связывания дает резкие изменения характеристик на границах почвенных полигонов. GlobalSoilMap — это мировой консорциум, целью которого является создание глобальных цифровых карт ключевых свойств почвы (Sanchez et al., 2009). Ещё один мировой проект – система SoilGrids (https://www.soilgrids.org). Одна из новых версий (Hengl et al., 2017) была создана с помощью методов машинного обучения на основе около 150 тысяч профилей почвы и 158 почвенных ковариат, что в настоящее время является самой подробной оценкой глобального распределения почвенных характеристик. В обзоре глобальных наборов свойств почвы для использования в моделях ДСС (Dai et al., 2018) продукт SoilGrids выступает как наиболее предпочтительный для использования, поскольку дает наиболее близкие оценки к данным измерений, а также имеет высокую точность и пространственное разрешение.

Последние разработки по созданию наборов гидроданных с И теплофизическими характеристиками почвы представлены в обзоре (Van Looy et al., 2017). Согласно ему, на сегодняшний день существуют несколько баз данных с гидрофизическими характеристиками, в то время как наборов данных с теплофизическими характеристиками почвы не существует вовсе, как глобальных, так и региональных. В качестве примера наборов данных с гидрофизическими характеристиками можно привести следующие: глобальные наборы из работ (De Lannoy et al., 2014; Montzka et al., 2017; Zhang et al., 2018; Zhang et al., 2020), и региональные наборы China at 30 arc second resolution (Dai et al., 2013), Tropical South America at 15 arc second resolution (Marthews et al., 2014), Europe at 250-m resolution (Tóth et al., 2017), and the contiguous United States at 30-т resolution (Chaney et al., 2019). Однако эти наборы с гидрофизическими характеристиками имеют ряд недостатков. Например, не все из этих наборов могут напрямую и сразу использоваться в моделях ДСС из-за неполноты рядов (Zhang et al., 2019). Также большинство наборов из перечисленных основаны на использовании только лишь одной ПТФ, что может приводить к систематическим ошибкам в данных и недооценке неопределенностей (Neuman, 2003). Для более точных оценок лучше использовать ансамбль из  $\Pi T\Phi$  (Dai et al., 2013; Guber et al., 2006, 2009; Zhang et al., 2019). При этом следует обращать внимание на то, чтобы оценки, полученные на основе ансамбля ПТФ, физически соответствовали рассчитываемым гидрофизическим характеристикам. Так в наборе (Dai et al., 2013) используются медианные значения, полученные из нескольких ПТФ, что вероятно слишком просто для представления внутренних физических процессов. Необходимо отметить, что почвенные профили в некоторых наборах слишком чтобы отразить вертикальных комбинаций. сложность реальных просты, Например, наборы (Marthews et al., 2014; De Lannoy et al., 2014) дают гидрофизические параметры лишь до глубины 100 см. Также в наборах (De Lannoy et al., 2014), в которых параметры были рассчитаны только на основе типов почв (текстурных классов), они не меняются непрерывно, и могут давать большие отличия для соседних классов, что в свою очередь приводит к некорректным результатам при использовании таких наборов в моделях ДСС.

Одним из последних и наиболее современных глобальных наборов гидро- и теплофизических характеристик почвы с высоким пространственным разрешением является набор данных, созданный группой китайский ученых в 2019 году (Dai et. al, 2019) (далее будем обозначать как «ПН2019»). В этом наборе характеристики почвы представлены глобальными полями с пространственным разрешением 30"х30", имеют четыре варианта распределения по горизонтальным слоям (максимум 8 слоев до глубины 3.8 м) и доступны для свободной загрузки (*http://globalchange.bnu.edu.cn/research/soil5.jsp*). Этот набор был разработан на

основе наборов GSDE и SoilGrids и включает в себя основные физические характеристики почвы (гранулометрический состав, пористость и органическая компонента), гидрофизические коэффициенты для параметризации Брукса-Кори/Клаппа-Хорнбергера, гидрофизические коэффициенты для параметризации Муалема-ван Генухтена и термофизические характеристики (Dai et al., 2019; Johansen, 1975). 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. В таблице 2 перечислены некоторые характеристики, содержащиеся в этом наборе.

Таблица 2 – Почвенные характеристики, содержащиеся в глобальном наборе

$V_{ m gravel}$ , $V_{ m SOM}$ , $V_{ m sand}$ , $V_{ m silt}$ , $V_{ m clay}$ , $ heta_s$	Объемные фракции гравия,				
	органического вещества почв, песка,				
	ила и глины, а также содержание воды				
	при насыщении, эквивалентное				
	пористости				
	$(V_{\text{gravel}}+V_{\text{SOM}}+V_{\text{sand}}+V_{\text{silt}}+V_{\text{clay}}+\theta_s=100\%)$				
Ks	Гидравлическая проводимость при				
	насыщении, см/день				
ГФК для	параметризации Клаппа–Хорнбергера				
$\psi_s$	Потенциал влаги при насыщении, см				
b	Безразмерный параметр				
ГФК для пар	аметризации Муалема-ван Генухтена				
α	Величина, обратная давлению входа				
	воздуха, 1/см				
n	Безразмерный параметр (отражает				
	распределение пор по размерам)				

aniopin

## ПН2019.

Исходное пространственное разрешение этих данных – 30''х30'', также в наборе представлено 3 набора вертикальных профилей: 4 уровня до глубины 2 м, 4 уровня до глубины 3 м, 10 уровней до глубины 3.8 м. Основной особенностью этих данных является наличие именно гидро- и термофизических характеристик, поскольку эти характеристики практически не измеряются и в наборах данных, обычно используемых для моделирования ДСС, не представлены.

На рисунке 7 представлено распределение (гистограмма) ГФК ( $K_s$  и  $\alpha$ ) из ПН2019 по 11 типам почв по треугольнику Ферре, которое показывает их двукратную вариативность даже внутри одного типа почвы. На рисунок также нанесены (красные точки) значения ГФК из ПН98, который использовался в исходной версии модели ДСС ТегМ.



Рисунок 7. Распределение (синий цвет) ГФК по типам почв согласно треугольнику Ферре (11 типов) по данным ПН2019: а) – гидравлическая проводимость насыщения *log10(K<sub>s</sub>)* (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.

Таким образом, использование низкого разрешения исходного набора данных по гранулометрическому составу и задание предписанных значений гидрофизических коэффициентов по типам почв не отражает всего ИХ многообразия. Использование предписанных по типам почвы ГФК (ПН98) при увеличении горизонтального разрешения ДСС модели может вносить

погрешность в результаты моделирования, поскольку эти величины входят явно в используемые параметризации и участвуют в решении дифференциальных уравнений. Поэтому для развития модели ДСС TerM необходимо найти новый, более точный источник ГФК, использование которого позволит улучшить качество воспроизведения моделируемых величин.

## Сравнение источников гидрофизических коэффициентов для использования в модели деятельного слоя суши TerM.

Основной вопрос, затрагиваемый в этом разделе, можно сформулировать следующим образом: будет ли обеспечена приемлемая точность моделирования при использовании внутри модели ДСС какой-то одной, в некотором смысле оптимальной, ПТФ для расчета ГФК по внешним данным о составе почвы, либо необходимо использовать глобальные наборы информации и по гранулометрическому составу, и по гидрофизическим характеристикам? Для ответа на этот вопрос в настоящей работе и проведен анализ наиболее часто используемых в научной литературе и исследованиях ПТФ, на основе которого можно выбрать оптимальную (одну) ПТФ для включения ее в модель ДСС.

Для расчета потенциала влаги насыщенной почвы и безразмерного показателя Клаппа–Хорнбергера часто используются следующие ПТФ: Сакстона (Saxton et al, 1986), Кэмпбелла (Campbell and Shiozawa, 1992), Ролза (Brakensiek et al., 1984), Остервельда (Osterveld and Chang, 1980), Уильямса (Williams et al., 1992), Майра (Mayr and Jarvis, 1999), Сакстона и Ролза (Saxton and Rawls, 2006), Косби (Cosby et al, 1984). Для расчета гидравлической проводимости часто используют ПТФ: Сакстона (Saxton et al, 1986), Ролза (Brakensiek et al., 1984), Косби (Cosby et al, 1984), Востена (Wosten et al, 1986), Ролза (Brakensiek et al., 1984), Косби (Cosby et al, 1984), Востена (Wosten et al, 1999; 2001), Джабро (Jabro, 1999), Оттони (Ottoni et al, 2019), Швета–Прасана (Shwetha and Prasanna, 2018), Немеса (Nemes et al, 2005), Томасселы (Tomassela and Hodnett, 1997).

На базе языка программирования Python был создан программный модуль, реализующий набор функций, требуемых для расчета выбранных ПТФ, а также

предоставляющий возможность получения результатов в графическом виде для их анализа.

На первом этапе работы для расчета ГФК с использованием ПТФ использовались смоделированные показатели состава почвы. Для моделирования содержания песка, глины и ила используется классификация почв USDA (U.S. Department of agriculture), разработанной Министерством сельского хозяйства США и Национальным объединением исследователей почв (Ditzler et al., 2017). Данная классификация наглядно демонстрируется с помощью треугольника Ферре (Soil survey manual, 2018) (рисунок ба).



Рисунок 8. Распределение статистической выборки значений почвенных фракций (гранулометрического состава; белый цвет на треугольнике означает отсутствующие комбинации почвенных фракций, если увеличивать размер выборки, то площадь белого цвета будет сокращаться).

Случайным образом на основе равномерного распределения было сгенерировано множество значений объемного содержания песка, ила и глины с учетом того, что всегда выполняется следующее выражение  $V_{\text{clay}} + V_{\text{silt}} + V_{\text{sand}} = 100\%$  (рисунок 8). В качестве значений  $\theta_s$  и  $V_{\text{SOM}}$  на основе данных из ПН2019 рассчитаны средние значения этих характеристик для каждого типа почвы, который определялся согласно методике (Benham et al., 2009) по треугольнику Ферре.
Для начала был проведен тестовый расчет ПТФ из программного модуля на Python. Результаты расчета сравнивались с результатами расчета PTF Calculator для MS Excel, разработанного в 2010 г. А. Губером и Я. Пачепски (Guber and Pachepsky, 2010). Тест был пройден успешно, результаты тестового расчета совпали с результатами PTF Calculator.

После был проведен основной расчет гидрофизических этого коэффициентов с помощью выбранных ΠΤΦ с использованием ранее сгенерированного множества значений объемного содержания песка, ила и глины (рисунок 9, 10).

