



doi 10.26089/NumMet.v26r320

УДК 57.087.2

## Конструктор динамических моделей углеродного цикла почвы

Г. М. Файкин

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Российская Федерация  
ORCID: 0000-0002-3595-2808, e-mail: faykingm@my.msu.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@srmcc.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: a.medvedev@rcc.msu.ru

С. К. Шангареева

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Российская Федерация  
ORCID: 0009-0004-0717-2320, e-mail: sumbel.enikeeva@gmail.com

И. М. Рыжова

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения,  
Москва, Российская Федерация  
ORCID: 0000-0002-8325-5222, e-mail: iryzhova@mail.ru

В. А. Романенков

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения,  
Москва, Российская Федерация  
ORCID: 0000-0002-8967-4225, e-mail: geoest@yandex.ru

И. Т. Хусниев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения,  
Москва, Российская Федерация  
ORCID: 0000-0003-0883-2365, e-mail: husniev.ilshat@gmail.com

**Аннотация:** В статье представлен конструктор моделей углеродного цикла (КМУЦ) — программный комплекс для спецификации и решения систем уравнений моделей углеродного цикла почвы. В КМУЦ заложена структура обобщенной системы обыкновенных дифференциальных уравнений с мультипликативным представлением скоростей перехода массы между пулами; частными случаями этой системы являются большинство известных в литературе моделей углеродного цикла. Текущая программная реализация конструктора позволяет пользователю выбрать модель из набора известных формулировок (блок почвы INMCM, SOCS, RothC), данные по внешним переменным состояния окружающей среды, сетку по пространственным координатам и времени для вычисления эволюции содержания углерода в почве. КМУЦ позволяет предметным специалистам в области биологии, экологии, почвоведения и динамики Земной системы использовать реализованные математические модели без профильных знаний в вычислительной математике и программировании.

**Ключевые слова:** углеродный цикл, динамическая система, численные эксперименты.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ (грант НОШ № 23–Ш07–55) в части разработки конструктора моделей углеродного цикла и Важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” в части проверки моделей по данным натурных измерений.



**Для цитирования:** Файкин Г.М., Степаненко В.М., Медведев А.И., Шангареева С.К., Рыжова И.М., Романенков В.А., Хусниев И.Т. Конструктор динамических моделей углеродного цикла почвы // Вычислительные методы и программирование. 2025. **26**, № 3. 281–303. doi 10.26089/NumMet.v26r320.

## Constructor of soil carbon dynamic models

**George M. Faykin**

Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0002-3595-2808, e-mail: [fayking@my.msu.ru](mailto:fayking@my.msu.ru)

**Victor M. Stepanenko**

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

**Alexander I. Medvedev**

Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia  
ORCID: 0009-0001-2045-5446, e-mail: [a.medvedev@rcc.msu.ru](mailto:a.medvedev@rcc.msu.ru)

**Siumbel K. Shangareeva**

Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia  
ORCID: 0009-0004-0717-2320, e-mail: [sumbel.enikeeva@gmail.com](mailto:sumbel.enikeeva@gmail.com)

**Irina M. Ryzhova**

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0002-8325-5222, e-mail: [iryzhova@mail.ru](mailto:iryzhova@mail.ru)

**Vladimir A. Romanenkov**

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0002-8967-4225, e-mail: [geoset@yandex.ru](mailto:geoset@yandex.ru)

**Ilshat T. Khusniev**

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0003-0883-2365, e-mail: [husniev.ilshat@gmail.com](mailto:husniev.ilshat@gmail.com)

**Abstract:** This paper introduces a carbon cycle model constructor (CCMC) — a software framework for specifying and solving systems of equations in soil carbon cycle models. The CCMC is based on the structure of a generalized system of ordinary differential equations with a multiplicative representation of mass transfer rates between pools. Most known carbon cycle models found in the literature are special cases of this system. The current implementation allows users to select a model from established formulations (INMCM soil block, SOCS, RothC), provide external environmental state variables, and define a spatial-temporal grid to simulate the evolution of soil carbon content. The CCMC enables subject-matter experts in biology, ecology, soil science, and Earth system dynamics to utilize the implemented mathematical models without requiring specialized knowledge in computational mathematics or programming.

**Keywords:** carbon cycle, dynamical system, numerical experiments.

**Acknowledgements:** The work is supported by the MSU Development Program (NOSH grant No. 23-Sh07-55) in terms of development of the carbon cycle model constructor and by the Most Important Innovative Project of State Importance “Unified National System for Monitoring of Climate Active Substances” in terms of model validation based on in-situ measurements.

**For citation:** G. M. Faykin, V. M. Stepanenko, A. I. Medvedev, S. K. Shangareeva, I. M. Ryzhova, V. A. Romanenkov, I. T. Khusniev, “Constructor of soil carbon dynamic models,” Numerical Methods and Programming. **26** (3), 281–303 (2025). doi 10.26089/NumMet.v26r320.

**1. Введение.** Углеродный цикл — это совокупность процессов переноса и преобразования соединений углерода в Земной системе. Основные процессы углеродного цикла протекают в атмосфере, океане и деятельном слое сушки. Модель углеродного цикла — программный комплекс, реализующий решение системы уравнений, описывающих процессы углеродного цикла. Модель углеродного цикла представляет собой один из основных блоков любой модели Земной системы. Модель углеродного цикла играет ключевую роль в задаче оценки будущих изменений климата под действием различных сценариев антропогенных эмиссий климатически активных веществ, в первую очередь углекислого газа и метана, поскольку позволяет воспроизвести процессы поглощения дополнительного атмосферного CO<sub>2</sub> наземными и океаническими экосистемами. Модели наземного углеродного цикла (в дальнейшем под моделью углеродного цикла будем понимать именно блок наземного углеродного цикла) представляют собой предмет разработки и обсуждения в данной статье.

Основными математическими элементами модели углеродного цикла являются системы дифференциальных и алгебраических уравнений, снабженные граничными и начальными условиями, а также методы и алгоритмы их приближенного решения, включая методы дискретизации, например, конечных элементов. Во всех моделях углеродного цикла содержатся подблоки, отвечающие за воспроизведение отдельных процессов, представленных соответствующими членами в уравнениях баланса массы различных соединений углерода. Эти процессы включают, например, смену фенологических фаз растительности, первичную продукцию (фотосинтез), диффузионно-конвективный перенос растворимых соединений углерода в почве (растворенного и взвешенного углерода), биотурбации и так далее.

Структура подавляющего большинства моделей основана на понятиях “пул” (резервуар, запас) и “поток”. Основной характеристикой пула является количество углерода, сосредоточенное в почве в форме органического соединения на определенной стадии разложения — от живой биомассы до минерализованных остатков, и измеряемое в единицах [M/L<sup>2</sup>]. Форма органического соединения определяется комплексом физико-биологических, химико-биологических или иных компонентов почвы. Например, это может быть органический углерод в составе свежеотмершего быстроразлагаемого опада в почве или углерод листьев растений. Запас является либо интегральной величиной, отражающей общую массу углерода во всем вертикальном профиле почвы, либо имеет пространственную характеристику — глубину почвенного слоя. Важно, что в большинстве моделей пулы не имеют общепринятого определения и метода измерения (кроме общего запаса почвенного углерода, который количественно равен сумме всех пулов), их количество и параметры определяются концепцией конкретной модели. Отметим также, что не все модели углеродного цикла предполагают дискретный конечный набор пулов — например, Q-модель [2] оперирует непрерывной величиной “качества” органического углерода, задающей непрерывное изменение подверженности мертвый органики микробному разложению.

