



doi 10.26089/NumMet.2024s02

УДК 519.688

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

А. А. Рязанова

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Томск, Российская Федерация
Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН,
Москва, Российская Федерация
ORCID: 0000-0001-6623-2494, e-mail: raa@scert.ru

В. Ю. Богомолов

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Томск, Российская Федерация
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр,
Москва, Российская Федерация
Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН,
Москва, Российская Федерация
ORCID: 0000-0003-3491-2086, e-mail: verminrus@mail.ru

В. М. Степаненко

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр,
Москва, Российская Федерация
ORCID: 0000-0003-3033-6712, e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

М. И. Варенцов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр,
Москва, Российская Федерация
ORCID: 0000-0001-9095-5334, e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

А. И. Медведев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр,
Москва, Российская Федерация
ORCID: 0009-0001-2045-5446, e-mail: medvedev_ai@geogr.msu.ru

Аннотация: Для моделей деятельного слоя суши и Земной системы предусмотрено использование различных внешних данных о параметрах подстилающей поверхности. Эти параметры служат коэффициентами дифференциальных уравнений переноса и трансформации тепла, влаги и категорий углерода в деятельном слое. Современные наборы таких параметров содержатся в архивах геопространственных данных высокого разрешения (например, 30'') и для использования их в модели необходимо агрегирование на более крупную сетку и согласование параметров из различных архивов. Для решения этой задачи было разработано специальное программное обеспечение. Такой инструмент дает возможность создания архивов данных о параметрах поверхности суши на произвольной равномерной широтно-долготной сетке.

Ключевые слова: геопространственные данные, агрегирование данных, математическое моделирование, погода и климат.



Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 22–47–04408, разработка алгоритмов для проекции почвенных данных, имеющих вертикальное разрешение) в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН 121031300158–9 (анализ свойств почвенных характеристик для выбора метода агрегирования)

Для цитирования: Рязанова А.А., Богомолов В.Ю., Степаненко В.М., Варенцов М.И., Медведев А.И. TerMPS: программное обеспечение для подготовки данных о параметрах поверхности суши, используемых в моделях деятельного слоя суши и моделях Земной системы // Вычислительные методы и программирование. 2024. Специальный выпуск. 11–29. doi 10.26089/NumMet.2024s02.

TerMPS: software for preparing land surface parameter data used in land surface models and Earth system models

Anna A. Ryazanova

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS, Tomsk, Russia
Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0001-6623-2494, e-mail: raa@scert.ru

Vasiliy Yu. Bogomolov

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS, Tomsk, Russia
Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia
Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0003-3491-2086, e-mail: verminrus@mail.ru

Victor M. Stepanenko

Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0003-3033-6712, e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

Mikhail I. Varentsov

Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0001-9095-5334, e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

Aleksandr I. Medvedev

Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia
ORCID: 0009-0001-2045-5446, e-mail: medvedev_ai@geogr.msu.ru

Abstract: The land surface and the Earth system models provide for the use of various external data on the parameters of the underlying surface. These parameters serve as coefficients of differential equations for the transfer and transformation of heat, moisture and carbon categories in the surface layer. Modern sets of such parameters are contained in high-resolution geospatial data archives (e.g., 30'') and their use in the model requires aggregation onto a larger grid and coordination of parameters from different archives. Special software was developed to solve this problem. Such a tool makes it possible to create archives of land surface parameters on an arbitrary uniform latitude-longitude grid.

Keywords: geospatial data, data aggregation, mathematical modeling, weather and climate.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation (project 22–47–04408, development of algorithms for projection of soil data with vertical resolution) and carried out under the Governmental Order to IMCES SB RAS (121031300158–9, analysis of soil characteristics properties for selection of aggregation method)

For citation: A. A. Ryazanova, V. Yu. Bogomolov, V. M. Stepanenko, M. I. Varentsov, and A. I. Medvedev, "TerMPS: software for preparing land surface parameter data used in land surface models and Earth system models," Numerical Methods and Programming. 2024. Special Issue. 11–29. doi 10.26089/NumMet.2024s02.



1. Введение. Одним из основных инструментов для воспроизведения и прогнозирования климата являются модели Земной системы (МЗС) [1]. МЗС состоят из нескольких связанных между собой блоков, описывающих компоненты климатической системы Земли: блок общей циркуляции атмосферы, блок общей циркуляции океана (с морским льдом), блок деятельного слоя суши (ДСС) [2] и т.д. Основу каждой из компонент составляют алгоритмы решения дискретизированных дифференциальных уравнений, вытекающих из фундаментальных законов сохранения импульса, тепла, влаги и примесей; в систему этих уравнений входит набор параметров, отражающих свойства системы. Особенно это касается блока ДСС, в котором физические и биогеохимические процессы в наибольшей степени параметризованы по причине невозможности явного описания процессов в топологически сложной и многомасштабной структуре почвы и растительности.

В блоке моделирования ДСС предусмотрено использование различных внешних данных о параметрах поверхности, таких как почвенные характеристики (гранулометрический состав, гидро- и теплофизические характеристики), площади типов земельного покрова, включая водоемы и урбанизированные поверхности, параметры растительности (индекс листовой площади), параметры водоемов (средняя глубина, гипсометрическая кривая), параметры городской застройки (геометрические и теплофизические параметры), направление и аккумуляция речного потока, параметры рельефа (средняя высота, дисперсия) и т.д. Современные наборы таких параметров представляют собой отдельные для каждой группы параметров архивы геопространственных данных с высоким разрешением (например, 30''). Возможное горизонтальное разрешение моделей ДСС в зависимости от целей и задач исследователей может варьироваться в различных пределах. Таким образом, для использования этих наборов параметров в модели необходима предварительная подготовка — согласование горизонтального и вертикального (при наличии) разрешения полей параметров с пространственным разрешением целевой сетки модели. Например, в МЗС Community Earth System Model (CESM2) [3], которая включает в себя модель поверхности Community Land Model (CLM) [4], подготовка данных осуществляется через пакет CLM Tools, состоящий из отдельных программ на языке Fortran и NCL скриптов. Для агрегирования используются методы из ESMF regridding program. Для платформы SURFEX [5] используется база данных о параметрах поверхности ECOLIMAP [6]. В зависимости от выбранной схемы моделирования поверхности дополнительно рассчитывают некоторые физико-географические поля. У крупных моделей прогноза погоды также существуют системы подготовки данных. Например, у модели WRF (Weather Research and Forecasting) [7], численной модели прогноза погоды, существует система WPS (WRF Preprocessing System), которая состоит из набора программ на языках C и Fortran. Для подготовки внешних параметров для модели прогноза погоды COSMO [8] используется система EXTPAR [9], состоящая из 12 автономных программ, написанных на языках Fortran и Python с использованием методов из CDO. Если же рассматривать модель ДСС ИВМ РАН–МГУ (TerM) [10], во многом совпадающую и повторяющую блок ДСС МЗС ИВМ РАН (INMCM) [11], то для нее, также как и для блока ДСС модели климата, отечественного программного обеспечения, позволяющего решить задачу агрегирования данных о параметрах поверхности на нужную для модели сетку, не существует. В связи с этим представляется необходимым создание такого типа программного обеспечения.

2. Данные и методы.

2.1. Агрегирование данных на горизонтальную широтно-долготную сетку. Перечисленные выше параметры поверхности суши можно разделить на три группы:

- 1) данные, содержащие количественные значения: физические характеристики (гранулометрический состав, гидрофизические характеристики почвы, площади типов земельного покрова, площадь водоемов, высота городской застройки и т.д.);
- 2) данные, содержащие качественные значения: категориальные данные, содержащие тот или иной качественный признак (типы земного покрова и т.д.);
- 3) данные, содержащие информацию о направлении и водосборных площадях речного покрова.

В работе рассматриваются только первые два типа данных и равномерные широтно-долготные сетки. 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 [12] 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 программного кода среднее взвешенное реализовано как среднее арифметическое взвешенное (наиболее распространенный в литературе подход). Агрегирование выполняется по следующей формуле:

$$f_{out,i} = \frac{1}{\mu(S_i)} \int_{S_i} f dS = \frac{\sum_{\Omega_j \in S_i} f_{in,j} \mu(\Omega_j)}{\sum_{\Omega_j \in S_i} \mu(\Omega_j)}, \quad (1)$$

где $f_{in,j}$ — значение количественного параметра в ячейке исходной (мелкой) сетки Ω_j , $\mu(\dots)$ — мера (площадь) ячейки, S_i — ячейка целевой сетки, $f_{out,i}$ — агрегированное по этой сетке значение параметра f . Считается, что $\mu(S_i) = \sum_{\Omega_j \in S_i} \mu(\Omega_j)$, т.е. каждая ячейка целевой сетки есть объединение некоторого множества ячеек исходной сетки. Формулу (1) можно трактовать как математическое ожидание величины f , где плотность вероятности f определяется мерой (площадью) ячеек исходного разрешения с соответствующими значениями f . Для прямоугольной ячейки на сфере:

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

где R — радиус Земли. На рис. 1 схематически приведен пример процесса агрегирования исходных данных по формуле (1).