Некоторые ПТФ дают сильно завышенные значения относительно других, что объясняется тем, что эти ПТФ могут давать ошибочные граничные гидрофизические характеристики. В некоторых оригинальных публикациях даются границы применимости ПТФ (например ПТФ Ролза применима только тогда, когда 5% <  $V_{\text{clay}}$  < 60% и 5% <  $V_{\text{sand}}$  < 70%), что сразу же накладывает ограничения на их использование. Также на графиках гидрофизических характеристик, при расчете которых использовались ПТФ, зависящие не только от гранулометрического состава, но и от пористости/содержания органического вещества почв, наблюдаются линии разрыва. Возможно, это объясняется тем, что для сгенерированной выборки треугольнику Ферре В ПО качестве пористости/содержания органического вещества почв использовались средние значения для каждого типа почвы. Поэтому анализ поведения ПТФ только на смоделированных данных гранулометрического состава не может быть полным.

ПТФ Ролза



Рисунок 9. Потенциал влаги при максимальном насыщении почвы (см), рассчитанный с использованием сгенерированной выборки значений гранулометрического состава по треугольнику Ферре. Значения осей x и y: V<sub>sand</sub> и  $V_{clay} \in (0; 100).$ 

ПТФ Сакстона

3000000



Рисунок 10. Гидравлическая проводимость при максимальном насыщении почвы (см/час), рассчитанная с использованием сгенерированной выборки значений гранулометрического состава по треугольнику Ферре. Значения осей *x* и *y*: *V*<sub>sand</sub> и

$$V_{clay} \in (0; 100).$$

Таким образом, выполнен второй этап работ – расчет ГФК с использованием выбранных ПТФ по данным гранулометрического состава из ПН2019, описанного выше. Для этого исходные данные из ПН2019 были переведены на пространственное разрешение 0.1° на 0.1° с учетом площади каждой ячейки, так как исходное пространственное разрешение набора очень мелкое и, соответственно, размер файлов очень велик, что вызывает некоторые затруднения при расчетах. Для анализа брался только первый уровень (0–0.0451 м) почвы по глубине, что соответствует поверхности. На рисунке 11 представлено распределение почвенных фракций (гранулометрический состав) на поверхности по типам почв, полученных из этого набора. Отметим, что пористость и содержание органического вещества почв в ПН2019 имеют свои уникальные значения для всего множества величин гранулометрических параметров.



Рисунок 11. Распределение почвенных фракций (гранулометрический состав) по треугольнику Ферре, взятых из глобального набора почвенных характеристик (ПН2019) с пространственным разрешением 0.1°×0.1°.

На рисунке 12, 13 представлены рассчитанные значения потенциала влаги и гидравлической проводимости при максимальном насыщении почвы с использованием ПТФ по данным из ПН2019.



Рисунок 12. Потенциал влаги при максимальном насыщении почвы (см), рассчитанный по данным из ПН2019. Значения осей *x* и *y*: *V*<sub>sand</sub> и *V*<sub>clay</sub> ∈ (0; 100).



Рисунок 13. Гидравлическая проводимость при максимальном насыщении почвы (см/ч), рассчитанная по данным из ПН2019. Значения осей x и y:  $V_{sand}$  и  $V_{clay} \in (0; 100)$ .

При сравнении результатов (потенциал влаги – рисунок 9 и 12; гидравлическая проводимость – рисунок 10 и 13) можно сделать следующие ниже выводы.

1. Прежде всего видно, что в первом варианте (рисунок 9 и 12) графики гидрофизических ΠΤΦ характеристик, где зависят не только OT гранулометрического состава, но и от пористости/органического вещества почв, имеют линии разрыва. Возможно, это объясняется тем, что пористость/плотность и органическое вещество почв являются кусочно-разрывными функциями, так как представляют собой набор средних, определенных по треугольнику Ферре, для разных типов почв, при этом другие независимые аргументы для ПТФ (песок, глина, ил) являются непрерывными функциями во всей области определения. Графики ПТФ (рисунок 12, 13), рассчитанные по данным ПН2019, не имеют таких разрывов, так как пористость/органическое вещество почв представляют собой непрерывные функции, соответствующие изменению области определения других аргументов.

В первом и во втором случаях формы ПТФ (рисунок 9, 12; рисунок 10, 13) близки между собой, но шкалы и порядок значений отличаются. Это может объясняться тем, что не все крайние значения гранулометрического состава есть в ПН2019 (рисунок 11).

3. Как в первом, так и во втором случаях ПТФ Сакстона, Кэмпбэлла, Остервельда, Уильмса, Сакстона и Ролза (рисунок 9, 12); Востена (только во втором случае), Джабро (рисунок 10, 13) в крайних точках дают очень высокие значения гидрофизических характеристик по сравнению с другими ПТФ.

4. Графики для одной и той же гидрофизической характеристики имеют разную форму. В группу наиболее схожих по форме графиков можно отнести ПТФ Сакстона, Кэмпбелла, Ролза, Остервельда, Уильямса и Косби. Формы ПТФ Майра и Сакстона/Ролза отличаются от остальных. Формы графиков для гидравлической проводимости более неоднородны. Наиболее схожи формы по ПТФ Сакстона, Ролза, Востена 1, Джабро, Оттони 2, Шветта–Прасана 2; Косби и

Оттони 1. Графики по ПТФ Шветта–Прасана 1, Немеса, Томасселы отличаются от всех.

Для полной картины построим аналогичные графики распределения ГФК из данных ПН2019.



Рисунок 14. Потенциал влаги (см) (а) и гидравлическая проводимость (см/ч) (б) при максимальном насыщении из ПН2019.

На рисунке 14 представлены графики потенциала влаги и гидравлической проводимости при максимальном насыщении по данным из ПН2019. Если сравнить их со значениями, полученными по различным ПТФ по данным гранулометрического состава из ПН2019, то можно отметить, что форма некоторых ПТФ совпадает (ПТФ Сакстона, Ролза, Востена 1, Оттони 2 для гидравлической проводимости и ПТФ Сакстона, Кэмпбелла, Ролза, Уильямса и Косби 1, 2 для потенциала влаги). Но при сравнении значений различия достаточно большие, для потенциала влаги схожие по форме ПТФ Сакстона – 20000 см), в то же время потенциал влаги из ПН2019 ≤ 100 см. Для гидравлической проводимости схожие по форме ПТФ также дают завышенные значения по

сравнению со значениями из ПН2019 (например, максимальная величина по ПТФ Востена 60 см/ч).

В качестве дополнения приведем статистические характеристики (таблицы 3 и 4) для гидрофизических характеристик, полученных с использованием выбранных ПТФ по сгенерированной выборке и по данным из ПН2019, и для гидрофизических характеристик непосредственно из ПН2019. Для сравнения двух статистических характеристик в качестве основных используются МЕ (средняя ошибка), МАЕ (средняя абсолютная ошибка), МRE (средняя относительная ошибка), RMSE (средняя абсолютная ошибка), СС (коэффициент корреляции Пирсона) и KGE (эффективность Клинга–Гупты). Аналогичные статистические характеристики для гидравлической проводимости представлены в таблицах 5 и 6.

Таблица 3 – Статистические характеристики для потенциала влаги, рассчитанного с помощью выбранных ПТФ по сгенерированной выборке и по данным из

<u>ПH20</u>	19
111120	1).

ΠΤΦ	Средн	Средне	ско Ψ <sub>s</sub>	ско Ψ <sub>s</sub>	ME	MAE	MRE	RMSE	KGE
	ee	e	(выбор	(ПН20					
	значе	значен	ка)	19)					
	ние $\Psi_s$	ие Ψ <sub>s</sub>							
	(выбо	(ПН20							
	рка)	19)							
Сакстон	1151.3	2791.7	1641.7	47796.4	1640.5	3757. 2	142.5	4.79E+ 04	-10.1
Кэмпбел л	48.1	228.6	63.4	788.2	180.5	198.9	375.4	811.1	-3.2
Ролз	59.8	63.8	50.0	63.0	4.0	56.8	6.7	80.6	0.0
Остервел ьд	1.68E+ 05	742.8	2.48E+0 5	1.01E+0 4	- 1.67E+ 05	1.68E +05	-99.6	2.99E+ 05	-7.3
Уильямс	213.1	28.3	253.6	123.8	-184.8	199.1	-86.7	337.4	-2.0
Уильямс	132.4	17.3	174.6	38.5	-115.1	128.5	-86.9	212.7	-0.5
Майр	2.6	3.4	0.9	1.9	0.8	1.5	29.1	2.2	-0.2
Сакстон и Ролз	18.5	50.3	18.9	38.5	31.8	39.0	172.0	53.4	-1.0
Косби	13.2	31.8	10.2	18.7	18.5	21.5	139.8	28.2	-0.7
Косби	12.6	31.8	9.7	16.4	19.3	21.7	153.3	27.1	-0.9

# Таблица 4 – Статистические характеристики для потенциала влаги, рассчитанного с помощью выбранных ПТФ по данным из ПН2019 и для потенциала влаги из

ΠΤΦ	Среднее значени е Ψ <sub>s</sub> (ПН201 9)	ско Ψ <sub>s</sub> (ПН201 9)	ME	MAE	MRE	RMSE	CC	KGE
Сакстон	2791.7	47796.4	1125.0	1138.2	4292.0	2000.6	-0.7	-42.0
Кэмпбелл	228.6	788.2	21.9	23.6	83.4	58.8	0.6	-0.2
Ролз	63.8	63.0	33.5	46.8	128.0	69.6	-0.4	-0.9
Остервельд	742.8	1.01E+0 4	1.7E+05	1.7E+05	6.4E+05	3.0E+05	-0.7	- 6.4E+ 03
Уильямс	28.3	123.8	186.9	196.5	712.9	325.1	-0.6	-6.3
Уильямс	17.3	38.5	106.2	133.2	405.1	214.9	-0.6	-3.4
Майр	3.4	1.9	-23.6	23.6	-90.0	29.9	0.7	-0.1
Сакстон и Ролз	50.3	38.5	-16.8	20.8	-63.9	24.8	0.4	0.2
Косби	31.8	18.7	-13.0	13.3	-49.5	18.2	0.8	0.5
Косби	31.8	16.4	-13.6	14.1	-52.1	19.1	0.8	0.4
Среднее значение $\Psi_s$ из ПН2019	26.2							
ско <i>Ψ</i> <sub>s</sub> из ПН2019	19.1							

### ПН2019.

Таблица 5 – Статистические характеристики для гидравлической проводимости, рассчитанной с помощью выбранных ПТФ по сгенерированной выборке и по

ΠΤΦ	Сред нее знач ение <i>K</i> <sub>s</sub> (выб орка)	Средн ее значе ние <i>K</i> <sub>s</sub> (ПН2 019)	ско <i>К</i> s (выбор ка)	ско К <sub>s</sub> (ПН2 019)	ME	MAE	MRE	RMSE	KGE
Сакстон	1.8	1.2	5.7	3.9	-0.6	2.6	-34.7	6.9	-0.1
Ролз	1.9	0.4	5.0	1.2	-1.5	2.0	-77.5	5.3	-0.3
Косби	5.6	1.3	4.2	1.1	-4.3	4.6	-76.5	6.1	-0.3
Востен	1.2	2.6E+1 1	1.9	3.7E+1 4	2.6E+1 1	2.6E+1 1	2.1E+1 3	3.7E+1 4	- 2.1E+1 1
Востен	47.7	1.1	4222.5	0.3	-46.6	47.9	-97.8	4222.7	-0.7
Джабро	419.9	3.3	13141.9	806.9	-416.6	422.4	-99.2	13173.2	-6.0
Оттони	2.8	1.4	1.3	0.5	-1.4	1.6	-50.1	2.0	-0.1
Оттони	1.6	1.1	2.9	0.5	-0.5	1.1	-29.2	3.0	-0.3
Швета– Прасана	1.1	2.2	1.4	0.7	1.1	1.4	99.2	1.9	-0.6
Швета– Прасана	20.8	4.4	23.0	3.9	-16.3	18.2	-78.7	28.5	-0.3
Немес	8.4E+ 24	0.0	1.2E+28	0.1	- 8.4E+2 4	8.4E+2 4	-100.0	1.2E+2 8	-0.7
Томассе ла	3.2	1.0	1.6	1.2	-2.3	2.5	-70.6	3.0	-0.9

данным из ПН2019.