Потоки применяются для моделирования изменения массы углерода и характеризуются скоростью ее переноса между пулами в результате биологических, химических или физических процессов (единица измерения [M/(L<sup>2</sup> · T)]). Например, скорость опада характеризует интенсивность переноса углерода из биомассы растительности в быстроразлагаемый пул почвы или напочвенного опада. В случае наличия пространственной (вертикальной) размерности у пул почвы под потоком может пониматься также физический перенос (адвекция, диффузия) соединений углерода одного пула в пространстве.

На основе изложенной выше концепции в моделях записываются системы дифференциальных уравнений (обыкновенных, если пулы интегральные, и частных, если запасы углерода пространственно распределены), описывающие динамику пулов и удовлетворяющие закону сохранения массы углерода. Скорости перехода углерода между резервуарами обычно записываются в виде эмпирических функций, которые удовлетворяют закону минимума Либиха. Согласно этому закону, скорость каждого процесса, осуществляемого живыми организмами, ограничена наименее доступным ресурсом (внешним фактором) и обращается в ноль при полном отсутствии любого из них. Наиболее распространенным математическим выражением закона Либиха являются мультиплективные функции для скорости процесса  $F(x_1, \dots, x_n) = f_1(x_1)f_2(x_2) \dots f_n(x_n)$ , в которых каждый множитель выражает доступность конкретного ресурса и может обращаться в ноль.

**2. Краткий обзор современных моделей углеродного цикла.** В настоящее время научным сообществом используются различные модели углеродного цикла [3]. Обширное подмножество представляют модели, посвященные динамике соединения углерода в почвенном покрове [4, 5]: ротамстедская модель (RothC) [6], Century (DayCent) [7], ROhhumus MULI (ROMUL) [8], Soil organic carbon Saturation (SOCS) [9],

модель DeNitrification DeComposition (DNDC) [10], Millennial [11], Yasso07 [12]. Другое подмножество моделей сосредоточено на воспроизведении динамики биомассы растительности, особенно сельскохозяйственных культур, например Климат-Почва-Урожай [13], Agrotool [14], модель MONICA [15], модель Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) [16] и модель World Food Studies (WOFOST) [17]; эти модели нацелены на прогноз урожайности, при этом расчет углеродного баланса получается как сопутствующий результат.

Класс наиболее комплексных моделей составляют глобальные модели деятельного слоя суши, представляющие в том числе биогеохимические процессы углеродного и азотного циклов в системе “почва-растительность”: Jules [18–21], Community Land Model (CLM) [22], The Canadian Land Surface Scheme (CLASSIC) [23, 24], Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE) [25], Carbon-Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land (CHTESSEL) [26], модель деятельного слоя суши ИВМ РАН–МГУ (TerM) [27], входящая в модель Земной системы ИВМ РАН (INMCM) [28] и систему численного прогноза погоды ПЛАВ [29], и др. Эти модели применяются в качестве блоков моделей Земной системы, а также в автономном режиме, когда атмосферное воздействие (метеорологические переменные в приземном слое воздуха) предписано по данным наблюдений, реанализа или моделей Земной системы. В первом случае учитываются обратные связи между климатической системой и углеродным циклом, во втором — только прямое воздействие климатических условий на процессы в деятельном слое. Преимуществом второго подхода является низкая вычислительная стоимость.

Некоторые модели лучше описывают углеродный цикл в лесных экосистемах (например, ROMUL, параметры которой были определены в лабораторных и полевых опытах на материалах лесных биоценозов), другие же ориентированы, например, на воспроизведение запасов и потоков углерода в агроэкосистемах (Климат-Почва-Урожай, RothC). Есть модели со сложной структурой взаимодействия многочисленных пуль (например, CLM оперирует системой с 15 разновидностями углеродсодержащих соединений в почве), но также существуют и такие, в которых авторы считают достаточным два пула (например, SOCS). В силу неопределенности многочисленных параметров сложных моделей, а также редкости данных измерений применяется множество моделей углеродного цикла [4], хотя, как правило, каждая модель включает более одного пула.

Одним из наиболее изученных процессов углеродного цикла является фотосинтез, но и здесь число концептуальных моделей исчисляется десятками [30]. В целом, для отдельных биохимических процессов не существует базовых функций, которые можно было бы считать точными, как, например, система уравнений Навье–Стокса в гидродинамике или уравнения Максвелла в электродинамике.

Каждая модель углеродного цикла имеет свою основную задачу и свой профиль приложений. Многие из них ориентированы для работы в условиях определенных природных характеристик.

В контексте перспектив дальнейшего развития моделей Земной системы и моделей деятельного слоя суши представляется важным обеспечить гибкость в выборе конкретной структуры модели углеродного цикла в рамках единого программного кода, оптимальной для стоящей научной или прикладной задачи. Наличие такого кода — конструктора моделей углеродного цикла (КМУЦ) — позволило бы также в идентичной постановке численного эксперимента сравнивать результаты расчетов по различным структурам модели при заданных входных данных и данных для валидации. Принципом построения конструктора является решение системы дифференциальных уравнений общего вида, частными случаями которой служат большинство известных моделей углеродного цикла системы “почва”. Задачей настоящей статьи является представление созданного прототипа КМУЦ, алгоритма спецификации и численной реализации моделей углеродного цикла.

**3. Математическая постановка и программная реализация КМУЦ.** В данном разделе рассматривается обобщенная система уравнений моделей углеродного цикла. Классом методов, решающих эту систему уравнений, являются численные методы (конечно-разностные, конечно-элементные).

**3.1. Обобщенная постановка дифференциальной задачи.** Как было отмечено в разделе 1, большинство существующих моделей углеродного цикла в математическом отношении представляют собой системы дифференциальных уравнений, которые могут быть приведены к общему виду, основанному на понятиях пуль углерода С, обычно измеряемых в единицах  $[M/L^2]$  в проинтегрированных по вертикали (интегральных) моделях и в  $[M/L^3]$  в вертикально распределенных моделях, и потоков углерода между ними  $F$ , измеряемых в единицах  $[M/(L^2 \cdot T)]$  в интегральных моделях и в  $[M/(L^3 \cdot T)]$  в пространственно распределенных. В работе используется международная система единиц измерения СИ.

Допустима любая размерность переменных, структура конструктора от них не зависит; важно учитывать согласованность размерностей разных переменных между собой, так как главным критерием корректности выполнения расчетов является физическая достоверность результатов.