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 высотах рельефа) по следующей формуле:

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

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)

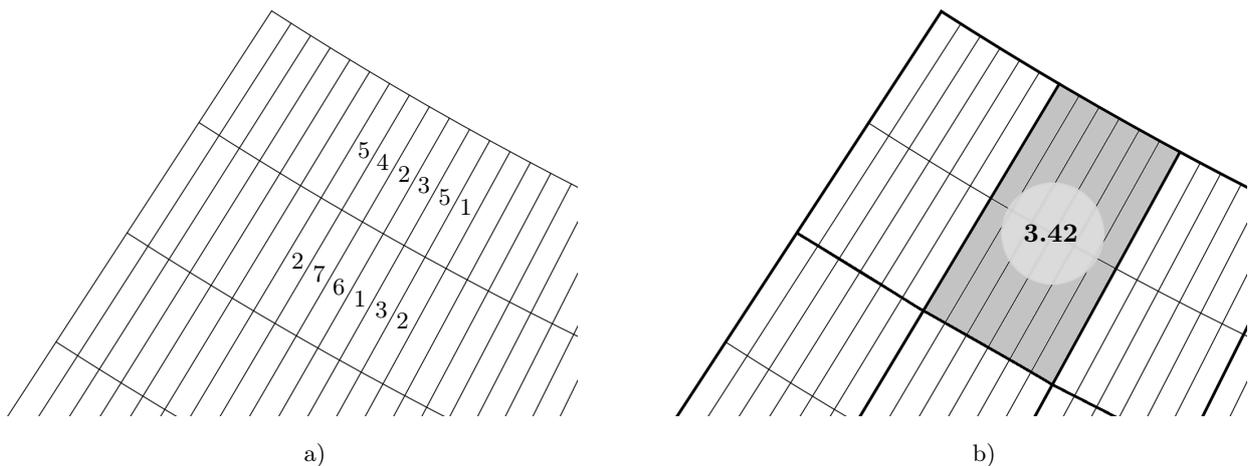


Рис. 1. Агрегирование количественных данных по формуле (1): а) представление исходной сетки со значениями f_{in} количественного параметра; б) исходная (тонкие границы) и целевая (жирные границы) сетки с указанием агрегированного значения f_{out} количественного параметра в ячейке целевой сетки

Fig. 1. Aggregation of quantitative data using a formula (1): a) representation of the original grid with values f_{in} of the quantitative parameter; b) source (thin borders) and target (thick borders) grids with the aggregated value f_{out} of the quantitative parameter in the target grid cell



в ячейке целевого пространственного разрешения. Вычисление проводится по следующей формуле:

$$g_{\text{out},i}^k = \frac{\mu(S_i^k)}{\mu(S_i)} = \frac{\sum_{\substack{\Omega_j \in S_i, \\ g_{\text{in}}^k(\Omega_j)=1}} \mu(\Omega_j)}{\sum_{\Omega_j \in S_i} \mu(\Omega_j)}, \quad (2)$$

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 рис. 2 приведен пример агрегирования категориальных данных. В этом примере в исходных данных в целевой ячейке присутствуют 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.

2.2. Проекция данных, имеющих вертикальное измерение, на произвольную неравномерную вертикальную сетку. Кроме широтного и долготного измерений исходные данные могут иметь также 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 Δz_i и границы, уровнем же будем называть центр этого интервала. Каждому слою соответствует один уровень и наоборот. Расчет толщин слоев при известных значениях границ выполняется по следующим формулам:

$$\Delta z_i = \frac{z_{i+1/2} - z_{i-1/2}}{2}, \quad i = \overline{2, N-1}; \quad \Delta z_1 = \frac{z_{3/2} - z_1}{2}, \quad \Delta z_N = \frac{z_N - z_{N-1/2}}{2},$$

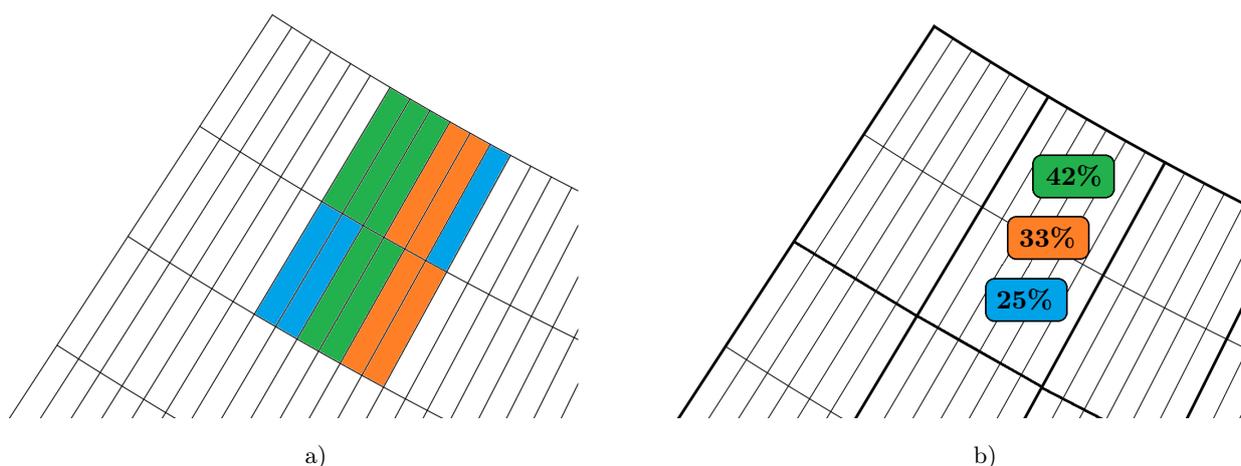


Рис. 2. Агрегирование категориальных данных по формуле (2): а) исходная сетка с выделением цветом категориального признака исходных данных; б) исходная (тонкие границы) и целевая (жирные границы) сетки с указанием агрегированного значения долей категориальной характеристики в ячейке целевой сетки

Fig. 2. Aggregation of categorical data using a formula (2): a) original grid with color highlighting of categorical feature of original data; b) source (thin borders) and target (thick borders) grids indicating the aggregated value of the shares of the categorical characteristic in the target grid cell

где $z_{i+1/2}$ — глубина уровня, разделяющего i -й и $(i+1)$ -й слои, $i = \overline{1, N-1}$, Δz_i — толщина i -го слоя, N — количество слоев. Зная уровень и толщину каждого слоя, можно получить значения границ для каждого слоя. Определенная таким образом сетка соответствует схеме конечно-разностной дискретизации уравнений тепло-влажноперевода модели ДСС ИВМ РАН–МГУ: на границах слоев определяются потоки тепла, жидкой влаги и водяного пара, а на глубинах $z_{i+1} = z_i + \Delta z_{i+1/2}$ — температура, влажность, лед 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 (1), только в качестве весов используются толщины слоев. 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 $z_{in,j} \geq z_{out,i}$, то $f_{out,i} = f_{in,j}$ (вариант 1, рис. 3 а),

2) если $z_{in,j} < z_{out,i}$, то

а) если $z_{in,j} \in [z_{out,i-1}, z_{out,i}]$, $z_{in,j+1} \notin [z_{out,i-1}, z_{out,i}]$, то

$$k_1 = z_{in,j} - z_{out,i-1}, \quad k_2 = z_{out,i} - z_{in,j},$$

$$f_{out,i} = \frac{k_1 f_{in,j} + k_2 f_{in,j+1}}{k_1 + k_2} \text{ (вариант 2а, рис. 3 б),}$$

б) если $z_{in,j} \in [z_{out,i-1}, z_{out,i}]$, $z_{in,j+1} \in [z_{out,i-1}, z_{out,i}]$, то

$$k_1 = z_{in,j} - z_{out,i-1}, \quad k_2 = z_{out,i} - z_{in,j+1},$$

$$f_{out,i} = \frac{k_1 f_{in,j} + \Delta z_{in,j+1} f_{in,j+1} + k_2 f_{in,j+2}}{k_1 + \Delta z_{in,j+1} + k_2} \text{ (вариант 2б, рис. 3 в).}$$

Для получения среднего значения характеристики для всего профиля выполняется расчет обычного среднего арифметического взвешенного по формуле (1), где в качестве весов используются толщины слоев.

3. Алгоритмы и программная реализация. В ходе разработки программного обеспечения были сформулированы следующие требования к входным данным:

- 1) формат входных файлов — netCDF [13];
- 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 ДСС);
- 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), причем это должно быть отражено в netCDF посредством установки идентификаторов отсутствия значений missing value или fill value.

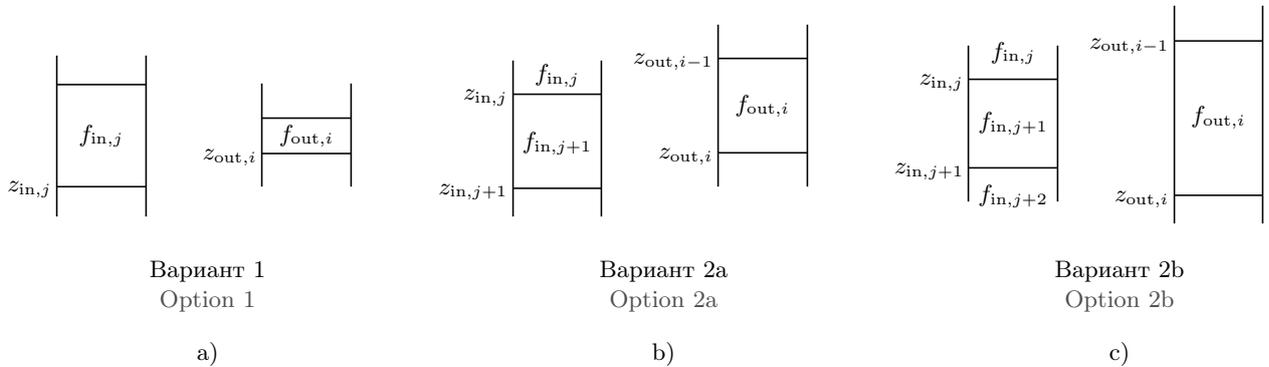


Рис. 3. Варианты согласования характеристик с одной вертикальной сетки на другую с учетом толщины каждого слоя

Fig. 3. Options for matching characteristics from one vertical grid to another, taking into account the thickness of each layer



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 функций, для выполнения процесса агрегирования. Язык программной реализации — Python, все базовые функции объединены в один *py*-модуль, а затем в *py*-пакет TerMPS. Установка пакета происходит стандартным образом, например, через команду `pip install TerMPS`. Такой подход является модульным и обеспечивает гибкость ПО при дальнейшем его развитии. На рис. 4 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).