# Таблица 6 – Статистические характеристики для гидравлической проводимости, рассчитанной с помощью выбранных ПТФ по данным из ПН2019, и для

ΠΤΦ	среднее значени е <i>K</i> s (ПН201 9)	ско <i>Ks</i> (ПН20 19)	ME	MAE	MRE	RMSE	CC	KGE	
Сакстон	1.2	3.9	0.6	1.3	53.6	4.6E+00	0.7	-0.3	
Ролз	0.4	1.2	0.8	1.2	65.9	4.0E+00	0.7	0.0	
Косби	1.3	1.1	4.5	4.5	387.1	6.5E+00	-0.1	-3.1	
Востен	2.6E+11	3.7E+14	0.0	0.8	4.1	1.9E+00	0.5	0.5	
Востен	1.1	0.3	46.6	48.0	4048.1	4.2E+03	0.0	-70.1	
Джабро	3.3	806.9	418.7	419.7	3.6E+04	1.3E+04	0.0	-363.6	
Оттони	1.4	0.5	1.7	2.2	147.0	2.8E+00	-0.1	-0.9	
Оттони	1.1	0.5	0.5	0.9	40.8	2.8E+00	0.4	0.2	
Швета– Прасана	2.2	0.7	0.0	1.1	-4.3	1.5E+00	0.6	0.5	
Швета– Прасана	4.4	3.9	19.6	20.2	1706.3	3.1E+01	-0.4	-16.1	
Немес	0.0	0.1	8.4E+2 4	8.4E+24	7.3E+26	1.2E+28	0.0	- 7.3E+24	
Томассела	1.0	1.2	2.1	2.4	182.5	3.1E+00	0.0	-1.2	
Среднее значение <i>K<sub>s</sub></i> из ПН2019	1.2								
ско <i>К<sub>s</sub></i> из ПН2019	1.7								

гидравлической проводимости из ПН2019.

В ΠΤΦ заключении можно сказать, что случае расчета по В сгенерированному множеству гранулометрического состава и средним значениям пористости и содержания органического вещества почв для каждого типа почвы по треугольнику Ферре вид ПТФ (наличие разрывов на графике) отличается от ПТФ, рассчитанных по данным гранулометрического состава, пористости и содержания органического вещества почв, взятым из ПН2019. Отсюда можно сделать вывод, что использование средних значений пористости или содержания органического вещества почв при расчете ПТФ может давать ошибку (недооценку) в значениях как потенциала влаги (соответственно и безразмерного показателя Клаппа–Хорнбергера), так и гидравлической проводимости.

ПТФ могут в принципе давать сильно завышенные значения как при какихто крайних значениях гранулометрического состава, так и в общем. Отсюда можно сделать вывод, что использовать какую-то одну ПТФ в модели ДСС для расчета требуемых характеристик некорректно. Оптимальное решение – использование готовых и проверенных глобальных наборов почвенных характеристик (Weber at al., 2024), например, ПН2019, авторы которого используют специальные методики ансамблевого осреднения и минимизации для получения глобального поля ГФК.

Результаты проделанной работы представлены в статье (Рязанова и др., 2023).

## ГЛАВА 2. TerMPS: программное обеспечение для подготовки данных о параметрах поверхности суши, используемых в моделях деятельного слоя суши и моделях Земной системы

Как было отмечено выше для работы модели ДСС ТегМ требуются внешние данные (характеритиски почвы, растительности, рельефа и т.д.). Пространственное же разрешение моделей деятельного слоя суши может варьироваться в зависимости от целей и задач исследователей, использующих такие модели. Сейчас возможное пространственное разрешение для моделей ДСС при региональных расчетах находится в пределах от 1° до 0.1°. При изменении пространственного разрешения модели каждый раз нужны внешние наборы характеристик поверхности суши, разрешение которых будет соответствовать разрешению модели.

В ЭТОМ случае возможно несколько вариантов решения вопроса: использование готового программного обеспечения (ПО), либо же создание гибкого пакета программ, обеспечивающего возможность генерации полей характеристик поверхности суши на произвольной, заданной пользователем, равномерной широтно-долготной сетке и в общем случае неравномерной сетке по вертикали (в почве). Использование уже готовых решений может нести некоторые трудности: платное ПО, либо, же если это открытое ПО, то возможны сложности с технической поддержкой, либо же функционал ПО создан под какую-то иную модель со своей реализацией физических процессов и сеткой. Основным плюсом в поддержку создания своей системы подготовки данных является то, что появляется возможность быстрой генерации требуемых данных на нужной для модели сетке с понятным исходным кодом.

2.1. Агрегирование данных на горизонтальную широтно-долготную сетку

Перечисленные выше параметры поверхности суши можно разделить на три группы:

- Данные, содержащие количественные значения: физические характеристики (гранулометрический состав, гидрофизические характеристики почвы, площади типов земной поверхности, площадь водоёмов, высота городской застройки и т.д.).
- 2. Данные, содержащие качественные значения: тот или иной качественный признак (тип земной поверхности, наличие/отсутствие болот и т.д.).
- 3. Данные, содержащие информацию о направлении и водосборных площадях речной сети.

В работе рассматриваются только первые два типа данных и равномерные широтно-долготные сетки. В случае, если сетка исходных данных не совпадает с широтно-долготной, то необходимо выполнить перепроецирование исходных данных сторонними инструментами. Предполагается, что на широтно-долготных сетках значения параметров привязаны к центрам ячеек.

В зависимости от типа данных применяются разные подходы к агрегированию (Beliakov, 2016) на целевую сетку модели. Для количественных характеристик агрегирование осуществляется с помощью расчета среднего взвешенного, где в качестве веса выступает площадь ячейки. Среднее взвешенное может быть определено различным образом, и оптимальный для данного параметра метод осреднения определяется тем, как параметр входит в систему дифференциальных уравнений модели ДСС. В текущей версии разработанного ПО реализовано три варианта метода: среднее взвешенное арифметическое (формула 13), геометрическое (формула 14) и гармоническое (формула 15):

$$f_{out,i} = \frac{\sum_{\Omega_j \in S_i} f_j \mu(\Omega_j)}{\mu(S_i)}, (12)$$

$$f_{out,i} = \prod_{\Omega_j \in S_i} f_j^{\frac{\mu(\Omega_j)}{\mu(S_i)}}, f_j > 0, (13)$$
$$f_{out,i} = \frac{\mu(S_i)}{\sum_{\Omega_j \in S_i} \frac{\mu(\Omega_j)}{f_j}}, (14)$$

где  $f_{in,j}$  - значение количественного параметра в ячейке исходной (мелкой) сетки  $\Omega_j$ ,  $\mu(...)$  - 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 12 можно трактовать как математическое ожидание величины f, где плотность вероятности f определяется мерой (площадью) ячеек исходного разрешения с соответствующими значениями f. Для прямоугольной ячейки  $\mu(\Omega_j) = [\lambda_1, \lambda_2] \times [\varphi_1, \varphi_2]$  на сфере:

$$\mu(\Omega_j) = R^2(\sin\varphi_{2j} - \sin\varphi_{1j}) * (\lambda_{2j} - \lambda_{1j}), (15)$$

где R – радиус Земли. На рисунке 15 схематично приведен пример процесса агрегирования исходных данных по формуле 12.



Рисунок 15. (а) – представление исходной сетки со значениями  $f_{in}$  количественного параметра, (б) – исходная (тонкие границы) и целевая (жирные границы) сетки с указанием агрегированного значения  $f_{out}$  количественного параметра в ячейке целевой сетки.

В некоторых случаях агрегирование количественных данных может подразумевать расчет не среднего значения по ячейке, а иных статистических метрик. В текущей версии программного кода реализован алгоритм расчета взвешенной дисперсии количественного параметра в пределах ячейки целевой сетки (используется для данных о высоте места) по следующей формуле:

$$f_{var,i} = \frac{1}{\mu(S_i)} \int_{S_i} (f - f_{mean})^2 dS = \frac{\sum_{\Omega_j \in S_i} (f_{in,j} \mu(\Omega_j) - f_{mean,i})^2}{\sum_{\Omega_j \in S_i} \mu(\Omega_j)}, (16)$$

где  $f_{mean,i}$  – агрегированное на целевую сетку среднее значение параметра  $f, f_{var,i}$  – агрегированная на целевую сетку дисперсия параметра f.

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. Вычисление проводится по следующей формуле:

$$g_{out,i}^{k} = \frac{\mu(S_{i}^{k})}{\mu(S_{i})} = \frac{\sum_{\Omega_{j} \in S_{i}, g_{in}^{k}(\Omega_{j}) = 1} \mu(\Omega_{j})}{\sum_{\Omega_{j} \in S_{i}} \mu(\Omega_{j})}, (17)$$

где  $g^k$  – 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, таким образом, качественные характеристики переходят в количественные значения.

На рисунке 16 приведен пример агрегирования категориальных данных. В этом примере в исходных данных в целевой ячейке присутствует только три категории данных, обозначенные цветом: оранжевый, синий, зеленый. В результате алгоритма агрегирования получается массив уже количественных характеристик – долей площади, которые занимает каждый цвет в ячейке сетки целевого пространственного разрешения.



Рисунок 16. (а) – исходная сетка с выделением цветом категориального признака исходных данных, (б) – исходная (тонкие границы) и целевая (жирные границы) сетки с указанием агрегированного значения долей (в %) категориальной характеристики в ячейке целевой сетки.

## 2.2. Проекция данных, имеющих вертикальное измерение, на произвольную неравномерную вертикальную сетку

Исходные данные 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.