Система уравнений для  $N_p$  пулов в наиболее общем виде записывается следующим образом:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{N_{i,j}^f} F_{i,j}^k - \frac{\partial (uC_i)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial C_i}{\partial z} - qC_i, \quad i = 1, \dots, N_p, \quad (1)$$

где  $C_i$  — концентрация углерода в  $i$ -м пуле,  $N_{i,j}^f$  — число потоков между  $i$ -м и  $j$ -м пулами,  $F_{i,j}^k$  —  $k$ -й поток между  $i$ -м и  $j$ -м резервуарами,  $u$  — скорость вертикального адвектического переноса [L/T],  $\lambda$  — коэффициент диффузии [L<sup>2</sup>/T],  $q$  — скорость объемного стока воды в почве [1/T],  $t$  — время [T],  $z$  — вертикальная координата [L]. В силу закона сохранения массы  $\forall i, j, k$  справедливо соотношение  $F_{i,j}^k = -F_{j,i}^k$ . Для его выполнения внешние источники и стоки добавляются в систему вместе с формальными “внешними” пулами, с которыми эти потоки связаны: например, первичная продукция из атмосферного CO<sub>2</sub> и выделение CO<sub>2</sub> в атмосферу в результате различных видов дыхания соответственно отнимают и добавляют массу во “внешний” пул атмосферного углерода. Такая формализация системы (1) обеспечивает сохранение величины  $\sum_{i=1}^{N_p} C_i$ . Вертикально распределенные пулы должны входить во внешний пул атмосферного углерода как результат интегрирования по оси  $z$ . Второе и третье слагаемые уравнения (1) соответственно описывают процессы вертикальной адвекции и диффузии, которые происходят, например, в растворенной фазе почвенного углерода и вследствие процессов биотурбации. Для растворенной фазы почвенного углерода действует также член с  $q$ , который параметризует вынос воды за счет горизонтальных уклонов. Система (1) дополняется граничными условиями на верхней и нижней границах по  $z$ .

На данном этапе разработки конструктора возможность использования в расчетах компонент уравнения (1), отвечающих за вертикальный перенос, не реализована. В дальнейшем планируется добавить учет эффектов, обусловленных переносом и диффузией. Отметим, что многие модели углеродного цикла в наиболее часто применяемой конфигурации не учитывают явно вертикального переноса. Это в полной степени относится к реализованным моделям RothC, SOCS и INMCM.

Формальные различия между углеродными моделями заключаются в значениях  $N_p$ ,  $N^f$  и математических выражениях для расчета потоков  $F_{i,j}^k$ . Скорости обмена массой между пулами  $F_{i,j}^k$  обычно представляют в виде произведения функций  $f = f(\psi)$  от отдельных внешних факторов  $\psi$ :

$$F_{i,j}^k = \prod_{m=1}^{N_{i,j,k}} f_{i,j,k}^m (\psi_{i,j,k}^m), \quad (2)$$

где  $N_{i,j,k}$  — число множителей в выражении для  $k$ -го потока между  $i$ -м и  $j$ -м пулами,  $f_{i,j,k}^m(\dots)$  —  $m$ -я функция в выражении для  $k$ -го потока между  $i$ -м и  $j$ -м пулами,  $\psi_{i,j,k}^m$  — аргумент  $m$ -й функции, характеризующий некоторый биотический или абиотический фактор рассматриваемого процесса.

В качестве фактора (аргумента)  $\psi_{i,j,k}^m$  могут выступать, например, температура почвы, температура воздуха, влажность почвы, собственно пул или поток углеродсодержащих соединений, некоторая комбинация их величин и т.п. В этом произведении множители  $f = f(\psi)$  обычно имеют один максимум в области определения и нулевые значения при экстремальных значениях аргументов, так что формула (2) в целом выражает известную экологическую концепцию об ограничении скорости всего биохимического процесса внешним ресурсом, находящимся в минимуме.

Множество возможных форм функций  $f = f(\psi)$  в большинстве моделей обычно сводится к использованию нескольких типовых функциональных зависимостей простого вида: линейного, экспоненциального, в форме уравнения Михаэлиса–Ментен и т.п. Это позволило создать универсальный программный код, применимый к большинству моделей, в котором структура модели определяется набором множителей  $f = f(\psi)$ , задаваемых единообразно. Таким образом, КМУЦ должен включать интерфейс задания множителей в формуле (2) и решатель системы уравнений общего вида (1), позволяющий рассчитать динамику неизвестных переменных модели в описанном классе модельных структур.

Почти любую из перечисленных в разделе 2 модель углеродного цикла можно представить в виде системы уравнений (1) и параметризаций (2). Исключение составляют отдельные слагаемые  $F_{i,j}^k$  сложной

структуры, например представляющие скорость фотосинтеза в модели Фаркухара для растений с С<sub>3</sub> фотосинтезом [31]. Таким образом, процесс фотосинтеза входит в обобщенную концепцию, но полноценно математическая модель фотосинтеза пока не реализована в КМУЦ: учитываются только потоки из/в почву и между различными пулами почвы.

Для решения уравнений (1) удобно использовать схему расщепления по времени, в которой вклады каждого члена правой части этих уравнений на каждом шаге по времени рассчитываются последовательно. В схеме расщепления по времени частные схемы для диффузационного и адвективного слагаемых могут быть реализованы в виде соответствующих программных функций, применяемых для всех  $C_i$ . Отметим, что программная реализация этих двух функций не является сложной.

Далее подробно рассмотрим реализацию этапа расщепления, соответствующего первому члену в правой части уравнений (1), т.е. ограничимся случаем интегральных пуль. В качестве схемы интегрирования по времени в этом случае достаточно использовать явный метод Эйлера первого порядка точности, поскольку характерное время переходов между пулами значительно больше суточных значений шага по времени — шага, который обычно используется в моделях погоды и климата, а также в автономных моделях деятельного слоя суши:

$$C_i^{n+1} = C_i^n + \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{N_{i,j}^f} F_{i,j}^k(C_1^n, \dots, C_{N_p}^n) \Delta t, \quad (3)$$

где  $n$  — номер шага по времени,  $n = 1, 2, \dots, M$ ,  $\Delta t = T/M$  — шаг по времени,  $T$  — длительность интегрирования,  $i = 1, \dots, N_p$ .

**3.2. Программная реализация.** Описанный выше алгоритм конструктора реализован на языке Fortran 2008. Выбор этого языка обусловлен его преобладанием в области моделирования Земной системы и большим количеством некоммерческих библиотек, реализующих стандартные численные методы, параллельные вычисления и файловый ввод/вывод. В качестве зависимостей при компиляции кода КМУЦ используются внешние библиотеки для работы с файлами формата NetCDF [32]. Для конфигурирования конструктора пользователь должен отредактировать текстовый файл (раздел 3.5), содержащий директивы управления конструктором. Создание и модификация моделей углеродного цикла на настоящем этапе развития программного комплекса требует редактирования файлов с исходным кодом (раздел 3.4). Компиляция и сборка кода выполняются с помощью bash-скрипта.