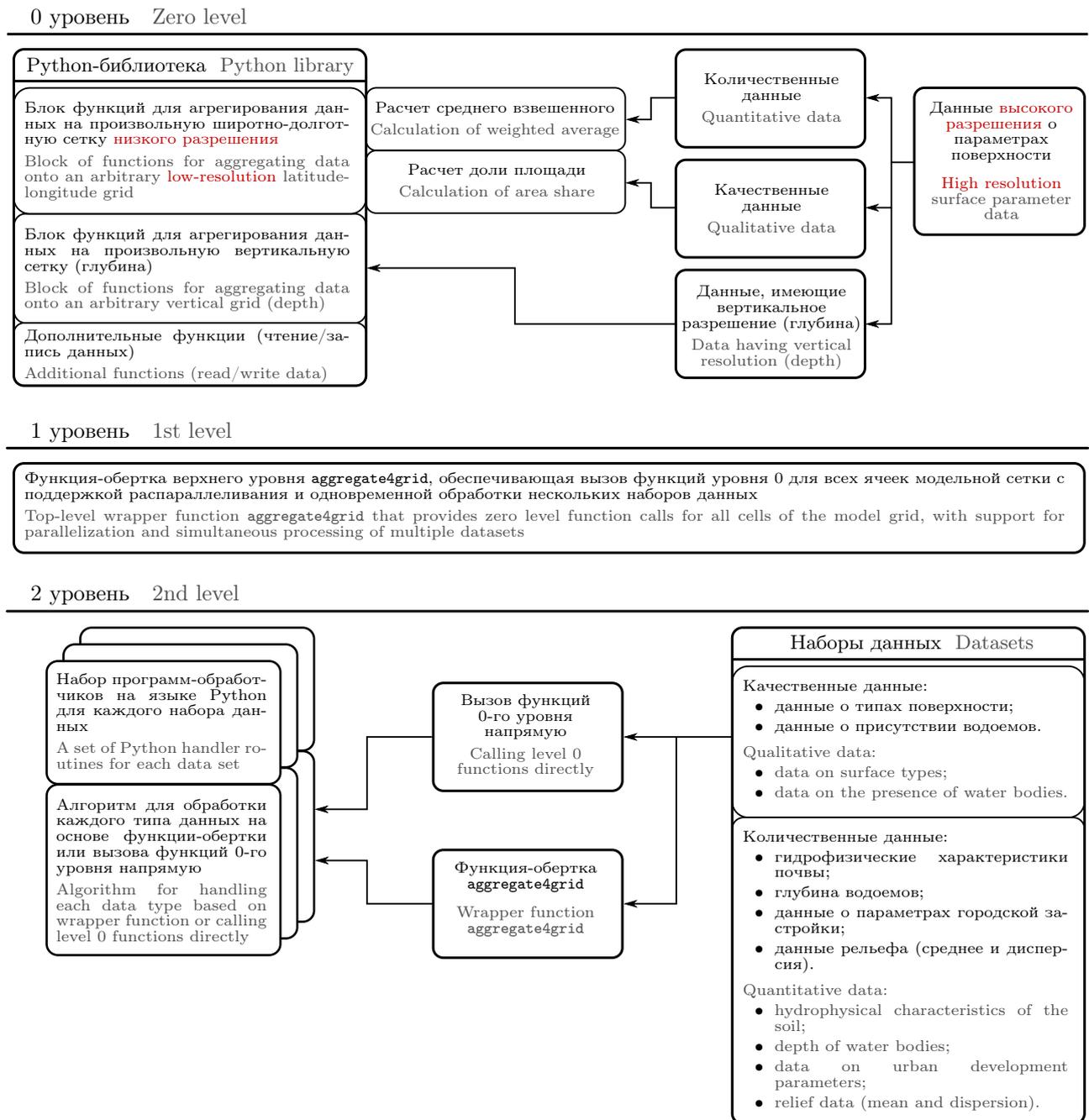


Рис. 4. Концепция ПО для агрегирования данных о параметрах поверхности для модели ДСС TerM

Fig. 4. Software concept for aggregating surface parameter data for the LSM TerM

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.

1. 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 как ячейки исходной сетки, полностью попавшие в ячейку целевой сетки, так и части исходных ячеек, попавшие 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 ячейки целевой сетки не попадает на границы ячеек исходной сетки (1 вариант, рис. 5 а); какая-либо одна из 4-х границ ячейки целевой сетки попадает на границы ячеек исходной сетки (4 варианта, рис. 5 б); какие-либо две из 4-х границ ячейки целевой сетки попадают на границы ячеек исходной сетки (6 вариантов, рис. 5 в); какие-либо три из 4-х границ ячейки целевой сетки попадают на границы ячеек исходной сетки (4 варианта, рис. 5 д) и все границы ячейки целевой сетки попадают на границы ячеек исходной сетки (1 вариант, рис. 5 е).

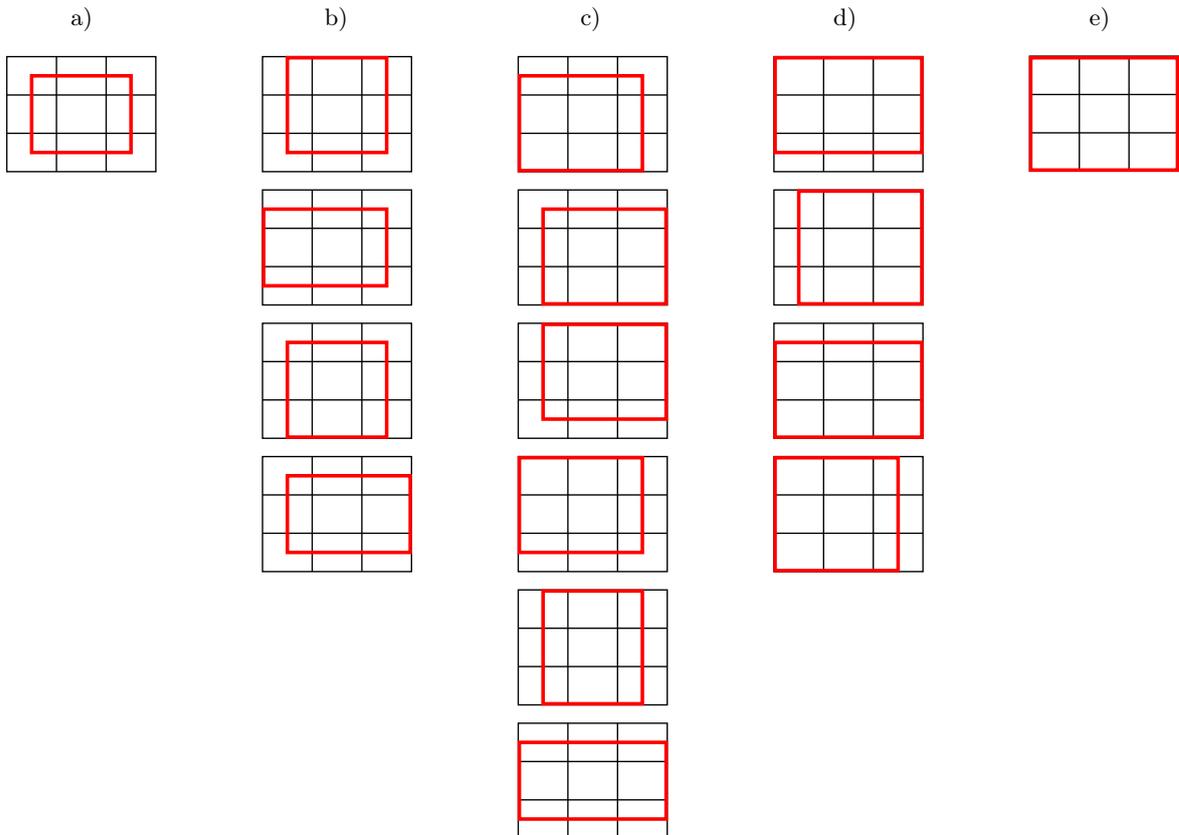


Рис. 5. Возможные варианты перекрытия ячеек исходной сетки (черные границы) ячейкой целевой сетки (красные границы)

Fig. 5. Possible variants of overlapping of source grid cells (black borders) by target grid cell (red borders)



Для определения применимости усложненного варианта алгоритма (полной версии) было проведено два расчета. В первом расчете в качестве исходного пространственного разрешения было выбрано пространственное разрешение $30 \times 30''$. Такое разрешение характерно для исходных данных о параметрах поверхности с высоким пространственным разрешением. В качестве разрешения целевой сетки было выбрано $0.5 \times 0.5^\circ$, что соответствует пространственному разрешению глобальных и региональных моделей. Пространственное разрешение целевой сетки и исходной отличается примерно в 60 раз. Исходная сетка сдвинута относительно целевой на 0.001° . 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^2 .