Внесем некоторые уточнения по определению слоя сетки. Под i-м слоем в настоящей работе понимается интервал глубин в почве  $(z_{i-1/2}, z_{i+1/2})$ , имеющий толщину  $\Delta z_i$  и границы, под уровнем же будем рассматривать центр этого интервала. Каждому слою соответствует один уровень и наоборот. Расчёт толщин слоёв при известных значениях границ выполняется по следующей формуле:

$$\Delta z_i = \frac{z_{i+1/2} - z_{i-1/2}}{2}, i = \underline{2, N-1}; \Delta z_1 = \frac{z_{3/2} - z_1}{2}, \Delta z_N = \frac{z_N - z_{N-1/2}}{2}, (18)$$

где  $z_{i+1/2}$  – глубина уровня, разделяющего і-й и (i+1)-й слои,  $i = \overline{1, N - 1}$ ,  $\Delta z_i$  – толщина i-го слоя, N – количество слоёв. Зная уровень и толщину каждого слоя, можно получить значение границ для каждого слоя. Определённая таким образом сетка соответствует схеме конечно-разностной дискретизации уравнений тепловлагопереноса модели ДСС TerM: на границах слоёв определяются потоки тепла, жидкой влаги и водяного пара, а на глубинах  $z_{i+1} = z_i + \Delta z_{i+1/2}$  – температура, влажность, лёд и водяной пар ( $\Delta z_{i+1/2} = 2(z_{i+1/2} - z_i), i = \overline{1, N - 1}$ ).

Для проекции исходной сеточной функции на слои целевой сетки используется метод среднего взвешенного, аналогичный формуле 12, только в качестве весов используется толщина слоёв. Обозначим через  $z_{in,j}$  – нижнюю границу j-го слоя исходной вертикальной сетки, а через  $z_{out,i}$  – нижнюю границу i-го слоя целевой вертикальной сетки, тогда формула для согласования примет следующий вид:

- 1. если  $z_{out,i} \leq z_{in,j}$ , тогда  $f_{out,i} = f_{in,j}$  (вариант 1, рисунок 17а).
- 2. если *z<sub>out,i</sub>* > *z<sub>in,i</sub>*, тогда
  - а. если z<sub>in,j</sub> ∈ [z<sub>out,i-1</sub>, z<sub>out,i</sub>]; z<sub>in,j+1</sub> ∉ [z<sub>out,i-1</sub>, z<sub>out,i</sub>], тогда (вариант 2а, рисунок 17а)

$$k_{1} = z_{in,j} - z_{out,i-1}, k_{2} = z_{out,i} - z_{in,j},$$
$$f_{out,i} = \frac{k_{1} * f_{in,j} + k_{2} * f_{in,j+1}}{k_{1} + k_{2}}.$$

b. если z<sub>in,j</sub> ∈ [z<sub>out,i-1</sub>, z<sub>out,i</sub>]; z<sub>in,j+1</sub> ∈ [z<sub>out,i-1</sub>, z<sub>out,i</sub>], тогда (вариант 2b, рисунок 17в)

$$k_{1} = z_{in,j} - z_{out,i-1}, k_{2} = z_{out,i} - z_{in,j+1},$$
$$f_{out,i} = \frac{k_{1} * f_{in,j} + \Delta z_{in,j+1} * f_{j+1} + k_{2} * f_{in,j+2}}{k_{1} + \Delta z_{in,j+1} + k_{2}}$$

 $i = \overline{0, N_i}, j = \overline{0, N_j},$  где  $N_i$  и  $N_j$  – количество слоёв в исходной и целевой сетках.



Рисунок 17. Варианты согласования характеристик с одной вертикальной сетки на другую с учетом толщины каждого слоя.

Для получения среднего значения характеристики для всего профиля выполняется расчет обычного среднего арифметического взвешенного по формуле 13, где в качестве весов используется толщина слоёв.

2.3. Алгоритмы и программная реализация

В ходе разработки программного обеспечения были сформулированы следующие требования к входным данным:

1. Формат входных файлов – netCDF (Rew and Davis, 1990).

- 2. Система координат сферическая (широтно-долготная).
- 3. Шаг сетки равномерный по обеим координатам.

- 4. Пространственный шаг по широте и долготе исходных данных должен быть меньше или равен шагу сетки выходных данных (целевой сетки модели деятельного слоя).
- 5. Значения координат относятся к центрам ячеек.
- 6. Границы исходной сетки должны совпадать с границами целевой сетки.
- 7. Наличие собственной маски (например, маска суша/океан), это должно быть отражено в netCDF посредством установки идентификаторов отсутствия значений missing value или fill value.

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 *ру*-модуль, а затем в *ру*-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. На рисунке 18 представлена концепция реализации разработанного ПО.

ПО является открытым и находится в свободном доступе в системе контроля версий git, развернутой на сервере НИВЦ МГУ: *http://tesla.parallel.ru/Ryazanova/TerMPS* (для доступа необходима регистрация).



Рисунок 18. Концепция ПО для агрегирования данных о параметрах поверхности суши для модели ДСС TerM.

2.3.1. Блок агрегирования данных на произвольную широтно-долготную сетку

В данном разделе представлены базовые функции для агрегирования данных на произвольную широтно-долготную сетку:

- create\_grid функция для формирования сетки с целевым пространственным разрешением,
- select\_cells функция подготовки агрегирования, производит выбор ячеек исходной сетки, попавших в ячейку целевой сетки,
- calc\_area\_cell функция для расчета площади ячейки,
- calc\_weighted\_average функция агрегирования количественных данных,

• calc\_percentage\_type - функция агрегирования качественных данных. Функция select cells реализована в двух вариантах:

- Упрощенный вариант: при выполнении условия вложенности сеток, когда каждая ячейка целевой сетки есть объединение ячеек исходной сетки, а также, когда из исходной сетки выбираются только ячейки, полностью попавшие в ячейку целевой сетки.
- 2. Полный вариант: учитываются ячейки из исходной сетки как полностью попавшие в ячейку целевой сетки, так и части исходных ячеек, попавших в ячейку целевой сетки. Данный вариант значительно усложняет алгоритм выбора ячеек и расчета их площади, поскольку существует 16 вариантов неполного перекрытия: ни одна из границ исходной ячейки не совпадает с границей заданной (1 вариант, рисунок 19а); какая-либо из 4-х границ исходной ячейки совпадает с заданной (4 варианта, рисунок 19b); две из какихлибо 4-х границ исходной ячейки совпадает с заданной (6 вариантов, рисунок 19с); три из каких-либо 4-х границ исходной ячейки совпадает с заданной (4 варианта, рисунок 19d) и все границы исходной ячейки совпадают с заданной (4 варианта, рисунок 19d) и все границы исходной ячейки совпадают с заданной (1 варианта, рисунок 19d) и все границы исходной ячейки совпадают с заданной (1 варианта, рисунок 17е).



Рисунок 19. Возможные варианты (a, b, c, d, e) перекрытия ячеек исходной сетки (тонкие границы) ячейкой целевой сетки (жирные границы).

Для определения применимости усложненного варианта алгоритма (полной версии) было проведено два численных эксперимента. В первом эксперименте в качестве исходного пространственного разрешения было выбрано пространственное разрешение 30х30". Такое разрешение характерно для исходных данных о параметрах поверхности суши с высоким пространственным разрешением. В качестве разрешения целевой сетки было выбрано 0.5х0.5°, что соответствует пространственному разрешению глобальных и региональных моделей. Пространственное разрешение целевой сетки и исходной отличается примерное в 60 раз. Исходная сетка сдвинута относительно целевой на 0.001°.

60

Для оценки ошибки упрощенного (первого) варианта агрегирования было рассчитано два массива данных: площади ячеек целевой сетки и суммарные площади ячеек, полностью содержащихся в ячейке целевой сетки. После чего были рассчитаны статистические характеристики для определения ошибки между полученными массивами. Средняя относительная ошибка (MRE) составила -3.3%, что в абсолютных значениях соответствует приблизительно 65 км<sup>2</sup>.

Во втором эксперименте в качестве исходного пространственного разрешения было выбрано разрешение 0.5°х0.5°, а в качестве целевого – 2.25°х2.25°. Разрешение подбиралось таким образом, чтобы исходное было близко к целевому и при этом сетки не были вложенными. Также как в первом случае были рассчитаны площади ячеек и средняя относительная ошибка (MRE) между ними составила -20.9%, что в абсолютных значениях соответствует приблизительно 8366 км<sup>2</sup>.

Это означает, что полученные значения ошибок в первом эксперименте малы, следовательно, при высоком пространственном разрешении исходных данных можно использовать упрощенный вариант алгоритма. Если же разрешение исходных данные будет близко к разрешению получаемых, то значения ошибки будет уже существенными и надо использовать сложный вариант алгоритма.

2.3.2. Блок проекции данных, имеющих вертикальное измерение, на целевую вертикальную сетку

Перечислим базовые функции, входящие в ру-пакет и используемые для выполнения проекции исходных данных на неравномерную вертикальную сетку:

- calc\_layer\_bounds функция для расчета границ слоя,
- calc\_delta\_layer функция для расчета толщины слоя,
- recalc\_levels функция для выполнения проекции сеточной функции исходной вертикальной сетки (интерполирование/осреднение) на целевую сетку.

Также программное обеспечение включает в себя некоторые дополнительные функции, такие как:

- read\_data функция чтения netCDF данных,
- write\_netcdf\_2d функция записи данных размерности 2 в netCDF,
- write\_netcdf\_3d функция записи данных размерности 3 в netCDF.

Данные функции позволяют записывать полученные данные в формат netCDF с указанием различных метаданных данного формата. Например, единицы измерения, полное имя характеристики и т.д.

2.3.3. Программная реализация

Для того, чтобы воспользоваться базовыми функциями из ру-пакета, на языке Python созданы программы-обработчики (программные скрипты). Каждая программа-обработчик отвечает за агрегирования только одного параметра модели деятельного слоя. Для удобства запуска такой программы-обработчика используется управляющий файл в формате *json*, основное назначение которого заключается в задании параметров сетки, а также путей расположения исходных данных, требующих агрегирования и путей, куда будет записываться полученный результат (выходные файлы для модели деятельного слоя суши). Схема агрегирования данных на широтно-долготную сетку представлена на рисунке 20а, сеточной функции исходной вертикальной схема проекции сетки на произвольную целевую сетку показана на рисунке 20б.



Рисунок 20. Схема агрегирования данных на целевую широтно-долготную сетку (а); схема проекции сеточной функции исходной вертикальной сетки на целевую

сетку (б).

63

Чтение исходных данных высокого разрешения формата netCDF происходит блоками (читаются из netCDF только те значения в ячейках исходного пространственного разрешения, которые попали в ячейку целевой сетки), что позволяет не хранить в памяти весь исходный глобальный массив.

### 2.4. Примеры выходных данных

В таблице 7 представлены исходные наборы данных высокого пространственного разрешения о параметрах поверхности суши, выбранные для использования в модели ДСС TerM.