Компиляция всех возможных вариантов моделей углеродного цикла происходит примерно за 7–8 с на компьютере с процессором AMD Ryzen 7 5700U и объемом оперативной памяти 15 ГБ. При усложнении конструктора компиляция может потребовать больше времени, но серьезной проблемой это не является, поскольку процесс компиляции не должен быть частым действием. После компиляции моделей расчеты выполняются быстро: например, расчет процессов продолжительностью в один год происходит примерно за 0.2 с.

Основная программа конструктора (рис. 1) последовательно выполняет вызов процедур: а) обработка созданного пользователем текстового файла с параметрами настроек; б) инициализации пространственной и временной сеток численной схемы; в) инициализации входных данных (задание данных окружаю-

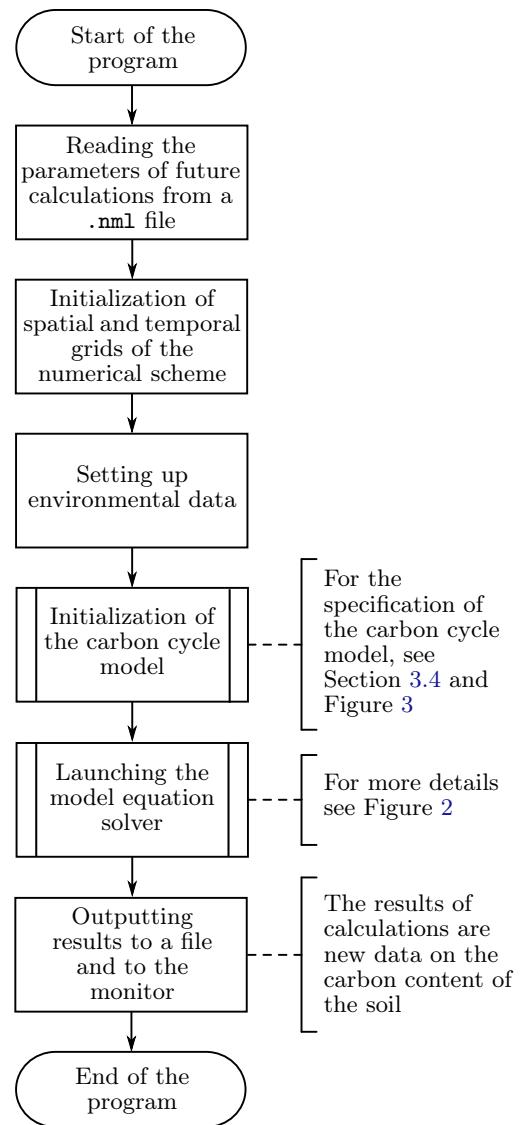


Рис. 1. Блок-схема программы конструктора моделей углеродного цикла

Fig. 1. Flowchart of the Carbon Cycle Model Constructor program

щей среды); г) инициализации модели углерода (задание углеродных данных, см. раздел 3.4); д) запуска решателя уравнений модели; е) вывода данных расчета и завершения работы.

Решатель (рис. 2) состоит из нескольких вложенных циклов: а) цикл по времени; б) цикл по точкам пространства (узлы горизонтальной сетки); в) цикл по независимым участкам в пределах ячейки

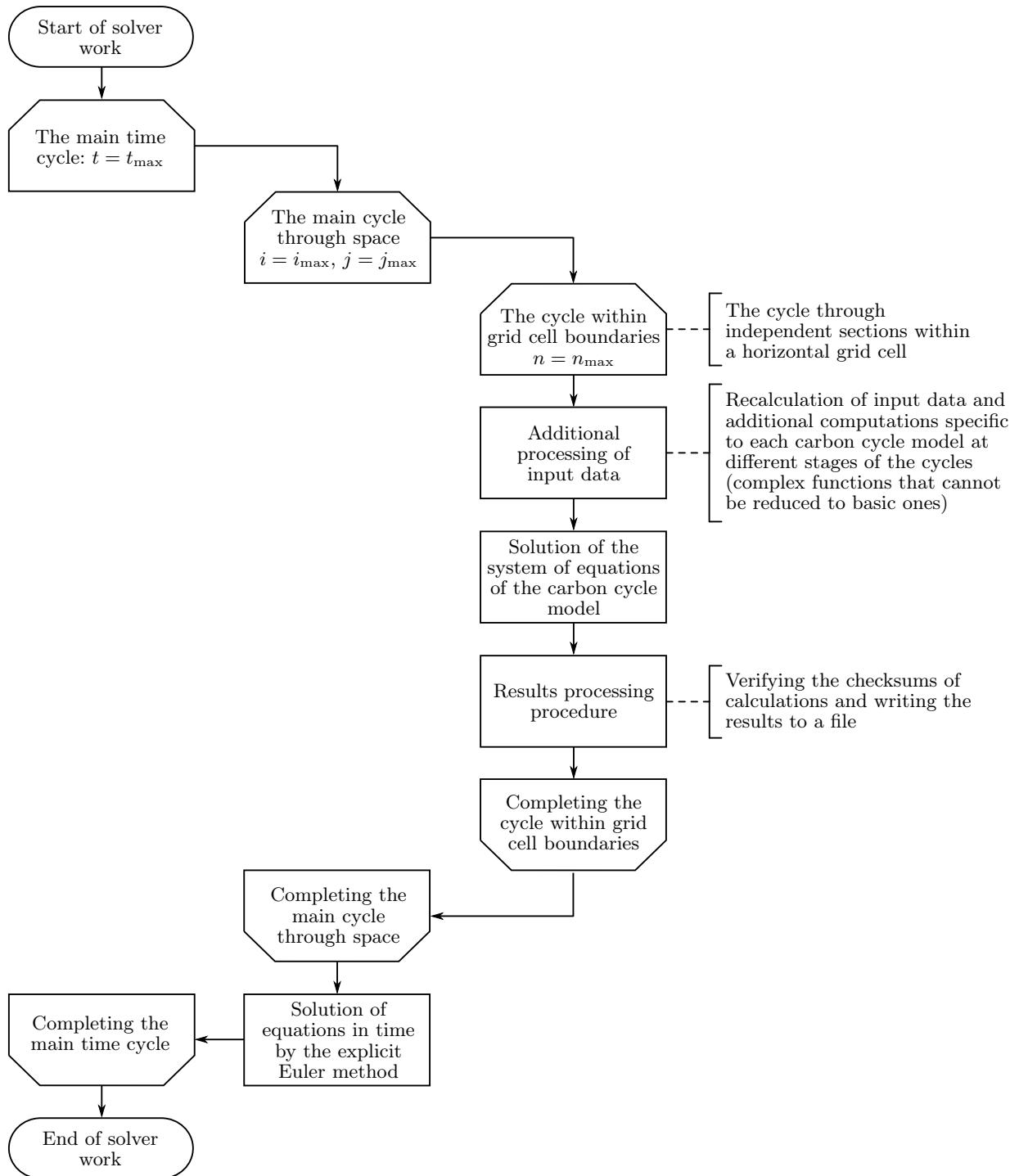


Рис. 2. Блок-схема программы решателя для моделей углеродного цикла ( $t$  — параметр цикла по времени,  $i$  и  $j$  — параметры циклов по пространству,  $n$  — параметр цикла по независимым участкам в пределах ячейки горизонтальной сетки)