Во втором расчете в качестве исходного пространственного разрешения было выбрано разрешение $0.5 \times 0.5^\circ$, а в качестве целевого — $2.25 \times 2.25^\circ$. Разрешение подбиралось таким образом, чтобы исходное было близко к целевому и при этом сетки не были вложенными. Так же 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^2 .

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

3.2. Блок проекции данных, имеющих вертикальное измерение, на целевую вертикальную сетку. Перечислим базовые функции, входящие в *ru*-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`.

Эти функции позволяют записывать полученные данные в формат `netCDF` с указанием различных метаданных, предусмотренных в формате `netCDF` (например, единиц измерения, полного наименования характеристики и других).

3.3. Верхнеуровневая функция агрегирования с поддержкой распараллеливания. Для упрощения работы с различными наборами данных в рамках пакета `TerMPS` реализована функция-обертка верхнего уровня `aggregate4grid`, обеспечивающая последовательный вызов отдельных функций агрегирования базового уровня для всех ячеек целевой расчетной сетки. Применяемая для каждой ячейки функция агрегирования задается как аргумент функции `aggregate4grid`. При этом для ускорения работы реализована поддержка распараллеливания средствами пакета `multiprocessing` языка Python, а также и одновременная обработка двух и более наборов данных высокого разрешения. Архитектура функции-обертки также позволяет реализовать опциональную возможность применения для каждой ячейки расчетной сетки алгоритмов дополнительной обработки пространственных данных высокого разрешения до выполнения процедуры агрегирования. Такая возможность может быть полезна, например, при согласовании данных высокого разрешения. Эта возможность может быть реализована за счет добавления в состав аргументов функции `aggregate4grid` функции-трансформера, которая будет вызываться для каждой ячейки расчетной сетки после загрузки данных высокого разрешения и до вызова процедуры их агрегирования.

3.4. Программная реализация. Для того чтобы воспользоваться базовыми функциями из *ru*-пакета, на языке Python созданы программы-обработчики (программные скрипты). Каждая программа-обработчик отвечает за агрегирование только одного параметра модели ДСС. Для удобства использования 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, по которым будет записываться полученный результат (выходные файлы для модели ДСС). Схема агрегирования данных на широтно-долготную сетку представлена на рис. 6. Схема проекции сеточной функции исходной вертикальной сетки на произвольную целевую сетку показана на рис. 7.

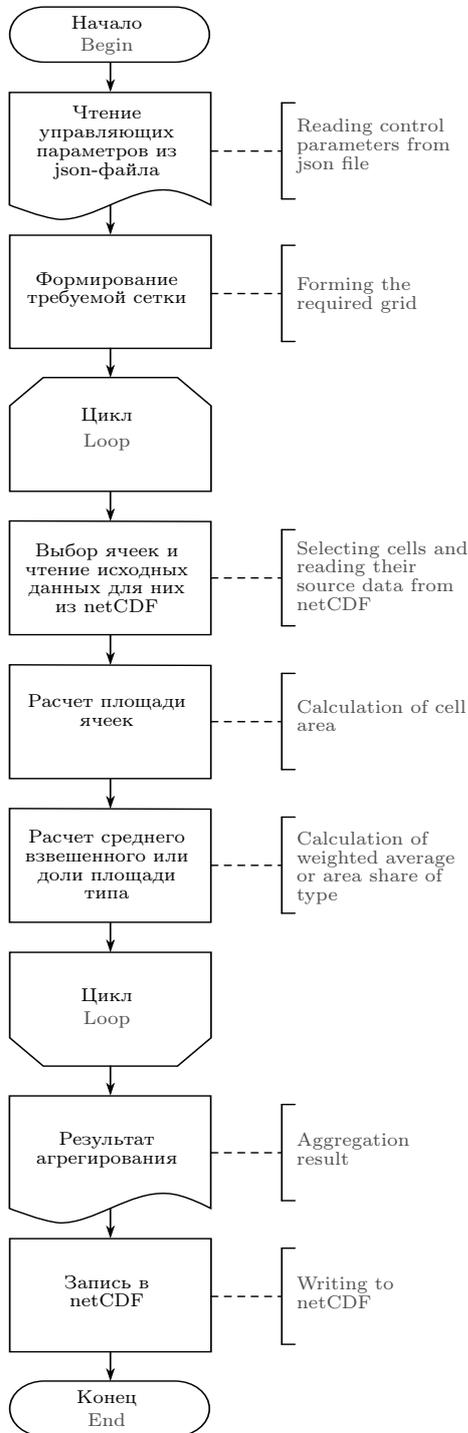


Рис. 6. Схема агрегирования данных на целевую широтно-долготную сетку

Fig. 6. Flowchart of the data aggregation algorithm onto a target latitude-longitude grid

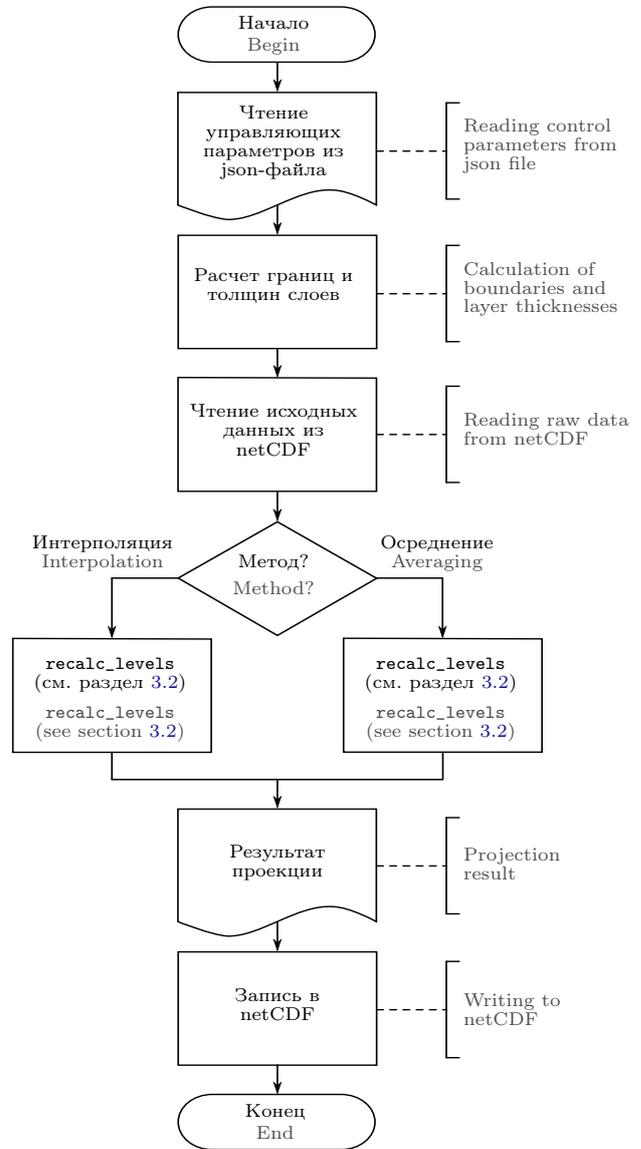


Рис. 7. Схема проекции сеточной функции исходной вертикальной сетки на целевую сетку

Fig. 7. Flowchart of the projection function of the original vertical grid onto the target grid



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.

4. Примеры выходных данных. В табл. 1 представлены исходные архивы данных о параметрах поверхности высокого пространственного разрешения для использования в модели ДСС TerM.

Эти архивы 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 [14]. Тестирование блока агрегирования качественных данных проводилось на данных из GLCCv2 [15].

Данные в архиве почвенных характеристик представлены в виде netCDF-файлов с пространственным разрешением $30 \times 30''$ 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 этом наборе представлены следующие характеристики почвы: объемные доли песка, ила, глины, гравия, пористость, гидрофизические характеристики для параметризаций Клаппа–Хорнбергера [25] и Муалема–Ван Генухтена [26, 27]. Объемные доли песка, ила, глины, гравия, пористость в сумме дают единицу.