Эти наборы данных использовались для тестирования созданного программного обеспечения. Ниже приведем результаты по некоторым из них. Например, тестирование блока агрегирования количественных данных и блока для проекции вертикальной сетки проводилось на данных из глобальной базы почвенных характеристик ПН2019. Тестирование блока агрегирования качественных данных проводилось на данных из GLCCv2 (GLCC, 2017).

Таблица 7 – Наборы данных о параметрах поверхности суши, используемые в модели ДСС TerM или планируемые к использованию при подключении перспективных параметризаций.

Название набора	Переменные	Пространственное
данных,		разрешение
библиографическая		
ссылка		
Гнобольноя боро	Параметры	
почвенных характеристик ПН2019	гранулометрического	
	состава, теплофизические и	30x30"
	гидрофизические	
(Dai et al, 2019)	характеристики почвы	

GLCCv2 (GLCC, 2017), карта ИКИ РАН (Egorov et al, 2018), GLDB (Choulga et al, 2014), World Cover (Zanga et al, 2021), Copernicus Global Land Cover (Buchhorn et al, 2020)	Типы земной поверхности, водоёмы, урбанизированная поверхность	30x30"
Global LCZ Map (Demuzere et al, 2022)	Геометрические и теплофизические параметры городской застройки	100 м
MODIS (Myneni et al, 2015)	Параметры растительности (например, листовой индекс)	500 м
GLDB, ISIMIP3 Lake Sector (Golub et al, 2022), HydroSHEDS (Lehner et al, 2008)	Параметры водоёмов (средняя глубина), гипсометрическая кривая, направления речного стока, уклоны русел	30x30"
ETOPOI (NOAA, 2009)	Параметры рельефа	1X1'

Данные в наборе почвенных характеристик ПН2019 представлены в виде пространственным разрешением netCDF-файлов с 30x30" И имеют 8 вертикальных слоев по глубине (0 - 0.0451 м, 0.0451 - 0.0906 м, 0.0906 - 0.1655 м, 0.1655 - 0.2891 м, 0.2891 - 0.4929 м, 0.4929 - 0.8289 м, 0.8289 - 1.3828 м, 1.3828 -3.8019 м). В данном наборе представлены следующие характеристики почвы: объемные доли песка, ила, глины, гравия; пористость; гидрофизические параметризаций Клаппа-Хорнбергера характеристики для И Муалема-ван Генухтена. Объемные доли песка, ила, глины, гравия и пористость в сумме дают 1.

В качестве параметров целевой сетки было выбрано пространственное разрешение  $0.5^{\circ}x0.5^{\circ}$  Следует отметить, что шаг исходной сетки не кратен шагу целевой (30'' ~ 0.0083351135° в этом наборе данных) и их соответствующие узлы сдвинуты ~0.001°. Целевая вертикальная сетка задавалась следующим набором уровней: 0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25, 1.35, 1.45, 1.55, 2.00, 3.00, 5.00, 10.00 м. В результате агрегирования исходных данных был получен набор почвенных характеристик для пространственного разрешения  $0.5^{\circ}x0.5^{\circ}$ . Результат агрегирования представлен на рисунке 21.



Рисунок 21. Пространственное распределение пористости по данным почвенной базы для первого слоя 0 - 0.0451 м: а – исходные данные с пространственным разрешением 30", б – агрегированные данные на сетку разрешением 0.5х0.5°.

Соотношение между объемными долями песка, ила, глины, гравия и пористости сохраняются и также в сумме дают 1, что получается автоматически с применением описанных выше формул.

Профиль объёмного содержания песка на новой вертикальной сетке представлен на рисунке 22 для одной точки пространства, соответствующей почвенному разрезу на метеостанции «Бакчар» (57° с.ш., 82° в.д.). Здесь видно, что структура исходного профиля сохраняется и профиль характеристики не нарушается.



Рисунок 22. Распределение объемного содержания песка по глубине для одной точки (метеостанция «Бакчар»).

Распределение типов поверхности суши GLCCv2 представляет собой категориальный тип данных, где каждая ячейка исходных данных «заполнена» одним типом. В данной работе рассматривается только классификация SiB2 (Simple Biosphere 2 Model), состоящая из 15 типов. Пространственное

распределение этих данных - 30х30". В качестве параметров целевой сетки также было выбрано пространственное разрешение 0.5°х0.5°. Исходная и целевая сетки также сдвинуты ~ 0.001°.

На рисунке 23 представлены исходная карта GLCCv2 в классификации SiB2 и агрегированные данные на сетку 0.5°х0.5°. При агрегировании качественных данных необходимо вычислить долю площади каждого типа в заданной ячейке. В качестве иллюстрации приведено распределение доли площади вечнозеленых хвойных лесов.



Рисунок 23. Пространственное распределение типов растительного покрова по данным GLCCv2: а – исходные данные с пространственным разрешением 30", б – агрегированные данные на сетку 0.5х0.5° (доля площади (в %) в ячейках 0.5х0.5° типа «вечнозеленые хвойные леса»).

Полученные выше результаты демонстрируют работоспособность разработанного ПО и полностью решают поставленную задачу по агрегированию разных типов данных для модели ДСС (Рязанова и др., 2024). Поэтому было принято решение создать готовые наборы данных о параметрах поверхности суши, с различным горизонтальным разрешением: 0.1°х0.1°, 0.25°х0.25°, 0.5°х0.5°, 1°х1°, 2°х1.5°, 5°х4°. Эти наборы доступны для свободного скачивания по

http://kibel.srcc.msu.ru:8080/share.cgi?ssid=09b2cff84fe6498aa7b4d5e8f5134f7c.

### Глава 3. Чувствительность модели деятельного слоя к способу задания гидрофизических коэффициентов и их пространственному разрешению

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

- 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 тепломассоперенос в точке.
- 2. Три группы региональных экспериментов:
  - 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,
    - b) 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 тепломассопереноса в почве описаны верно, то тогда на правильность решения при фиксированных других параметрах поверхности суши будут влиять именно гидрофизические коэффициенты почвы, которые входят в физические уравнения через параметризацию как внешние параметры, описывающие физические свойства среды.

### 3.1. Локально-одномерный эксперимент (эксперимент 1)

Для моделирования тепломассопереноса 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 8 приведены основные почвенные характеристики: гранулометрический состав (получен из данных измерений) и соответствующие ему гидрофизические коэффициенты для Муалема-ван Генухтена. Данные коэффициенты параметризации были гранулометрического состава ИЗ глобального определены на основании почвенного набора высокого разрешения ПН2019.

Таблица 8 – Гранулометрический состав почвы на метеостанции «Бакчар» и соответствующие ему гидрофизические коэффициенты для параметризации Муалема-ван Генухтена из ПН2019.

V	V	V ила	V орг.	Порист	Парам	Парам	$log10(K_s),$
песка,	глины	$cm^3/cm^3$	материала	ость,	етр, <i>n</i> ,	етр, α,	(см/день)
см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>		, см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	П,	-	1/см	
				см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>			
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 осадках (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 (майсентябрь).

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 8, соответствующим измеренному гранулометрическому составу из глобальной базы (ГФК); второй – эксперимент со значениями ГФК, полученными осреднением полей высокого разрешения на ячейку 0.5°x0.5°, в которой находится выбранная точка (средние ГФК). Все остальные условия оставались одинаковыми для этих экспериментов.

На рисунке 24 представлен профиль температуры почвы с шагом 1 час до глубины 120 см по данным измерений, а также, полученный в результате двух модельных экспериментов с разным набором ГФК за теплый период (май-сентябрь) за 2016 год.

72




Профиль температура почвы, полученный в результате модельного расчета с ГФК из таблицы 8 достаточно неплохо согласуется с измеренным профилем температуры. В то время как профиль температуры почвы, полученный в результате модельного расчета со средними ГФК на глубине достаточно сильно отличается от данных измерений. В таблице 9 представлены статистические метрики (ME и RMSE), которые также это подтверждают. Большие значения ошибок в верхних слоях почвы как в первом, так и во втором модельном расчете скорее всего объясняются не совсем точными данными по радиации, взятыми из реанализа ERA5, поскольку в верхних слоях почвы температура в большей степени зависит именно от радиационного воздействия. Но с глубиной значения ошибок для модельного эксперимента с ГФК из таблицы уменьшаются.

Таблица 9. Значения ошибок модельного эксперимента относительно данных измерений температуры почвы за теплый период (май-сентябрь ) 2016 года.

глубина	ME		RMSE		
	измерения/моде	измерения/моде	измерения/моде	измерения/моде	
	ль (ГФХ из	ль (ср. ГФХ)	ль (ГФХ из	ль (ср. ГФХ)	
	таблицы 8)		таблицы 8)		
0	-0.632	-0.281	3.272	3.821	
2	-0.614	-0.125	2.653	2.298	
5	-0.355	0.341	2.056	1.875	
10	-0.412	0.616	1.694	1.594	
15	-0.357	1.003	1.494	1.645	
20	-0.243	1.464	1.361	1.996	
30	0.053	2.475	1.178	2.975	
40	0.482	3.579	1.326	4.088	
60	0.771	4.704	1.393	5.121	
80	1.001	5.365	1.400	5.677	
120	1.630	6.029	1.749	6.289	

На рисунке 25 представлена средняя температура почвы за теплый сезон (а) и за июль месяц (б) с 2013 по 2017 годы.



Рисунок 25. Температура почвы: a) – средняя за теплый сезон (май-сентябрь), б) – средняя за июль месяц.

По рисунку 25 видно, что при осреднении за многолетний период (сезон и месяц) ошибка между данными измерений и моделирования при использовании средних значений ГФК значительно возрастает. Это также подтверждается значениями средней ошибки (МЕ), значения которой приведены в таблице 10. Значения ошибки увеличиваются с глубиной, как для первого эксперимента, так и для второго, но при этом величина ошибки для эксперимента со средними ГФК в более чем в два раза превышает величину ошибки для эксперимента с ГФК из таблицы 8.

Таблица 10.	Средняя	ошибка (	(МЕ) для	я темпе	ературы	почвы,	получе	нной і	при
	моделир	овании, (	относите	ельно д	цанных 1	измерен	ий.		

ME	15 см	40 см	120 см		
сезон (май-сентябрь)					
измерения/модель	0.128	0.845	2.131		
(ГФХ из таблицы 8)					
измерения/модель	1.258	3.508	5.706		
(ср. ГФХ)					
месяц – июль					
измерения/модель	0.781	1.874	2.788		
(ГФХ из таблицы 8)					
измерения/модель	2.247	5.463	7.554		
(ср. ГФХ)					

Исходя из проведенных экспериментов можно заключить, что модель достаточно хорошо описывает тепломассоперенос в почве при точном 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. 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 во всем профиле (рисунок 26). 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.