Fig. 2. Flowchart of the solver program for carbon cycle models ( $t$  — time cycle parameter,  $i$  and  $j$  — space cycle parameters,  $n$  — cycle parameter for independent sections within the horizontal grid cell)

горизонтальной сетки (например, по вариантам почвенного эксперимента для моделей почвы или типам земельного покрова для моделей Земной системы). Внутри циклов вызываются: а) процедуры, выполняющие дополнительную обработку входных данных и специфические для каждой модели углеродного цикла дополнительные расчеты на разных этапах циклов (на каждом шаге по времени, в каждой ячейке и в каждом участке ячейки), например перерасчет коэффициентов или расчет множителей  $f_{i,j,k}^m$  сложного вида, не сводимых к базовым функциям-множителям (фотосинтез); б) процедура численного решения системы уравнений модели углеродного цикла; в) процедура обработки результатов, включающая в себя проверку контрольных сумм расчетов и запись результатов в файл.

Конфигурирование модели углеродного цикла сводится к заданию структур данных трех типов: “пул”, “поток” и “множитель в выражении для потока”. Процедуры инициализации модели, численного решения системы уравнений модели и обработки результатов записаны в этих структурах. Количество пулов, количество и направление потоков между пулами, количество и форма множителей для каждого потока устанавливается на этапе вызова процедуры инициализации модели углеродного цикла.

Процедуры, отвечающие за инициализацию модели углеродного цикла и выполнение для нее специфических расчетов на разных этапах циклов конструктора, представляют собой указатели на функции. Каждая реализованная в конструкторе модель углеродного цикла представляет собой пару модулей (раздел 3.4), включающих в себя реализацию целевой функции для каждого указателя. Ассоциирование процедур-указателей с целевыми функциями выполняется в зависимости от модели, выбранной в конфигурационном файле пользователя. Аналогичным образом реализованы процедуры инициализации и дополнительной обработки входных данных (на текущий момент может связываться с блоком чтения стандартизированного файла формата NetCDF или “генератором погоды”).

Преимуществами изложенной выше реализации интерфейса подключения блоков генерируемых моделей углеродного цикла и внешних данных к основной программе конструктора являются: а) сокрытие (инкапсуляция) деталей реализации модели углеродного цикла и блока входных данных от конструктора; б) единообразная обработка любых моделей углеродного цикла и типов входных данных; в) отсутствие затрат вычислительных ресурсов на выполнение условных операторов при выборе разных моделей; г) возможность независимой разработки моделей углеродного цикла для конструктора; д) возможность подключения конструктора как внешней библиотеки к любой другой модели (например, в качестве блока углерода для модели Земной системы). Недостатком разработанного алгоритма является необходимость в каждой новой модели углеродного цикла явно указывать реализацию целевой функции для каждого из указателей, что может приводить к появлению избыточного и перенасыщенного для пользователя кода.

**3.3. Спецификация скорости переходов между пулами.** В текущей версии программного кода КМУЦ предусмотрены восемь базовых функций-множителей для спецификации скоростей перехода углерода в формуле (2). Ниже перечислены названия функций-множителей, в скобках указаны имена этих функций, принятые в программном коде конструктора, и приведены соответствующие математические формулы, в которых  $y$  обозначает функцию,  $x$  — аргумент,  $k, a, A$  — коэффициенты,  $c, c_1, c_2, x_0, y_0$  — константы:

- 1) константа (**const**):  $y = c$ ;
- 2) линейная функция (**lin**):  $y = k(x + x_0) + y_0$ ;
- 3) гиперболическая функция (**hyp**):  $y = k \frac{1}{x - x_0} + y_0$ ;
- 4) функция Михаэлиса–Ментен (**mm**):  $y = k \frac{x}{x - x_0} + y_0$ ;
- 5) функция Хевисайда (**step**):  $y = k \theta(x - x_0) + y_0$ , где  $\theta(\psi) = 0$  при  $\psi < 0$  и  $\theta(\psi) = 1$  при  $\psi \geq 0$ ;
- 6) экспоненциальная функция (**exp**):  $y = A e^{k(x-x_0)} + y_0$ ;
- 7) кусочно-линейная функция 1 (**piecewise1**):  $y = (1 - \theta(x - x_0))(k_1 \cdot x + c_1) + \theta(x - x_0)(k_2 \cdot x + c_2)$ ,  
где  $\theta(x - x_0) = 0$  при  $x < x_0$  и  $\theta(x - x_0) = 1$  при  $x \geq x_0$ ;
- 8) кусочно-линейная функция 2 (**piecewise2**):  
 $y = (1 - \theta(x - x_0))(k_1 x + c_1) + (\theta(x - x_0) - \theta(x - x_1))(k_2 x + c_2) + \theta(x - x_1)(k_3 x + c_3)$ ,  
где  $\theta(x - x_0) = 0$  при  $x < x_0$  и  $\theta(x - x_0) = 1$  при  $x \geq x_0$ ;  $\theta(x - x_1) = 0$  при  $x < x_1$  и  $\theta(x - x_1) = 1$  при  $x \geq x_1$ . Без ограничения общности считаем, что  $x_0 < x_1$ .

Аргумент функции  $x$  в программном коде может представлять собой как скалярную, так и векторную переменную (массив). Предусмотрены следующие варианты размерностей массивов, которые позво-

ляют учитывать изменение аргумента  $x$  как в пространстве, так и во времени (используются условные обозначения, принятые в конструкторе):

- 1)  $x\_ijn\_month$  — массив по горизонтальным координатам (долгота и широта), по участкам ячейки и по месяцу, размерность массива равна 4;
- 2)  $x\_ijn$  — массив по горизонтальным координатам и по участкам ячейки, размерность массива — 3;
- 3)  $x\_ij$  — массив только по горизонтальным координатам, размерность массива — 2;
- 4)  $x\_n$  — массив только по участкам ячейки, размерность массива — 1;
- 5)  $x$  — скалярная величина, обычно используется для коэффициентов.

В КМУЦ каждая базовая функция реализована как процедура, которая получает скалярный аргумент на входе и выдает скалярное значение функции на выходе. Обработка векторного аргумента осуществляется посредством процедуры-обертки, причем поддержка различных вариантов размерностей и индексации массивов реализована с использованием условных операторов. В текущей версии конструктора на работу блока условных операторов расходуется до 30% машинного времени. В следующих версиях конструктора планируется оптимизировать поддержку различных вариантов размерностей и индексации массивов.

**3.4. Спецификация моделей углеродного цикла в КМУЦ.** Каждая модель углеродного цикла реализована в паре модулей — основном и вспомогательном (рис. 3). Основной модуль содержит процедуру, назначающую количество пулов, количество и направление потоков между пулами, количество и форму множителей в выражении для потоков. Вспомогательный модуль содержит процедуры для выполнения предварительных расчетов модели на разных этапах цикла в рамках решателя.