В качестве параметров целевой сетки было выбрано пространственное разрешение $0.5 \times 0.5^\circ$. Следует отметить, что шаг исходной сетки не кратен шагу целевой ($30'' \sim 0.0083351135^\circ$ в этом наборе данных) и

Таблица 1. Архивы данных о параметрах поверхности, используемые в модели ДСС TerM или планируемые к использованию при подключении перспективных параметризаций
 Table 1. Archives of data on surface parameters used in the LSM TerM or planned for use when connecting prospective parameterizations

Название набора данных Dataset name	Переменные Variables	Пространственное разрешение Spatial resolution
Глобальная база почвенных характеристик [14] Global SoilCharacteristics Database [14]	Параметры гранулометрического состава, теплофизические и гидрофизические характеристики почвы Parameters of granulometric composition, thermal and hydrophysical characteristics of the soil	$0.30 \times 0.30''$
GLCC [15], карта земного покрова ИКИ РАН [16] IKI RAS land cover map [16], GLDB [17], World Cover [18], Copernicus Global Land Cover [19]	Типы земельного покрова, водоемы, урбанизированная поверхность Land cover types, water bodies, urbanized surface	$0.30 \times 0.30''$
Global LCZ Map [20]	Геометрические и теплофизические параметры городской застройки Geometrical and thermophysical parameters of urban development	100 м 100 m
MODIS [21]	Параметры растительности (например, листовой индекс) Vegetation parameters (e.g. leaf index)	500 м 500 m
GLDB, ISIMIP3 Lake Sector [22], HydroSHEDS [23]	Параметры водоемов (средняя глубина), гипсометрическая кривая, направления речного стока, уклоны русел Parameters of water bodies (average depth), hypsometric curve, river flow directions, channel slopes	$0.30 \times 0.30''$
ETOPO1 [24]	Параметры рельефа Relief parameters	$1 \times 1'$

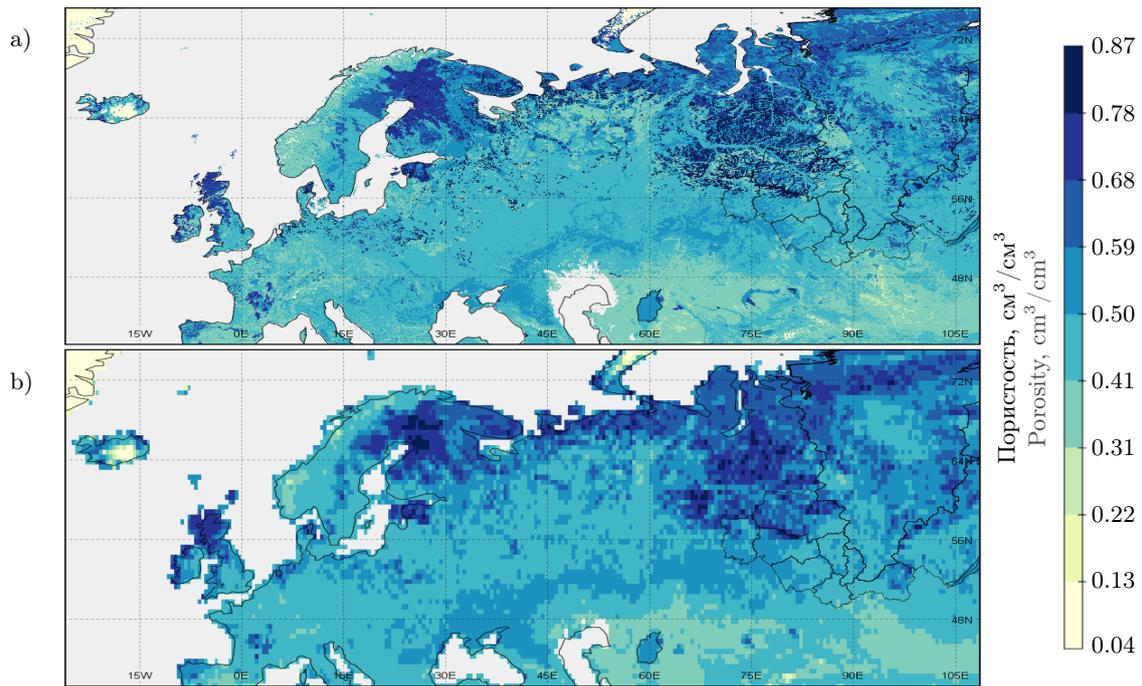


Рис. 8. Пространственное распределение пористости по данным глобальной базы почвенных характеристик для первого слоя 0–0.0451 м: а) исходные данные с пространственным разрешением 30''; б) агрегированные данные на сетку с разрешением 0.5 × 0.5°

Fig. 8. Spatial distribution of sand volume fraction according to soil database data for the first level 0–0.0451 m: а) raw data with spatial resolution 30''; б) aggregated data onto a grid with a resolution of 0.5 × 0.5°

их соответствующие узлы сдвинуты на 0.001°. Целевая вертикальная сетка задавалась следующим набором уровней: 0.00, 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 архив почвенных характеристик для пространственного разрешения 0.5 × 0.5°. Результат агрегирования представлен на рис. 8.

Соотношения 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 объемного содержания песка на новой вертикальной сетке представлен на рис. 9 для одной точки пространства, соответствующей полигону Бакчар (57° с.ш., 82° в.д.). Здесь видно, что структура исходного профиля сохраняется и профиль характеристики не нарушается.

Распределение типов поверхности 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 — 30 × 30''. В качестве параметров целевой



Рис. 9. Распределение объемного содержания песка по глубине для одной точки (полигон Бакчар)
 Fig. 9. Distribution of sand volume content by depth for one point (Bakchar polygon)

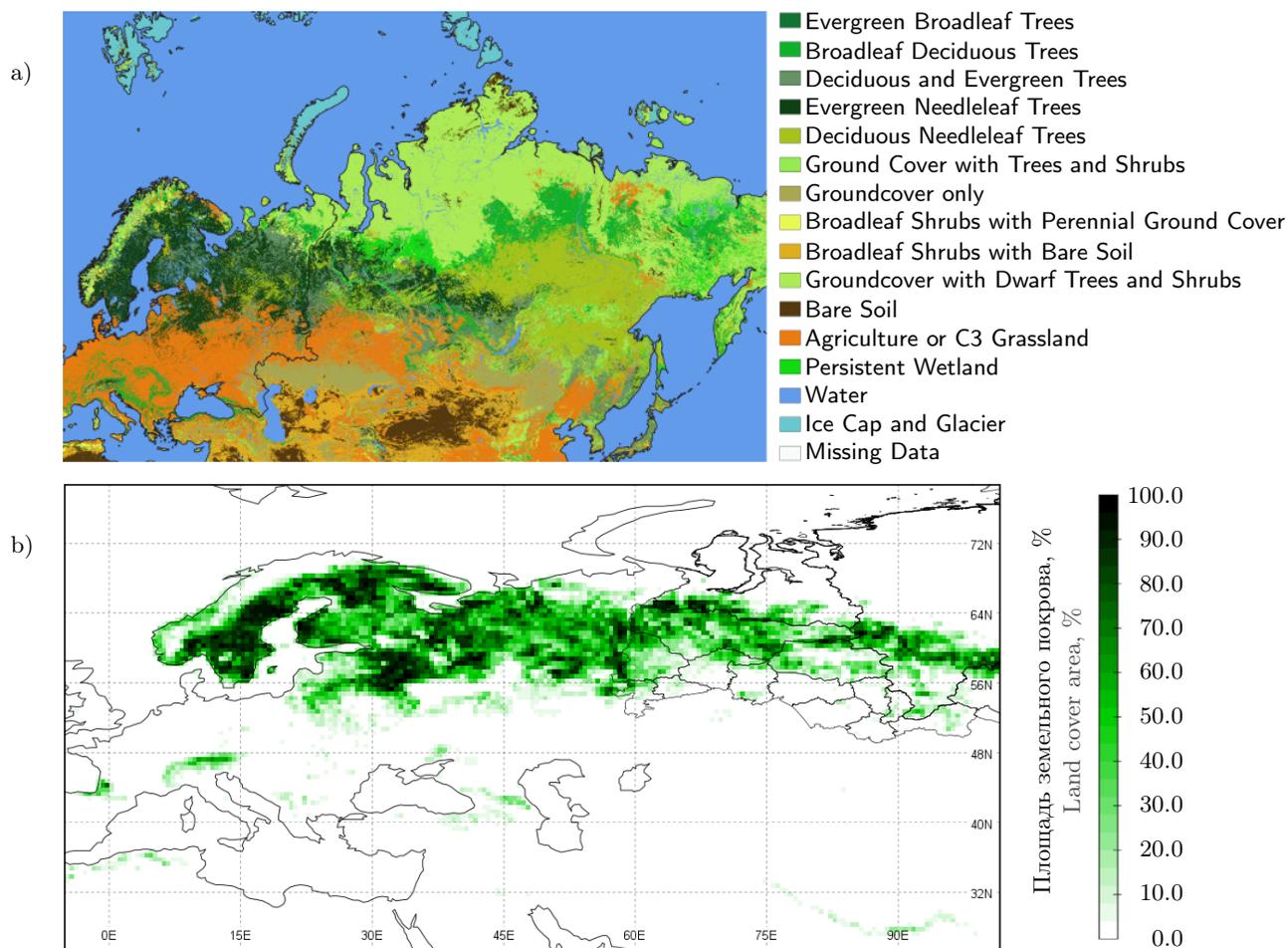


Рис. 10. Пространственное распределение типов растительного покрова по данным GLCCv2: а) исходные данные с пространственным разрешением 30"; б) агрегированные данные на сетку с разрешением $0.5 \times 0.5^\circ$

Fig. 10. Spatial distribution of land cover types according to GLCCv2 data: a) raw data with spatial resolution 30"; b) aggregated data onto a grid with a resolution of $0.5 \times 0.5^\circ$

сетки также было выбрано пространственное разрешение $0.5 \times 0.5^\circ$. Исходная и целевая сетки также сдвинуты $\sim 0.001^\circ$.

На рис. 10 представлены исходная карта GLCCv2 в классификации SiB2 и агрегированные данные на сетку $0.5 \times 0.5^\circ$. При агрегировании качественных данных необходимо вычислить долю площади каждого типа в заданной ячейке. В качестве иллюстрации приведено распределение доли площади вечнозеленых хвойных лесов.

Здесь приводятся результаты тестирования ПО для пространственных данных, необходимых для обеспечения входными параметрами перспективной параметризации урбанизированной поверхности [28, 29]. Среди множества параметров, необходимых для описания городской среды, ключевыми являются доля площади, занимаемая городским типом поверхности, и геометрические характеристики застройки. Выполнено тестирование разработанного ПО с двумя источниками данных, релевантных для определения таких параметров. Первый источник — доля площади городского типа поверхности из базы данных о типах земельного покрова Copernicus Global Land Cover (CGLC) [19]. Второй источник — глобальная карта локальных климатических зон [20].