Рисунок 26. Профиль объемной влажности почвы с шагом 1 час до глубины 120 см за теплый период года (май-сентябрь) 2016 года.

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

## 3.2. 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 профиля экспериментов. Расчет одинаковыми для всего И для всех полученными полями проводился статистических метрик между с ранее разработанного при участии автора диссертации использованием программного инструмента (Voropay et al., 2021).

Эксперимент 2.1 – эксперимент на чувствительность решения модели деятельного слоя суши к способу задания гидрофизических коэффициентов

На данный момент в модели ДСС ТегМ 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 7).

Проведены два численных эксперимента на чувствительность термовлажностного режима почвы в модели ДСС к выбору способа задания ГФК: **A)** предписанные значения ГФК по типам почвы согласно треугольнику Ферре (ПН98), **Б)** пространственные поля ГФК высокого разрешения ПН2019, агрегированные на сетку модели 0.5°х0.5°. В качестве расчетной области выбрана южная часть территории Западной и Восточной Сибири (50°-65° с.ш., 60°-120° в.д., рисунок 25). Горизонтальное разрешение модели ДСС – 0.5°х0.5°.



Рисунок 27. 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 27) располагается в центральной части материка Евразия и была выбрана как тестовая территория, поскольку 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 28а представлено поле распределения значений пористости по данным ПН98 (одно значение для каждого из 11 типов почвы) для разрешения модели 0.5°х0.5°; на рисунке 28б представлено поле распределение значений пористости данных высокого горизонтального разрешения ПН2019, агрегированных на сетку модели 0.5°х0.5°. 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. 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 28. Пространственное распределение пористости почвы (см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>) для горизонтального разрешения 0.5°х0.5°: а) ПН98; б) ПН2019.

По результатам экспериментов А (ГФК из ПН98) и Б (ГФК из ПН 2019) 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 рисунках 29в, 30в, 31в представлены поля разности средней многолетней температуры почвы  $\Delta T$  (2, 15, 55 и 125 см) за весь период, за июль и январь месяцы между двумя модельными расчетами.



Рисунок 29. Поля средней многолетней (1991-2021 гг.) температуры почвы T по глубинам, полученной моделью TerM по эксперименту с: а) ГФК из ПН98; б) ГФК из ПН2019; в) ΔТ между полями а) и б).



Рисунок 30. Поля средней многолетней июльской (1991-2021 гг.) температуры почвы Т по глубинам, полученной моделью TerM по эксперименту: а) ГФК из ПН98; б) ГФК из ПН2019; в) ΔТ между полями а) и б).



Рисунок 31. Поля средней многолетней январской (1991-2021 гг.) температуры почвы Т по глубинам, полученной моделью TerM по эксперименту: а) ГФК из ПН98; б) ГФК из ПН2019; в) ΔТ между полями а) и б).

Для более комплексного сравнения результатов двух экспериментов на рисунке 30 приведены поля средних многолетних значений влажности почвы (2, 15, 55 и 125 см) по двум экспериментам А (рисунок 32а) и Б (рисунок 32б) и на рисунке 33 приведены поля разности средних многолетних значений потока скрытого тепла ΔLE<sub>s</sub> за весь период (рисунок 33а) и отдельно за июль (рисунок 33б) и январь (рисунок 33в) месяцы.



Рисунок 32. Поля средней многолетней (1991-2021 гг.) влажности почвы по глубинам, полученные моделью TerM с заданием: а) ГФК почвы из ПН98; б) ГФК из ПН2019.



Рисунок 33. Поля средних многолетних значений потока скрытого тепла LE<sub>s</sub> (сверху вниз: за год, июль и январь): а) ГФК из ПН98; б) ГФК из ПН2019; в) ΔLE<sub>s</sub> между полями а) и б).

83

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<sub>s</sub>) – от -0.9 до -2.7 Вт/м<sup>2</sup>. Для поля средней многолетней влажности почвы отличается сам паттерн ее распределения по территории, который четко согласуется с полем распределения пористости почвы (рисунок 28 и рисунок 32).

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 влияние различия характеристик теплопроводности почвы увеличивается.

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 32a). 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 следствие, коэффициент теплопроводности. Эксперимент 2.2а – эксперимент на чувствительность решения модели деятельного слоя суши к пространственному разрешению гидрофизических коэффициентов почвы

Этот эксперимент был направлен на то, чтобы показать чувствительность модели к горизонтальному разрешению ГФК.

Постановка эксперимента: для исследуемой территории Западной и Восточной Сибири из исходных данных ПН2019 с пространственным разрешением 30" (~ 0.0083351135°, что составляет около 1 км) была выбрана область 100х100 ячеек (52.523°-53.432° с.ш., 81.706°-82.614° в.д., смотреть область А на рисунке 25, синий прямоугольник), имеющая неоднородную структуру почвы (рисунок 34 (1)) – домен с исходными ГФК. Затем гидрофизические коэффициенты выбранной области 100х100 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 10x10 ячеек (рисунок 34 (2)) – область характеристик размером с агрегированными ГФК.

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 100х100 ячеек (исходные ГФК, домен с высоким горизонтальным разрешением),

– для домена 10х10 ячеек (агрегированные ГФК, домен с низким горизонтальным разрешением).



Рисунок 34. Пространственное распределение ГФК (а) – пористость почвы (см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>); б) – гидравлическая проводимость почвы насыщения *K<sub>s</sub>* (см/день); в) параметр α (1/см)): 1 – домен 100х100 ячеек (1х1 км ячейка); 2 – домен 10х10 ячеек (10х10 км ячейка).

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). На рисунках 35, 36 и 37 представлены поля средних многолетних (за 30 лет) значений температуры и влажности почвы, а также поток явного и скрытого тепла (рисунок 35 – поля ВР, рисунок 36 – поля НР, рисунок 37 – поля аВР).



Рисунок 35. Средние многолетние значения (1990-2021 гг.): а) температуры (Т) почвы; б) влажности (W) почвы на глубинах 15 и 55 см; в) потоков явного (H<sub>s</sub>)



Рисунок 36. Средние многолетние значения (1990-2021 гг.): а) температуры (Т) почвы; б) влажности (W) почвы на глубинах 15 и 55 см; в) потоков явного (H<sub>s</sub>) и скрытого тепла (LE<sub>s</sub>) в эксперименте с низким разрешением.

87





После чего была рассчитана разность между средними многолетними значениями полей aBP и средними многолетними значениями полей HP за весь период и отдельно за теплый (июль) и холодный (январь) период года.

На рисунке 38 приведены значения разности между полученными полями моделируемых величин. Как видно по рисунку 38, разность для средней многолетней температуры почвы варьируется от -0.8 до 0.8 °C, при этом относительная разность в поле влажности может достигать 60%. Распределение разности влажности (полосы, протягивающиеся с юго-запада на северо-восток) повторяет полосы повышенных и пониженных значений ГФК (рисунок 34). Кроме того, ошибка увеличивается с глубиной, поскольку с глубиной различие характеристик влагопроводности почвы сильнее влияет на влажность почвы. Средняя ошибка воспроизведения температуры почвы в теплый период года варьируется от -1.2 °C до 1.2 °C, в холодное время ошибка увеличивается до 1.6 °C. Для влажности почвы и потоков явного и скрытого тепла средняя ошибка как за холодный, так и за теплый период остается в пределах значений средней

88

многолетней ошибки. В качестве оценки ошибки для температуры почвы можно привести данные об изменении глобальной температуры воздуха, которое составляет 1 °C (IPCC, 2023), что на климатических масштабах считается достаточно большим.



Рисунок 38. Поле разности для средних многолетних характеристик: а) температур (Т) почвы на глубинах 15 и 55 см; в) поток явного (H<sub>s</sub>) и скрытого тепла (LE<sub>s</sub>); б) поле относительной разности для средней многолетней влажности (W) почвы на глубинах 15 и 55 см.

Статистические метрики показывают, что поля, полученные моделью по агрегированным данным для области 10x10 ячеек, существенно отличаются от полей, воспроизводимых моделью при исходном высоком разрешении. Полагая, что ГФК из набора ПН2019 близки к реальному их распределению в природе, утверждать, улучшение разрешения пространственной можно что 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 – эксперимент на чувствительность решения модели деятельного слоя суши к методам агрегирования гидрофизических коэффициентов почвы

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 среднее арифметическое взвешенное (CAB), агрегирования: среднее геометрическое взвешенное (СГВ) и среднее гармоническое взвешенное (СГрВ). Такие методы часто используются для осреднения в гидрологических моделях (Мотовилов и Гельфан, 2018).

Дополнительно к блоку экспериментов 2.2а были проведены численные эксперименты, в которых ГФК, для выбранного домена 100х100 ячеек, были агрегированы с помощью СГВ и СГрВ на сетку в 10 раз крупнее, т.е. получен агрегированный набор характеристик размером 10х10 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 (МАЕ) варьируется от 0.8 до 1.1 °C 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. МRE 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 тепломассопереноса, помимо выбора самих гидрофизических коэффициентов также 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 – эксперимент на чувствительность решения модели деятельного слоя суши к горизонтальному разрешению модели

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°х4°, 1°х1°, 0.5°х0.5°, 0.25°х0.25°) 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°х1°, 0.5°х0.5°, 0.25°х0.25° были агрегированы на сетку 5°х4° и наложены на диаграмму рассеяния относительно результата эксперимента с горизонтальным разрешением 5°х4° (рисунок 39).

91



Рисунок 39. Результаты моделирования, полученные при горизонтальном разрешении 1°х1°, 0.5°х0.5°, 0.25°х0.25° и затем агрегированные на сетку 5°х4° (ось ординат), относительно результата эксперимента с горизонтальным разрешением 5°х4° (ось абсцисс): а) – средняя многолетняя температура почвы (T), C°, б) – средняя многолетняя влажность почвы (W), кг/кг, в) – средние многолетние значения потоков явного (H<sub>s</sub>) и скрытого тепла (LE<sub>s</sub>), Bт/м<sup>2</sup>.

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 разница. В распределении влажности и потока явного тепла такой явной зависимости не наблюдается, разница может быть, как в меньшую, так и в большую стороны.

92

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты анализа источников ГФК для использования их в модели ДСС, а также результаты модельных расчетов, показывающих чувствительность модели к способу задания ГФК, к пространственному разрешению и методу агрегирования.

В работе было показано, что правильность воспроизведения тепломассопереноса в почве в моделях ДСС при сравнении с данными измерений значительно зависит от правильности описания гидрофизических коэффициентов.

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 зависти от вида ГФК.

Если ГФК в модели ДСС задаются как одно значение для каждого из 11 типов почв (ПН98), 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 (ПН2019), агрегированные на сетку модели.