Эти процедуры могут быть пустыми, могут использоваться для инициализации переменных (например, задание начальных условий для пулов) и коэффициентов, применяющихся во множителях, для

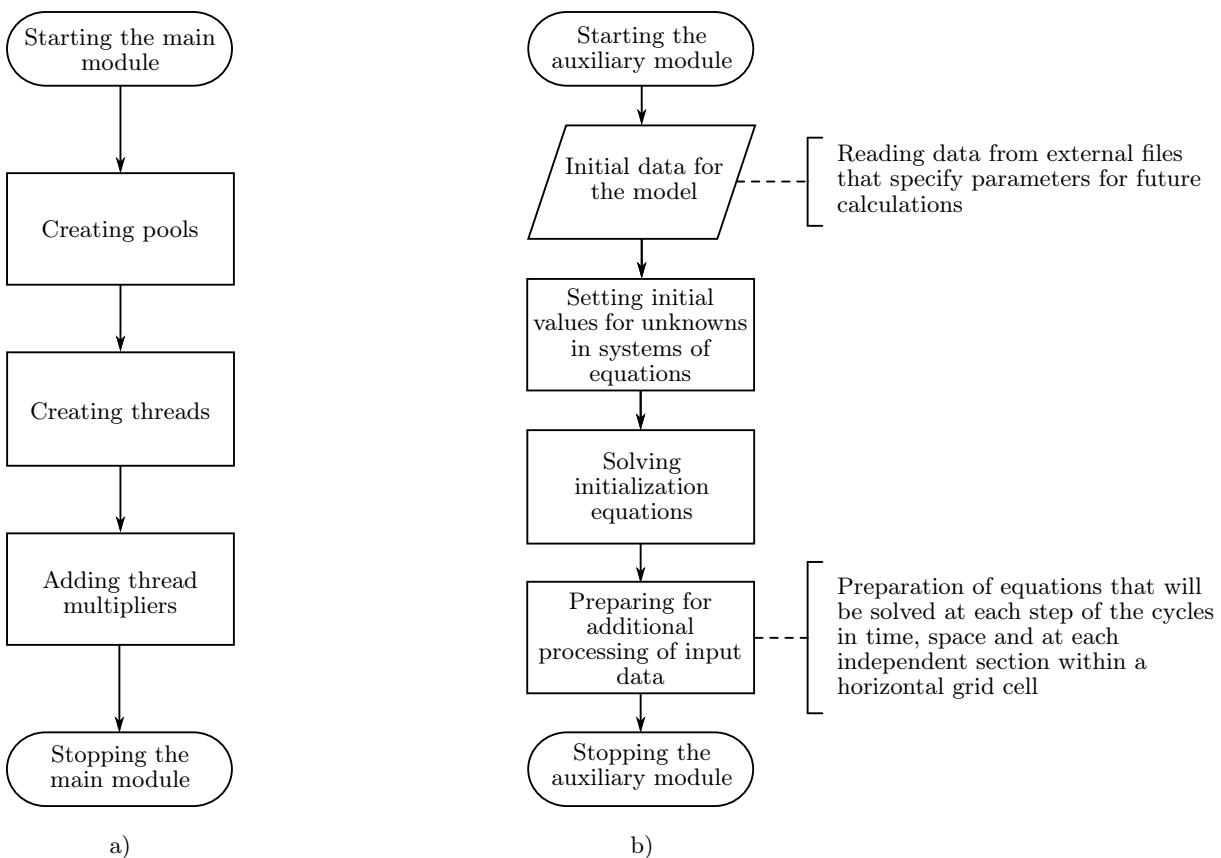


Рис. 3. Типовая блок-схема программной модели углеродного цикла: а) основной модуль модели;  
 б) вспомогательный модуль

Fig. 3. A typical block diagram of a software model of the carbon cycle: a) the main module of the model;  
 b) the auxiliary module

расчета множителей  $f_{i,j,k}^m$  сложного вида, не сводимого к базовым функциям-множителям (такие сложные функции часто применяются для описания, например, фотосинтеза), а также могут содержать любой пользовательский код для отладки или добавления новой коллекции функций к существующей модели на любом этапе решателя (без обращения к базовым структурам данных и функциям конструктора). Всего допустимо определить четыре вида функций в коллекции:

1. Задание начальных данных, состоящее в определении начальных значений содержания углерода в пулах и уникальных для каждой модели значений, коэффициентов распределения и параметров уравнений.
2. Расчет инициализирующих уравнений — этап предварительного вычисления коэффициентов, остающихся неизменными в основных расчетах. Например, коэффициенты распределения по пулам углеродсодержащих соединений, поступающих извне, в зависимости от условий окружающей среды требуют однократного вычисления до начала основного цикла по времени.
3. Дополнительная обработка входных данных — дополнительные вычисления на разных этапах циклов, на каждом шаге по времени, в каждой точке пространства (в частности, в узлах горизонтальной сетки), на каждом независимом участке в пределах ячейки горизонтальной сетки.
4. Процедура обработки результатов — отображение результатов или вывод в файл для выполнения в будущем других расчетов.

Обращение конструктора к перечисленным процедурам выполняется через ассоциированные с ними указатели в порядке, зафиксированном в структуре решателя.

Создание (спецификация) модели углеродного цикла, т.е. заполнение шаблонов по образцу с уже созданными программами моделей углеродного цикла для основного и вспомогательного модулей, требует базовых навыков программирования на Fortran. Для основного модуля предусмотрено использование нескольких специальных процедур (создание пулов, создание потоков, добавление множителей в мультиплексивное выражение), организующих взаимодействие пользователя с конструктором. Для редактирования вспомогательного модуля требуется непосредственное редактирование исходного программного кода.

Рассмотрим подробнее пользовательский интерфейс создания модели углеродного цикла на примере добавления в конструктор скорости дыхания почвы и связанных с ним пулов из модели INMCM [27] (полное описание модели приведено в разделе 4.1). Выпишем выражение для скорости дыхания почвы:

$$F_{\text{micr},i,j}^n = C_{\text{soil},i,j}^n \cdot a_{\text{micr} 25}^n \cdot 2^{(T_{i,j} - T_0)/a} \cdot \frac{\theta_{i,j}^n}{\theta_{i,j}^n + \theta_0} \cdot \frac{\theta_1}{\theta_{i,j}^n + \theta_1}, \quad (4)$$

где  $i$  и  $j$  — индексы ячейки широтно-долготной сетки,  $n$  — индекс типа растительности,  $F_{\text{micr},i,j}^n$  — скорость микробного дыхания почвы в ячейке с индексами  $(i, j)$  под  $n$ -м типом растительности [ $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ],  $C_{\text{soil},i,j}^n$  — содержание углерода в почве в ячейке с индексами  $(i, j)$  под  $n$ -м типом растительности [ $\text{кг}/\text{м}^2$ ],  $a_{\text{micr} 25}^n$  — скорость микробного дыхания на единицу содержания углерода под  $n$ -м типом растительности при температуре  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  [ $1/\text{с}$ ],  $T_{i,j}$  — средняя температура верхних слоев почвы в ячейке с индексами  $(i, j)$  [ $\text{K}$ ],  $\theta_{i,j}^n$  — относительная объемная влажность в корнеобитаемом слое почвы для  $n$ -го типа растительности в ячейке с индексами  $(i, j)$ ,  $\theta_0 = 0.2$ ,  $\theta_1 = 0.23$  — эмпирические константы для относительной влажности,  $a = 10$  — эмпирическая константа [ $\text{K}$ ].