На рис. 11 показаны фрагменты исходных данных для территории Московского мегаполиса и пример их агрегирования на сетку $0.5 \times 0.5^\circ$ для территории Европы, а именно доля площади городского типа поверхности в площади ячеек сетки и преобладающий в каждой ячейке тип локальной климатической зоны.

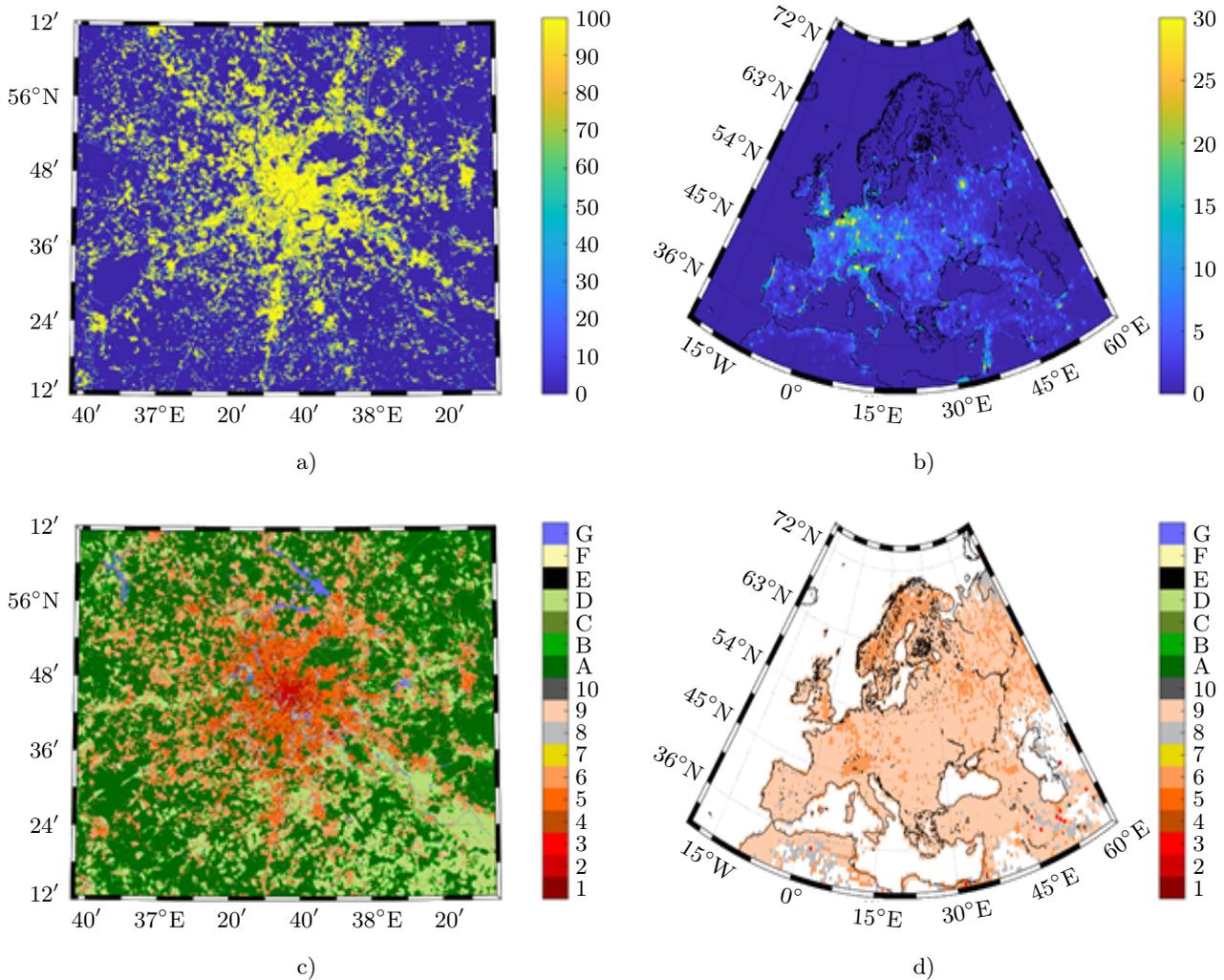


Рис. 11. Фрагменты исходных данных для Московского региона и примеры их агрегирования на территорию Европы: а) карта долей площади поверхности городского типа с исходным пространственным разрешением (по данным сайта Copernicus Global Land Cover); б) карта долей площади поверхности городского типа территории Европы с ячейками сетки $0.5 \times 0.5^\circ$, агрегирующая данные о Московском регионе; в) карта локальных климатических зон Московского региона; г) карта преобладающих типов городских локальных климатических зон на территории Европы с ячейками сетки $0.5 \times 0.5^\circ$

Fig. 11. Fragments of the initial data for the Moscow region and examples of their aggregation to the territory of Europe: a) map of the shares of the urban-type surface area with the original spatial resolution (according to the Copernicus Global Land Cover website); b) map of the shares of the urban-type surface area of the territory of Europe with $0.5 \times 0.5^\circ$ grid cells, aggregating data on the Moscow region; c) map of local climatic zones of the Moscow region; d) map of the predominant types of urban local climatic zones in the territory of Europe with $0.5 \times 0.5^\circ$ grid cells

Полученные результаты демонстрируют работоспособность разработанного ПО и полностью удовлетворяют поставленную задачу по агрегированию разных типов данных для модели ДСС. Поэтому было принято решение создать готовые архивы¹ данных о параметрах поверхности (табл. 1) с различным горизонтальным разрешением: $0.1 \times 0.1^\circ$, $0.25 \times 0.25^\circ$, $0.5 \times 0.5^\circ$, $1 \times 1^\circ$, $2 \times 1.5^\circ$, $5 \times 4^\circ$.

Для тестирования работы модели ДСС TerM с новыми данными были проведены численные эксперименты. Эксперименты проводились для территории Сибири ($50\text{--}65^\circ$ с.ш., $60\text{--}120^\circ$ в.д.) с пространственным разрешением $0.5 \times 0.5^\circ$ и с временным шагом 1 час, в качестве атмосферного форсинга для

¹Эти архивы доступны для свободного скачивания по ссылке: <http://kibel.srcc.msu.ru:8080/share.cgi?ssid=09b2cff84fe6498aa7b4d5e8f5134f7c>.



модели использовались данные реанализа Era5 [30] за 30-летний период с 1991 по 2021 г. В модель была добавлена возможность работы в двух конфигурациях:

- 1) в конфигурации с параметрами поверхности базовой версии модели, используемыми в климатической модели ИВМ РАН;
- 2) в конфигурации с новыми параметрами поверхности из табл. 1, агрегированными на нужное пространственное разрешение с помощью разработанного ПО.

Все остальные компоненты модели в экспериментах оставались идентичными.

На рис. 12 представлены поля температуры и влажности почвы на глубине 5 см от поверхности, усредненные за 30-летний период с 1991 по 2021 г. Они получены по результатам численных экспериментов с моделью ДСС TerM в обеих вышеуказанных конфигурациях. Данный результат демонстрирует работоспособность модели ДСС TerM как с базовыми параметрами поверхности, так и с новыми. В этой