Для работы M3C, в том числе и их отдельных блоков (модель ДСС) требуются внешние данные о параметрах поверхности суши. Современные наборы таких параметров представляют собой отдельные для каждой группы параметров наборы геопространственных данных с высоким разрешением (например, 30"). Для использования таких данных в модели необходима их предварительная подготовка, а именно их агрегирование на горизонтальное и вертикальное (при наличии) разрешение целевой сетки модели. Для решения этой задачи было реализовано программное обеспечение для агрегирования геопространственных данных высокого разрешения на целевую сетку модели

ДСС ТегМ. Данное ПО имеет модульную структуру и дает возможность быстрого перевода исходных данных с высоким пространственным разрешением на разрешения необходимые пользователю для последующего их использования в модели ДСС ТегМ. ПО является открытым и доступно по адресу (нужна предварительная регистрация): *http://tesla.parallel.ru/Ryazanova/TerMPS*. С помощью этого ПО был рассчитан набор параметров поверхности суши, используемых в модели ДСС TerM (таблица 7), с различным пространственным разрешением:  $0.1^{\circ}x0.1^{\circ}$ ,  $0.25^{\circ}x0.25^{\circ}$ ,  $0.5^{\circ}x0.5^{\circ}$ ,  $1^{\circ}x1^{\circ}$ ,  $2^{\circ}x1.5^{\circ}$ ,  $5^{\circ}x4^{\circ}$ , что говорит о его универсальности и широком диапазоне применении в различных задачах.

## Список сокращений и условных обозначений

- о ГФК → Гидрофизические коэффициенты.
- о ДСС → Деятельный слой суши.
- О ИВМ РАН → Институт вычислительной математики Российской академии наук.
- о НИВЦ МГУ → Научно-исследовательский центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.
- ЛКЭИ ИМКЭС СО РАН → лаборатория климато-экологических исследований Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук.
- $\circ$  M3C  $\rightarrow$  Модель Земной системы.
- ПН98 → почвенный набор с одним значением ГФК для каждого типа почвы
- ПН2019 → почвенный набор с ГФК высокого пространственного разрешения
- $\circ$  ПО  $\rightarrow$  Программного обеспечение.
- $\circ$  ПТФ  $\rightarrow$  Педотраснферные функции.
- $\circ$  CMIP  $\rightarrow$  Coupled Model Intercomparison Project.
- $\circ$  TerM  $\rightarrow$  Terrestrial model.
- $\circ$  TerMPS  $\rightarrow$  Terrestrial model preprocessing system.

## Список использованной литературы

- Аббазов А.И. Гармонизация наборов данных о гидротермоденамических характеристик 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: ВИНИТИ, 1998.
- BMO. Руководящие указания BMO по расчету климатических норм / BMO. CH-1211 Geneva 2, Switzerland: World Meteorological Organization, 2017.
- Володин Е.М. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 2. Численные эксперименты по воспроизведению климата: 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. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений: Физика атмосферы и океана. / Е.М. Володин, В.Н. Лыкосов // Известия РАН. 1998. Т. 4. № 34. С. 453-465.
- Егоров А.А. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V. / Егоров [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. №15. С. 282–286. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286.
- 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. DOI: 10.31857/S0321059623600114.

- 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. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-3-5-24.
- Шеин Е.В. Курс физики почв / Е.В. Шеин. Москва: Изд-во МГУ, 2005.
- Asensio H. External Parameters for Numerical Weather Prediction and Climate Application EXTPAR v5.6 User and Implementation Guide / H. Asensio [et al.]. 2021.
- Baldauf M. Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities / M. Baldauf [et al.] // Monthly Weather Review. – 2011. – V. 139. – № 12. – P. 3887-3905.
- Batjes N.H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks / N.H. Batjes // Geoderma. – 2016. – V. 269. – P. 61-68.
- Batjes N.H. ISRIC-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arc-minutes global grid / N.H. Batjes. ISRIC- World Soil Information, Wageningen, 2006.
- Beliakov G. A Practical Guide to Averaging Functions: Studies in Fuzziness and Soft Computing. T. 329 / G. Beliakov, H. Bustince Sola, T. Calvo. – Cham: Springer International Publishing, 2016.
- Benham E. Clasification of Soil Texture Class Boundaries / E. Benham, R.J. Ahrens,W.D. Nettleton. National Soil Survey Center. L: USDA-NRCS, 2009.
- 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.

- Blyth E.M. Advances in Land Surface Modelling / E.M. Blyth [et al.] // Current Climate Change Reports. – 2021. – V. 7. – № 2. – P. 45-71.
- Bock L. Quantifying Progress Across Different CMIP Phases With the ESMValTool /
  L. Bock [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125.
   № 21. P. e2019JD032321.
- Bogomolov V. 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.
- Bouma J. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. / J. Bouma, H.A.J. van Lanen // Proceedings of the international workshop on Quantified land evaluation procedures: held in Washington, DC, 27 April - 2 May 1986 / ed. K.J. Beek, P.A. Burrough, D.E. MacCormack. – 1987. – P. 106-110.
- Brakensiek D.L. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils / D.L. Brakensiek, W.J. Rawls, G.R. Stephenson // ASAE Paper. – 1984. – P. PNR-84-203.
- 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.
- Buchhorn M. Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2 / M. Buchhorn [et al.] // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 6. P. 1044.
- Cale W.G. Aggregation error in nonlinear ecological models / W.G. Cale, R.V. O'Neill, R.H. Gardner // Journal of Theoretical Biology. – 1983. – V. 100. – № 3. – P. 539-550.

- Campbell G.S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data / G.S. Campbell, S. Shiozawa // Proc. Int. Workshop on Indirect methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. – Riverside: Univ. California, 1992. – P. 317-328.
- Chaney N.W. POLARIS: A 30-meter probabilistic soil series map of the contiguous United States / N.W. Chaney [et al.] // Geoderma. – 2016. – V. 274. – POLARIS. – P. 54-67.
- 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.
- Choulga M. Estimation of the mean depth of boreal lakes for use in numerical weather prediction and climate modelling / M. Choulga [et al.] // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. – 2014. – V. 66. – № 1. – P. 21295.
- 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.
- Côté J. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials /
  J. Côté, J.-M. Konrad // Canadian Geotechnical Journal. 2005. V. 42. № 2. –
  P. 443-458.
- Cuntz M. The impact of standard and hard-coded parameters on the hydrologic fluxes in the Noah-MP land surface model / M. Cuntz [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2016. – V. 121. – № 18.
- Dai Y. Development of a China Dataset of Soil Hydraulic Parameters Using Pedotransfer Functions for Land Surface Modeling / Y. Dai [et al.] // Journal of Hydrometeorology. – 2013. – V. 14. – № 3. – P. 869-887.
- Dai Y. A review on the global soil datasets for earth system modeling / Y. Dai [et al.]. Soils and water, 2018.

- 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.
- Dai Y. Evaluation of soil thermal conductivity schemes for use in land surface modeling
  / Y. Dai [et al.] // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2019. V. 11.
   № 11. P. 3454-3473.
- Danabasoglu G. The Community Earth System Model Version 2 (CESM2) / G. Danabasoglu [et al.] // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2020. – V. 12. – № 2. – P. e2019MS001916.
- Davy R. The Arctic Surface Climate in CMIP6: Status and Developments since CMIP5 / R. Davy, S. Outten // Journal of Climate. – 2020. – T. 33. – The Arctic Surface Climate in CMIP6. – № 18. – P. 8047-8068.
- De Lannoy G.J.M. An updated treatment of soil texture and associated hydraulic properties in a global land modeling system / G.J.M. De Lannoy [et al.] // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2014. – V. 6. – № 4. – P. 957-979.
- 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.
- Demaria E.M. Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the Variable Infiltration Capacity model / E.M. Demaria, B. Nijssen, T. Wagener // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2007. – V. 112. – № D11. – P. 2006JD007534.
- Demuzere M. A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science / M. Demuzere [et al.] // Earth System Science Data. – 2022. – V. 14. – № 8. – P. 3835-3873.
- Ditzler C. Soil Science Division Staff. Soil survey sand / C. Ditzler, K. Scheffe, H.C. Monger. Washington: Government Printing Office, 2017.

- Drozdov E.D. Parametrization of soil thermal conductivity in the INM RAS-MSU land surface model / E.D. Drozdov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 611. P. 012022.
- 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) / Earth Resources Observation And Science (EROS) Center. – U.S. Geological Survey, 2017.
- Engelen V.W.P. Global and National Soils and Terrain Digital 856 Databases (SOTER),
  Procedures Manual, version 2.0. / V.W.P. Engelen, J.A. Dijkshoorn. ISRIC World Soil Information, Wageningen, the Netherlands, 2012.
- Eyring V. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization / V. Eyring [et al.] // Geoscientific Model Development. – 2016. – V. 9. – № 5. – P. 1937-1958.
- FAO. Digital soil map of the world and derived soil properties / FAO. -2003.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. Harmonized World Soil Database (version 1.2) / FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. – FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, 2012.
- 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.
- Gates W.L. An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I) / W.L. Gates [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1999. – V. 80. – № 1. – P. 29-55.
- Gates L.W. An AMS continuing series: Global change–AMIP: The atmospheric model intercomparison project / L.W. Gates // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1992. – V. 73. – № 12. – P. 1962-1970.

- Gates L.W. Comments on the History of the Working Group on Numerical Experimentation / L.W. Gates. College Park, MD, USA, 2015.
- Giorgi F. Regional climate information—evaluation and projections / F. Giorgi // Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge: Cambridge univ. press, 2001. – P. 583-638.
- Golub M. A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: the ISIMIP Lake Sector / M. Golub [et al.] // Geoscientific Model Development. – 2022. – V. 15. – № 11. – P. 4597-4623.
- Guber A. K. Field-Scale Water Flow Simulations Using Ensembles of Pedotransfer Functions for Soil Water Retention / A.K. Guber [et al.] // Vadose Zone Journal. – 2006. – V. 5. – № 1. – P. 234-247.
- Guber A.K. Multimodel Simulation of Water Flow in a Field Soil Using Pedotransfer Functions / A.K. Guber [et al.] // Vadose Zone Journal. – 2009. – V. 8. – № 1. – P. 1-10.
- Guber A.K. Multimodeling with Pedotransfer Functions. Documentation and User Manual for PTF Calculator (CalcPTF). Version 3.0 / A.K. Guber, Ya.A. Pachepsky.
  – Environmental Microbial and Food Safety Laboratory Beltsville, Agricultural Research Center. USDA-ARS., 2010.
- 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.
- Hengl H. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning /
  T. Hengl [et al.] // PLOS ONE. 2017. V. 12. SoilGrids250m. № 2. P. e0169748.
- Hersbach H. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – T. 146. – № 730. – C. 1999-2049.
- Hoffmann H. Impact of Spatial Soil and Climate Input Data Aggregation on Regional Yield Simulations / H. Hoffmann [et al.] // PLOS ONE. – 2016. – V. 11. – № 4. – P. e0151782.