1. На первом этапе в основном модуле конструктора модели создаются пулы. Создание каждого нового пула выполняется с помощью вызова процедуры `set_pool`. В рассматриваемом примере необходимо создать два пула, между которыми происходит поток микробного дыхания — пулы углерода в почве и углерода в атмосфере:

```
call set_pool(pid=n_Catm, name='carbon_air')
call set_pool(pid=n_Csoil, name='carbon_soil', initial_value=8.3, alias=Csoil)
```

Возвращаемые значения процедуры:

`pid` — целочисленная переменная, содержащая значение уникального идентификатора созданного пула.

Входные аргументы процедуры:

`name` — текстовая метка для пула, которая будет использоваться при выводе данных (опционально);

`initial_value` — начальное значение для пула, по умолчанию 0 (опционально);

**alias** — указатель, который будет ассоциирован с создаваемым пулом (опционально). По этому указателю можно будет обращаться к значениям содержания углерода в пule, не используя внутренние структуры представления данных конструктора. Опция назначения указателя удобна при расчетах во вспомогательном модуле углеродной модели или для инициализации множителей (см. ниже).

В данном случае все используемые в программе переменные концентрации углерода (пулы углерода) имеют размерность [кг/м<sup>2</sup>]

2. На втором этапе задается поток между двумя пулами. Создание каждого нового потока выполняется с помощью вызова процедуры **set\_flux**:

```
call set_flux(fid=n_Fmicr, pid_out=n_Csoil, pid_in=n_Catm, name='soil_resp')
```

Возвращаемые значения процедуры:

**fid** — целочисленная переменная, содержащая значение уникального идентификатора созданного потока.

Входные аргументы процедуры:

**pid\_out** — идентификатор пула, из которого выходит поток;

**pid\_in** — идентификатор пула, в который входит поток;

**name** — текстовая метка для потока, которая будет использоваться при выводе данных (опционально).

3. На третьем этапе необходимо последовательно добавить множители в мультиплексивное выражение для расчета каждого потока. Добавление каждого нового множителя выполняется с помощью вызова процедуры **set\_mult**:

```
call set_mult(fid=n_Fmicr, functype='lin', x_ijn=Csoil)
call set_mult(fid=n_Fmicr, functype='const', c_n=amrp)
call set_mult(fid=n_Fmicr, functype='exp', x_ij=T, a=2., k=0.1, x0=25.)
call set_mult(fid=n_Fmicr, functype='mm', x_ijn=theta, k=1., x0=-0.20)
call set_mult(fid=n_Fmicr, functype='hyp', x_ijn=theta, k=0.23, x0=-0.23)
```

Возвращаемые аргументы у процедуры отсутствуют.

Входные аргументы процедуры:

**fid** — идентификатор потока, в выражение для расчета которого добавляется множитель (поток состоит из перемножения множителей, в данном коде демонстрируется запись множителей для конкретного потока n\_Fmicr);

**functype** — текстовая метка для типа функциональной зависимости, реализуемой во множителе (в данной записи демонстрируется тип множителя, участвующего в формировании потока) (см. 3.3);  
**x\_ij**, **x\_ijn** — переменные или массивы, которые будут использоваться в качестве аргумента функции (об индексации см. раздел 3.3). Подразумевается, что значение аргумента будет меняться по мере выполнения расчета модели;

**x0**, **k**, **a**, **c\_n** — значения параметров функции, набор которых зависит от выбранного типа функциональной зависимости. При инициализации могут задаваться равными как постоянными, так и переменными значениями, но в дальнейшем в ходе расчета их значения не изменяются.

В случае, если входной аргумент процедуры задается переменной или массивом (здесь Csoil, amrp, theta), эти переменные должны быть объявлены, инициализированы и заполнены значениями во вспомогательном модуле модели. Исключение составляют переменные, содержащие значения внешних параметров, заполняющиеся автоматически в блоке входных данных (здесь T — температура почвы). Соответствие размерностей массивов пулов, потоков и переменных внутри множителей необходимо контролировать самостоятельно; технически возможно реализовать величины пулов и потоков любой размерности.

**3.5. Управление конструктором.** Управление конструктором осуществляется с помощью текстового файла конфигурации формата NML (стандартизированный формат файлового ввода-вывода на языке Fortran). Чтение файла конфигурации и инициализация настроек конструктора производится в ходе выполнения программы. Это обеспечивается тем, что при сборке исходного кода компилируются все варианты поддерживаемых моделей углеродного цикла. Это, в частности, позволяет: а) гарантировать отсутствие ошибок компиляции для всех реализованных моделей углеродного цикла; б) изменять конфигурацию расчета без перекомпиляции проекта. На этапе инициализации также выполняется проверка на корректность установленных значений настроек и допустимость их взаимосочетания.

Пользователю предоставляется возможность выбора нижеперечисленных опций и их вариантов.

Модель углеродного цикла. На данном этапе предоставляется выбор модели углеродного цикла для последующего расчета из следующих:

- а) модель INMCM;
- б) модель SOCS;
- в) модель RothC;
- г) спецификация модели создается пользователем по шаблону.

Таким образом, пользователь может использовать одну из уже реализованных моделей либо создать новую модель в соответствии со структурой спецификации модели, изложенной в предыдущих разделах. Наиболее просто пользователь может создать спецификацию модели по шаблонам основного и вспомогательного модулей, внутри которых можно вписать свои уравнения и переменные в предписанных правилах работы с моделями.

Входные данные. На этом этапе предоставляется выбор источника данных о внешних параметрах (переменных) модели, задающих динамику окружающей среды (температура, влажность почвы, метеорологические переменные, ...) из следующих вариантов:

- а) не требуются;
- б) генерация суточных синусоид;
- в) чтение из NetCDF-файла (предусмотрено использование стандартизированного выходного файла модели деятельного слоя суши TerM).

Настройка пространственной конфигурации включает два параметра:

1. Выбор сетки по широте и долготе:
  - а) не требуется;
  - б) генерация сетки с заданным разрешением;
  - в) использование сетки из входного NetCDF-файла.
2. Выбор области расчета:
  - а) задание вручную координат точки или прямоугольной области;
  - б) выбор ячеек сетки по их индексам.

Настройка продолжительности расчета включает три параметра:

1. Выбор шага по времени:
  - а) задание вручную;
  - б) использование шага по времени из входного NetCDF-файла.
2. Дата и время на момент старта:
  - а) задание вручную;
  - б) использование стартовых даты и времени из входного NetCDF-файла.
3. Продолжительность расчета:
  - а) задание числа шагов по времени;
  - б) задание конечных даты и времени;
  - в) расчет до конца входного NetCDF-файла.