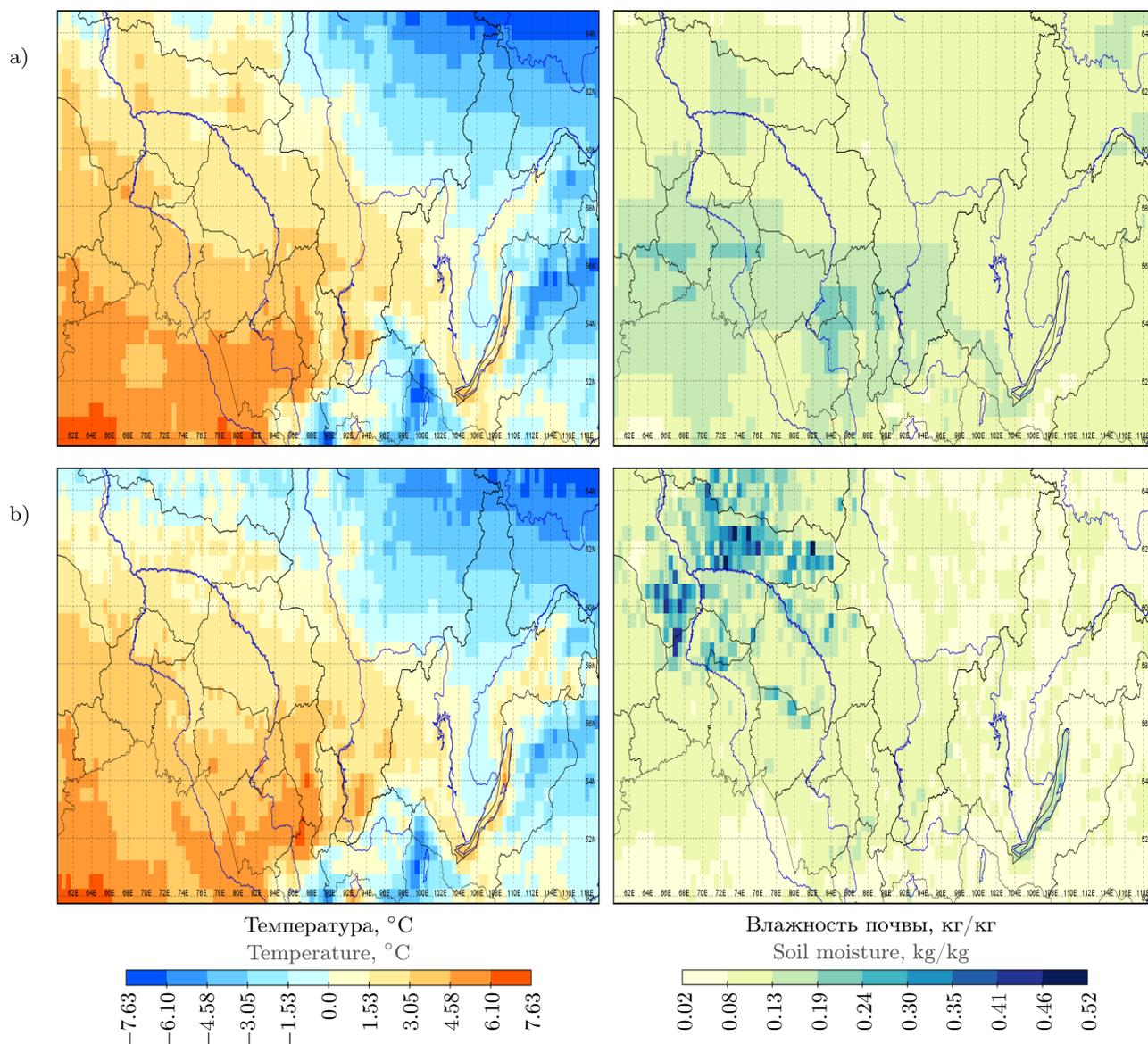


Рис. 12. Поля средней многолетней температуры и влажности почвы на глубине 5 см за период с 1991 по 2021 г., полученные в результате численного эксперимента с моделью ДСС TerM:

a) параметры поверхности базовой версии модели; б) новые параметры поверхности

Fig. 12. Fields of average long-term soil temperature and moisture at depth 5 cm for the period from 1991 to 2021, obtained as a result of a numerical experiment with the DSS TerM model:

a) surface parameters of the basic version of the model; б) new surface parameters

работе не приводится подробный анализ полученных полей, поскольку это требует отдельного изучения, но стоит отметить, что результаты моделирования зависят не только от улучшения параметризаций физических процессов, но и в большой степени от входных параметров, используемых в этих параметризациях и отражающих физические свойства изучаемой среды.

5. Заключение. Для работы МЗС, в том числе и их отдельных блоков (модель ДСС), требуются внешние данные о параметрах поверхности. Современные наборы таких параметров представляют собой отдельные для каждой группы параметров архивы 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 TerM. В работе приведено описание используемых математических методов и технической реализации этого ПО. 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 TerM. С помощью этого ПО был рассчитан архив данных о параметрах поверхности (табл. 1), используемых или планируемых к использованию в модели ДСС TerM, с различным пространственным разрешением: $0.1 \times 0.1^\circ$, $0.25 \times 0.25^\circ$, $0.5 \times 0.5^\circ$, $1 \times 1^\circ$, $2 \times 1.5^\circ$, $5 \times 4^\circ$, что говорит о его универсальности и широком диапазоне применения в различных задачах. Также в работе демонстрируется работоспособность модели ДСС TerM с данными из этого архива.

Список литературы

1. *Heavens N.G., Ward D.S., Natalie M.M.* Studying and projecting climate change with Earth system models // Nature Education Knowledge. 2013. **4**, N 5. Pages 4.
2. *Fisher R.A., Koven C.D.* Perspectives on the future of land surface models and the challenges of representing complex terrestrial systems // J. Adv. Model. Earth Syst. 2020. **12**, N 4. Article Number e2018MS001453. doi 10.1029/2018MS001453.
3. *Danabasoglu G., Lamarque J.-F., Bacmeister J., et al.* The community Earth system model version 2 (CESM2) // J. Adv. Model. Earth Syst. 2020. **12**, N 2, Article Number e2019MS001916. doi 10.1029/2019MS001916.
4. *Lawrence D.M., Fisher R.A., Koven C.D., et al.* The community land model version 5: description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty // J. Adv. Model. Earth Syst. 2019. **11**, N 12. 4245–4287. doi 10.1029/2018MS001583.
5. *Voldoire A., Sanchez-Gomez E., Salas y Méliá D., et al.* The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation // Clim. Dyn. 2013. **40**, N 9–10. 2091–2121. doi 10.1007/s00382-011-1259-y.
6. *Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., et al.* A global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models // J. Clim. 2003. **16**, N 9. 1261–1282. doi 10.1175/1520-0442(2003)16<1261:AGDOLS>2.0.CO;2.
7. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., et al.* A description of the advanced research WRF model version 4 // NCAR Technical Notes No. NCAR/TN-556+STR. Boulder: Nat. Center Atm. Res., 2021. doi 10.5065/1dfh-6p97
8. *Baldauf M., Seifert A., Förstner J., et al.* Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities // Mon. Wea. Rev. 2011. **139**, N 12. 3887–3905. doi 10.1175/MWR-D-10-05013.1.
9. *Asensio H., Messmer M., Lüthi D., et al.* External parameters for numerical weather prediction and climate application EXTPAR v5.6 // https://www.cosmo-model.org/content/tasks/workGroups/wg3b/docs/EXTPAR_user_and_implementation_manual_20210906.pdf. Cited November 15, 2024.
10. *Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Bogomolov V.Yu., et al.* Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. 2024. **39**, N 6 (in press).
11. *Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др.* Математическое моделирование Земной системы. М.: МАКС Пресс, 2016.
12. *Beliakov G., Sola H.B., Calvo T.* A practical guide to averaging functions. Cham: Springer, 2016. doi 10.1007/978-3-319-24753-3.
13. *Rew R.K., Davis G.P., Emmerson S., Davies H.* NetCDF user's guide for C. An interface for data access, version 3. 1997. <http://fileformats.archiveteam.org/wiki/NetCDF>. Cited November 15, 2024.
14. *Dai Y., Xin Q., Wei N., et al.* A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling // J. Adv. Model. Earth Syst. 2019. **11**, N 9. 2996–3023. doi 10.1029/2019MS001784.



15. Global Land Cover Characterization (GLCC). doi [10.5066/F7GB230D](https://doi.org/10.5066/F7GB230D).
16. Егоров В.А., Барталев С.А., Колбудаев П.А. и др. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. **15**, № 2. 282–286. doi [10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286)
17. Choulga M., Kourzeneva E., Zakharova E., Doganovsky A. Estimation of the mean depth of boreal lakes for use in numerical weather prediction and climate modelling // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2014. **66**, N 1. Article Number 21295. doi [10.3402/tellusa.v66.21295](https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.21295).
18. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W., et al. ESA WorldCover 10 m 2020 v100 // Zenodo. 2021. Version v100 [Data set]. doi [10.5281/zenodo.5571936](https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936).
19. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E., et al. Copernicus global land cover layers—collection 2 // Remote Sens. 2020. **12**, N 6. Article Number 1044. doi [10.3390/rs12061044](https://doi.org/10.3390/rs12061044).
20. Demuzere M., Kittner J., Martilli A., et al. A global map of local climate zones to support Earth system modelling and urban-scale environmental science // Earth Syst. Sci. Data. 2022. **14**, N 8. 3835–3873. doi [10.5194/essd-14-3835-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022).
21. Myneni R., Knyazikhin Y., Park T. MCD15A2H MODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index/FPAR 8-day L4 global 500 m SIN Grid V006 // Distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. doi [10.5067/MODIS/MCD15A2H.006](https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD15A2H.006).
22. Golub M., Thiery W., Marcé R., et al. A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: the ISIMIP lake sector // Geosci. Model Dev. 2022. **15**, N 11. 4597–4623. doi [10.5194/gmd-15-4597-2022](https://doi.org/10.5194/gmd-15-4597-2022).
23. Lehner B., Verdin K., Jarvis A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data // Eos Trans. AGU. 2008. **89**, N 10. 93–94. doi [10.1029/2008E0100001](https://doi.org/10.1029/2008E0100001).
24. Amante C., Eakins B.W. ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. Boulder: Nat. Geophys. Data Center, 2009.
25. Clapp R.B., Hornberger G.M. Empirical equations for some soil hydraulic properties // Water Resources Research. 1978. **14**, N 4. 601–604. doi [10.1029/WR014i004p00601](https://doi.org/10.1029/WR014i004p00601).
26. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Resources Research. 1976. **12**, N 3. 513–522. doi [10.1029/WR012i003p00513](https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513).
27. Van Genuchten M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1980. **44**, N 5. 892–898. doi [10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x](https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x).
28. Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M. Impact of urban canopy parameters on a megacity’s modelled thermal environment // Atmosphere. 2020. **11**, N 12. Article Number 1349. doi [10.1029/2008E0100001](https://doi.org/10.1029/2008E0100001).
29. Тарасова М.А., Варенцов М.И., Степаненко В.М. Параметризации взаимодействия атмосферы с городской поверхностью: обзор и перспективы развития // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. **59**, № 2. 127–148. doi [10.31857/S0002351523020062](https://doi.org/10.31857/S0002351523020062).
30. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2020. **146**, N 730. 1999–2049. doi [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).

Поступила в редакцию
 26 сентября 2024

Принята к публикации
 7 ноября 2024

Информация об авторах

Анна Александровна Рязанова — мл. науч. сотр.; 1) Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический, 10/3, 634055, Томск, Российская Федерация; 2) Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, 119017, Москва, Российская Федерация.