- Houghton J.T. Climate change 2001: the scientific basis. Climate change 2001 / J.T. Houghton; Intergouvernemental panel on climate change. – Cambridge: Cambridge univ. press, 2001.
- IGBP. Global Soil Data Task (IGBP-DIS, ISO-image of CD) / IGBP. PANGAEA, 2000.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC) Climate Change 2013 The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013 – The Physical Science Basis / ed. Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). – 1. – Cambridge University Press, 2014.
- 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 The Physical Science Basis / Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC).
   1. Cambridge University Press, 2023.
- Jabro J.D. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data / J.D. Jabro // ASAE Paper. – 1999. – V. 35. – № 2. – P. 557-560.
- Ji P. Do Lateral Flows Matter for the Hyperresolution Land Surface Modeling? / P. Ji, X. Yuan, X. Liang // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2017. – V. 122. – № 22.
- Johansen O. Thermal conductivity of soils : PhD Thesis / O. Johansen. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1977.
- JSC/CLIVAR Working Group. Report of the Tenth Session of the JSC/CLIVAR Working Group on Coupled Modelling / JSC/CLIVAR Working Group. – Victoria, BC, Canada: WGCM, 2006.
- 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.
- Kuhnert M. Impact analysis of climate data aggregation at different spatial scales on simulated net primary productivity for croplands / M. Kuhnert [et al.] // European Journal of Agronomy. – 2017. – V. 88. – P. 41-52.
- 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.
- Lehner B. New Global Hydrography Derived From Spaceborne Elevation Data / B. Lehner, K. Verdin, A. Jarvis // Eos, Transactions American Geophysical Union. – 2008. – V. 89. – № 10. – P. 93-94.
- Luo Y. Toward more realistic projections of soil carbon dynamics by Earth system models / Y. Luo [et al.] // Global Biogeochemical Cycles. – 2016. – V. 30. – № 1. – P. 40-56.
- Marthews T.R. High-resolution hydraulic parameter maps for surface soils in tropical South America / T.R. Marthews [et al.] // Geoscientific Model Development. – 2014. – V. 7. – № 3. – P. 711-723.
- Masson V. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models / V. Masson [et al.] // Journal of Climate. – 2003. – V. 16. – № 9. – P. 1261-1282.
- Mayr T. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks–Corey type model / T. Mayr, N.J. Jarvis // Geoderma. – 1999. – V. 91. – № 1-2. – P. 1-9.
- McBratney A.B. On digital soil mapping / A.B. McBratney, M.L. Mendonça Santos, B. Minasny // Geoderma. 2003. V. 117. № 1-2. P. 3-52.
- McCumber M.C. Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model: 1. Soil layer / M.C. McCumber, R.A. Pielke // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1981. – T. 86. – Simulation of the effects of

surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model. – № C10. – P. 9929-9938.

- Meehl G.A. Intercomparison makes for a better climate model / G.A. Meehl [et al.] // Eos, Transactions American Geophysical Union. – 1997. – V. 78. – № 41. – P. 445-451.
- Meehl G.A.THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research / G.A. Meehl [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2007. – T. 88. – THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset. – № 9. – P. 1383-1394.
- Montzka C. A global data set of soil hydraulic properties and sub-grid variability of soil water retention and hydraulic conductivity curves / C. Montzka [et al.]. Pedology, 2017.
- 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.
- Myneni R. MCD15A2H MODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index/FPAR 8-day L4 Global 500m SIN Grid V006 / R. Myneni, Y. Knyazikhin, T. Park. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2015.
- Nemes A. Influence of Organic Matter on the Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity / A. Nemes, W.J. Rawls, Y.A. Pachepsky // Soil Science Society of America Journal. – 2005. – V. 69. – № 4. – P. 1330-1337.
- Neuman S.P. Maximum likelihood Bayesian averaging of uncertain model predictions / S.P. Neuman // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment (SERRA). - 2003. – V. 17. – № 5. – P. 291-305.
- NOAA National Geophysical Data Center. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model
   / NOAA National Geophysical Data Center. NOAA National Centers for Environmental Information, 2009.
- Notz D. Arctic Sea Ice in CMIP6 / D. Notz, S. Community // Geophysical Research Letters. – 2020. – V. 47. – № 10. – P. e2019GL086749.
- O'Neill B.C. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways / B.C. O'Neill [et al.] // Climatic Change. 2014. –

T. 122. – A new scenario framework for climate change research. – No 3. – P. 387-400.

- Osterveld M. Empirical relations between laboratory determination of soil texture and moisture characteristic / M. Osterveld, C. Chang // CANADIAN AGRICULTURAL ENGINEERING. – 1980. – V. 22. – № 2. – P. 149-151.
- Ottoni M. V. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils / M.V. Ottoni [et al.] // Journal of Hydrology. 2019. V. 575. P. 1345-1358.
- Pachepsky Y. Development of pedotransfer functions in soil hydrology: Developments in soil science / Y. Pachepsky, W.J. Rawls. // Amsterdam New York: Elsevier, 2004. – 1st ed. – V. 30.
- Pierce L.L. The effects of aggregating sub-grid land surface variation on large-scale estimates of net primary production / L.L. Pierce, S.W. Running // Landscape Ecology. – 1995. – V. 10. – № 4. – P. 239-253.
- Prihodko L. Sensitivity, uncertainty and time dependence of parameters in a complex land surface model / L. Prihodko [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology. – 2008. – V. 148. – № 2. – P. 268-287.
- Rastetter E.B. Aggregating Fine-Scale Ecological Knowledge to Model Coarser-Scale Attributes of Ecosystems / E.B. Rastetter [et al.] // Ecological Applications. – 1992. – V. 2. – № 1. – P. 55-70.
- Rew R. NetCDF: an interface for scientific data access / R. Rew, G. Davis // IEEE Computer Graphics and Applications. – 1990. – V. 10. – NetCDF. – № 4. – P. 76-82.
- Sanchez P.A. Digital Soil Map of the World / P.A. Sanchez [et al.] // Science. 2009. V. 325. № 5941. P. 680-681.
- Saxton K.E. Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture / K.E. Saxton [et al.] // Soil Science Society of America Journal. – 1986. – V. 50. – № 4. – P. 1031-1036.

- Saxton K.E. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions / K.E. Saxton, W.J. Rawls // Soil Science Society of America Journal. – 2006. – V. 70. – № 5. – P. 1569-1578.
- Schaap M.G. A Modified Mualem–van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation / M.G. Schaap, M.Th. Van Genuchten // Vadose Zone Journal. – 2006. – V. 5. – № 1. – P. 27-34.
- 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. – T. 251. – № 3-4. – P. 163-176.
- Shangguan W. A global soil data set for earth system modeling / W. Shangguan [et al.] // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2014. V.6.–№1.–P.249-263.
- Shangguan W. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China / W. Shangguan [et al.] // Geoderma.–2012.–V.171.–P.85-91.
- 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.
- Shwetha P. Pedotransfer Functions for the Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity for Some Indian Sandy Soils / P. Shwetha, K. Prasanna // Eurasian Soil Science. – 2018. – V. 51. – № 9. – P. 1042-1049.
- Singh R.S. Toward hyper-resolution land-surface modeling: The effects of fine-scale topography and soil texture on CLM 4.0 simulations over the Southwestern U.S. / R.S. Singh [et al.] // Water Resources Research. -2015.-V.51.-№4. -P. 2648-2667.
- Skamarock W.C. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4 / W.C. Skamarock [et al.]. UCAR/NCAR, 2019.

Soet M. Functional behaviour of pedotransfer functions in soil water flow simulation / M. Soet, J.N.M. Stricker // Hydrological Processes. – 03.–17. – № 8.–P. 1659-1670.

- Soil Science Division Staff. Soil survey manual / Soil Science Division Staff. Washington: United States Department of Agriculture, 2018.
- 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.  $-N_{2} 6. - P. 363-377.$ 

- 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. – № 1-2. – P. 209-222.
- Taylor K.E. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design / K.E. Taylor, R.J. Stouffer, G.A. Meehl // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2012. – V. 93. – № 4. – P. 485-498.
- Tomasella J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of brazilian soils using soilwater retention data. / J. Tomasella, M.G. Hodnett // Soil Science. – 1997. – V. 162. – № 10. – P. 703-712.
- Tóth B. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe / B. Tóth [et al.] // European Journal of Soil Science. – 2015. – V. 66. – № 1. – P. 226-238.
- Touzé-Peiffer L. The Coupled Model Intercomparison Project: History, uses, and structural effects on climate research / L. Touzé-Peiffer, A. Barberousse, H. Le Treut // WIREs Climate Change. – 2020. – V. 11. – № 4. – P. e648.
- 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.
- Van Looy K. Pedotransfer Functions in Earth System Science: Challenges and Perspectives / K. Van Looy [et al.] // Reviews of Geophysics. – 2017. – T. 55. – № 4. – P. 1199-1256.
- Van Vuuren D.P. The representative concentration pathways: an overview / D.P. Van Vuuren [et al.] // Climatic Change. 2011. V. 109. № 1-2. P. 5-31.

Voldoire A. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation / A. Voldoire [et al.] // Climate Dynamics. – 2013.–V. 40. – 9-10. – P.2091-2121.

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. P. 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.
- Williams J. Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure, and organic matter / J. Williams, P. Ross, K. Bristow // Proc. Int. Workshop on Indirect methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. – Riverside: Univ. California, 1992. – P. 427-442.
- 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.
- Wösten J.H.M. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils / J.H.M. Wösten [et al.] // Geoderma. 1999. V. 90. № 3-4. P. 169-185.
- Wösten J.H.M. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics / J.H.M. Wösten, Ya.A. Pachepsky, W.J. Rawls // Journal of Hydrology. 2001. V. 251. № 3-4. P. 123-150.

Zanaga D. ESA WorldCover 10 m 2020 v100 / D. Zanaga [et al.]. – Zenodo, 2021.

- Zhang Y. A High-Resolution Global Map of Soil Hydraulic Properties Produced by a Hierarchical Parameterization of a Physically Based Water Retention Model / Y. Zhang, M.G. Schaap, Y. Zha // Water Resources Research. 2018. V. 54. № 12. P. 9774-9790.
- Zhang Y. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review / Y. Zhang, M.G. Schaap // Journal of Hydrology. – 2019. – V. 575. – P. 1011-1030.
- Zhang Y. Hierarchical Multimodel Ensemble Estimates of Soil Water Retention with Global Coverage / Y. Zhang, M.G. Schaap, Z. Wei // Geophysical Research Letters. - 2020. - V. 47. - № 15. - P. e2020GL088819.
- 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.

## Благодарности

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

Также выражаю искреннею 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 лаборатории ЛКЭИ в ИМКЭС СО РАН, Гордову Евгению Петровичу, за его большой вклад в мое развитие как специалиста.

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).