Василий Юрьевич Богомолов — к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.; 1) Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический, 10/3, 634055, Томск, Российская Федерация; 2) Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1, стр. 4, 119234, Москва, Российская Федерация; 3) Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, 119017, Москва, Российская Федерация.

Виктор Михайлович Степаненко — д.ф.-м.н., заместитель директора; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1, стр. 4, 119234, Москва, Российская Федерация.

Михаил Иванович Варенцов — к.г.н., ст. науч. сотр.; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1, стр. 4, 119234, Москва, Российская Федерация.

Александр Игоревич Медведев — программист; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1, стр. 4, 119234, Москва, Российская Федерация.

References

1. N. G. Heavens, D. S. Ward, and M. M. Natalie, “Studying and Projecting Climate Change with Earth System Models,” *Nat. Educ. Knowl.* **4** (5), 4 pages (2013).
2. R. A. Fisher and C. D. Koven, “Perspectives on the Future of Land Surface Models and the Challenges of Representing Complex Terrestrial Systems,” *J. Adv. Model. Earth Syst.* **12** (4), Article Number e2018MS001453 (2020). doi 10.1029/2018MS001453.
3. G. Danabasoglu, J.-F. Lamarque, J. Bacmeister, et al., “The Community Earth System Model Version 2 (CESM2),” *J. Adv. Model. Earth Syst.* **12** (2), Article Number e2019MS001916 (2020). doi 10.1029/2019MS001916.
4. D. M. Lawrence, R. A. Fisher, C. D. Koven, et al., “The Community Land Model Version 5: Description of New Features, Benchmarking, and Impact of Forcing Uncertainty,” *J. Adv. Model. Earth Syst.* **11** (12), 4245–4287 (2019). doi 10.1029/2018MS001583.
5. A. Voltaire, E. Sanchez-Gomez, D. Salas y Méliá, et al., “The CNRM-CM5.1 Global Climate Model: Description and Basic Evaluation,” *Clim. Dyn.* **40** (9–10), 2091–2121 (2013). doi 10.1007/s00382-011-1259-y.
6. V. Masson, J.-L. Champeaux, F. Chauvin, et al., “A Global Database of Land Surface Parameters at 1 km Resolution in Meteorological and Climate Models,” *J. Clim.* **16** (9), 1261–1282 (2003). doi 10.1175/1520-0442(2003)16<1261:AGDOLS>2.0.CO;2.
7. W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, et al., *A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4* NCAR Technical Notes No. NCAR/TN-556+STR (National Center for Atmospheric Research, Boulder, 2021). doi 10.5065/1dfh-6p97.
8. M. Baldauf, A. Seifert, J. Förstner, et al., “Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities,” *Mon. Wea. Rev.* **139** (12), 3887–3905 (2011). doi 10.1175/MWR-D-10-05013.1.
9. H. Asensio, M. Messmer, D. Lüthi, et al., *External Parameters for Numerical Weather Prediction and Climate Application EXTPAR v5.6*. https://www.cosmo-model.org/content/tasks/workGroups/wg3b/docs/EXTPAR_user_and_implementation_manual_20210906.pdf. Cited November 15, 2024.
10. V. M. Stepanenko, A. I. Medvedev, V. Yu. Bogomolov, et al., “Land Surface Scheme TerM: the Model Formulation, Code Architecture and Applications,” *Russ. J. Numer. Anal. Math. Model.* **39** (6) (in press).
11. E. M. Vilodin, V. Ya. Galin, A. S. Gritsun, et al., *Mathematical Modeling of the Earth System* (MAKS Press, Moscow, 2016). <https://seakc.meteoinfo.ru/images/media/images-seakc/seakc/INM/4.pdf>. Cited November 15, 2024.
12. G. Beliakov, H. B. Sola, and T. Calvo, *A Practical Guide to Averaging Functions* (Springer, Cham, 2016). doi 10.1007/978-3-319-24753-3.
13. R. K. Rew, G. P. Davis, S. Emmerson, and H. Davies, *NetCDF User’s Guide for C. An Interface for Data Access, Version 3* (1997). <http://fileformats.archiveteam.org/wiki/NetCDF>. Cited November 15, 2024.
14. Y. Dai, Q. Xin, N. Wei, et al., “A Global High-Resolution Data Set of Soil Hydraulic and Thermal Properties for Land Surface Modeling,” *J. Adv. Model. Earth Syst.* **11** (9), 2996–3023 (2019). doi 10.1029/2019MS001784.
15. Global Land Cover Characterization (GLCC). doi 10.5066/F7GB230D.
16. V. A. Egorov, S. A. Bartalev, P. A. Kolbudaev, et al., “Land Cover Map of Russia Derived from Proba-V Satellite Data,” *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.* **15** (2), 282–286 (2018). doi 10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286.
17. M. Choulga, E. Kourzeneva, E. Zakharova, and A. Doganovsky, “Estimation of the Mean Depth of Boreal Lakes for Use in Numerical Weather Prediction and Climate Modelling,” *Tellus A: Dyn. Meteorol. Oceanogr.* **66** (1), Article Number 21295 (2014). doi 10.3402/tellusa.v66.21295.



18. D. Zanaga, R. Van De Kerchove, W. De Keersmaecker, et al., “ESA WorldCover 10 m 2020 v100,” Zenodo. 2021. Version v100 [Data set]. doi [10.5281/zenodo.5571936](https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936).
19. M. Buchhorn, M. Lesiv, N.-E. Tsendbazar, et al., “Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2,” Remote Sens. **12** (6), Article Number 1044 (2020). doi [10.3390/rs12061044](https://doi.org/10.3390/rs12061044).
20. M. Demuzere, J. Kittner, A. Martilli, et al., “A Global Map of Local Climate Zones to Support Earth System Modelling and Urban-Scale Environmental Science,” Earth Syst. Sci. Data **14** (8), 3835–3873 (2022). doi [10.5194/essd-14-3835-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022).
21. R. Myneni, Y. Knyazikhin, and T. Park, *MCD15A2H MODIS/Terra+ Aqua Leaf Area Index/FPAR 8-day L4 Global 500 m SIN Grid V006*. Distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC (2015). doi [10.5067/MODIS/MCD15A2H.006](https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD15A2H.006).
22. M. Golub, W. Thiery, R. Marcé, et al., “A Framework for Ensemble Modelling of Climate Change Impacts on Lakes Worldwide: the ISIMIP Lake Sector,” Geosci. Model Dev. **15** (11), 4597–4623 (2022). doi [10.5194/gmd-15-4597-2022](https://doi.org/10.5194/gmd-15-4597-2022).
23. B. Lehner, K. Verdin, and A. Jarvis, “New Global Hydrography Derived from Spaceborne Elevation Data,” Eos Trans. AGU. **89** (10), 93–94 (2008). doi [10.1029/2008EO100001](https://doi.org/10.1029/2008EO100001).
24. C. Amante and B. W. Eakins, *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis* (National Geophysical Data Center, Boulder, 2009).
25. R. B. Clapp and G. M. Hornberger, “Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties,” Water Resour. Res. **14** (4), 601–604 (1978). doi [10.1029/WR014i004p00601](https://doi.org/10.1029/WR014i004p00601).
26. Y. Mualem, “A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media,” Water Resour. Res. **12** (3), 513–522 (1976). doi [10.1029/WR012i003p00513](https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513).
27. M. Th. van Genuchten, “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils,” Soil Sci. Soc. Am. J. **44** (5), 892–898 (1980). doi [10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x](https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x).
28. M. Varentsov, T. Samsonov, and M. Demuzere, “Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity’s Modelled Thermal Environment,” Atmosphere **11** (12), Article Number 1349 (2020). doi [10.3390/atmos11121349](https://doi.org/10.3390/atmos11121349).
29. M. A. Tarasova, M. I. Varentsov, and V. M. Stepanenko, “Parameterization of the Interaction between the Atmosphere and the Urban Surface: Current State and Prospects,” Izv. Akad. Nauk, Fiz. Atmos. Okeana **59** (2), 127–148 (2023) [Izv. Atmos. Ocean. Phys. **59** (2), 111–130 (2023)]. doi [10.1134/S0001433823020068](https://doi.org/10.1134/S0001433823020068).
30. H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, et al., “The ERA5 Global Reanalysis,” Q.J.R. Meteorol. Soc. **146** (730), 1999–2049 (2020). doi [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).

Received
September 26, 2024

Accepted for publication
November 7, 2024

Information about the authors

Anna A. Ryazanova — Junior Researcher; 1) Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS, Academicheskyy ave., 10/3, 634055, Tomsk, Russia; 2) Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevskyy lane, 3, 119017, Moscow, Russia.

Vasiliy Yu. Bogomolov — Ph. D., Senior Researcher; 1) Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the SB RAS, Academicheskyy ave., 10/3, 634055, Tomsk, Russia; 2) Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Leninskie Gory, 1, building 4, 119234, Moscow, Russia; 3) Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevskyy lane, 3, 119017, Moscow, Russia.

Victor M. Stepanenko — Dr. Sci., Deputy Director; Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Leninskie Gory, 1, building 4, 119234, Moscow, Russia.

Mikhail I. Varentsov — Ph. D., Senior Researcher; Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Leninskie Gory, 1, building 4, 119234, Moscow, Russia.

Aleksandr I. Medvedev — programmer; Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Leninskie Gory, 1, building 4, 119234, Moscow, Russia.