Выше были приведены основные настройки конструктора. Также в файле конфигурации присутствуют более тонкие настройки расчета, флаги системы тестирования, стандартного вывода данных и т.п. Для большинства расчетов они являются необязательными, но могут быть полезны для разработчиков и при углубленном тестировании.

**4. Реализованные модели углеродного цикла.** На текущий момент в КМУЦ реализованы три модели динамики углерода в почве — почвенная часть углеродного цикла из модели Земной системы INMCM (модели деятельного слоя суши TerM), обозначаемая для краткости INMCM [27], модель SOCS [9] и RothC [6]. При этом динамика углерода растительности явно не воспроизводится, а задается в виде известной интенсивности опада. Включение в КМУЦ уравнений для резервуаров углерода в растениях планируется на следующих этапах исследования.

**4.1. Модель динамики почвенного углерода INMCM.** В исходной модели углеродного цикла INMCM представлен 1 пул углерода в почве, 1 пул в растительности и пул антропогенного углерода (пул углерода, образованный за счет вырубок и эрозии почвы). В модели используется параметризация Фаркухара для процесса фотосинтеза С<sub>3</sub> растений, на основе которой считается первичная продукция (производительность растений). Реализованная в конструкторе модель углеродного цикла INMCM вклю-



чает только почвенную часть, представленную одним пулом, где суммарное дыхание явно не разделяется на гетеротрофное и автотрофное. Эволюция этого пула определяется заданным поступлением растительного опада и микробным дыханием (рис. 4).

Модель INMCM включает простейшее уравнение:

$$\frac{\partial C_{\text{soil}}}{\partial t} = F_{\text{lit}} - F_{\text{micr}}, \quad (5)$$

где  $C_{\text{soil}}$  — концентрация углерода в почве,  $F_{\text{micr}}$  — микробное дыхание (поток в атмосферу),  $F_{\text{lit}}$  — опад растительности (считается заданным). Скорость дыхания определяется уравнением (4).

**4.2. Модель динамики почвенного углерода SOCS.** В конструкторе реализована разработанная И. М. Рыжовой модель SOCS (Soil Organic Carbon Saturation) [9] (рис. 5).

Модель описывает динамику органоминеральных взаимодействий и образования микроагрегатов в двух пулах органического вещества почв: свободном (незашщищенному) и защищенному. Модель учитывает, что один из пулов неограниченно растет с опадом  $F_{\text{lit}}$ , в то время как второй имеет верхний предел при  $F_{\text{lit}} \rightarrow \infty$ .

Модель не описывает в явном виде каждый из механизмов стабилизации органического вещества в почве, а оценивает их интегральное влияние на поведение системы. Модель реализует концепцию насыщения почв углеродом, основанную на предположении, что по мере заполнения углерод-протекторной емкости почвы уменьшается ее способность к защите органического вещества от микробного разложения. Модель описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = F_{\text{lit}} - (1-r)kC_1 - rkC_1 \left(1 - \frac{C_2}{C_m}\right) + k_dC_2 \\ \frac{dC_2}{dt} = rkC_1 \left(1 - \frac{C_2}{C_m}\right) - k_dC_2, \end{cases} \quad (6)$$

где  $C_1$  — количество (масса или концентрация) углерода в свободном пуле,  $C_2$  — количество углерода в защищенном пуле,  $C_m$  — максимальное количество органического углерода (предельное при  $F_{\text{lit}} \rightarrow \infty$ ), которое может быть защищено в почве (углерод-протекторная емкость почвы),  $r$  — доля углерода, переходящая в пул защищенного органического вещества при разложении  $C_1$ ,  $(1-r)$  — доля потерь на дыхание,  $k$  — коэффициент скорости разложения  $C_1$ ,  $k_d$  — коэффициент перехода углерода из  $C_2$  в  $C_1$  в результате десорбции и разрушения агрегатов.

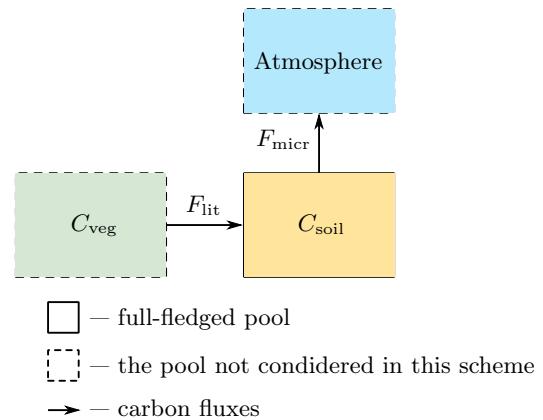


Рис. 4. Пулы и потоки углерода в модели INMCM, внешние пулы обведены пунктирной границей

Fig. 4. Carbon pools and fluxes of the INMCM model, external pools are outlined by dashed margin

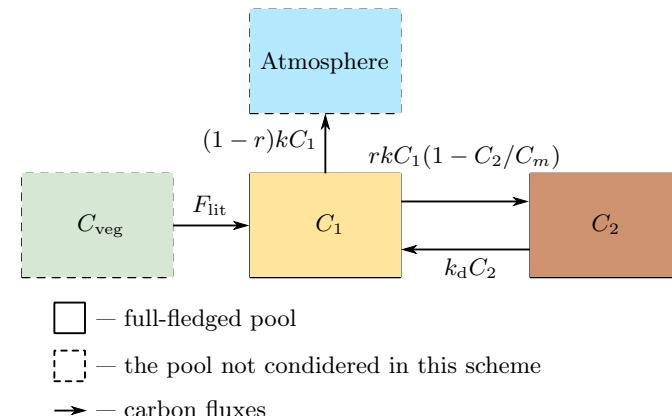


Рис. 5. Пулы и потоки углерода в модели INMCM, внешние пулы обведены пунктирной границей

Fig. 5. Carbon pools and fluxes of the INMCM model, external pools are outlined by dashed margin

**4.3. Модель RothC.** В модели углеродного цикла RothC, получившей широкое распространение [4], как и в описанных выше моделях, скорость поступления в почву растительного опада считается заданной, поэтому в использованной в КМУЦ версии модели RothC входными данными являются измеренные либо расчетные ежемесячные величины поступления углерода в почву вместе с растительными остатками.

Модель RothC содержит пять взаимосвязанных пулов, описание которых представлено в табл. 1, а схема потоков углерода между пулами показана на рис. 6.

Таблица 1. Углеродные пулы модели RothC

Table 1. Carbon pools of the RothC model

Аббревиатура пула Pool abbreviation	Полное наименование (англ.) Full name in English	Полное наименование (рус.) Full name in Russian
DPM	decomposable plant material	легкоразлагаемый растительный материал
RPM	resistant plant material	устойчивый к разложению растительный материал
BIO	microbial biomass pool	пул микробной биомассы
HUM	long lived humified pool	гумифицированное органическое вещество почвы
IOM	inert organic matter	инертное органическое вещество

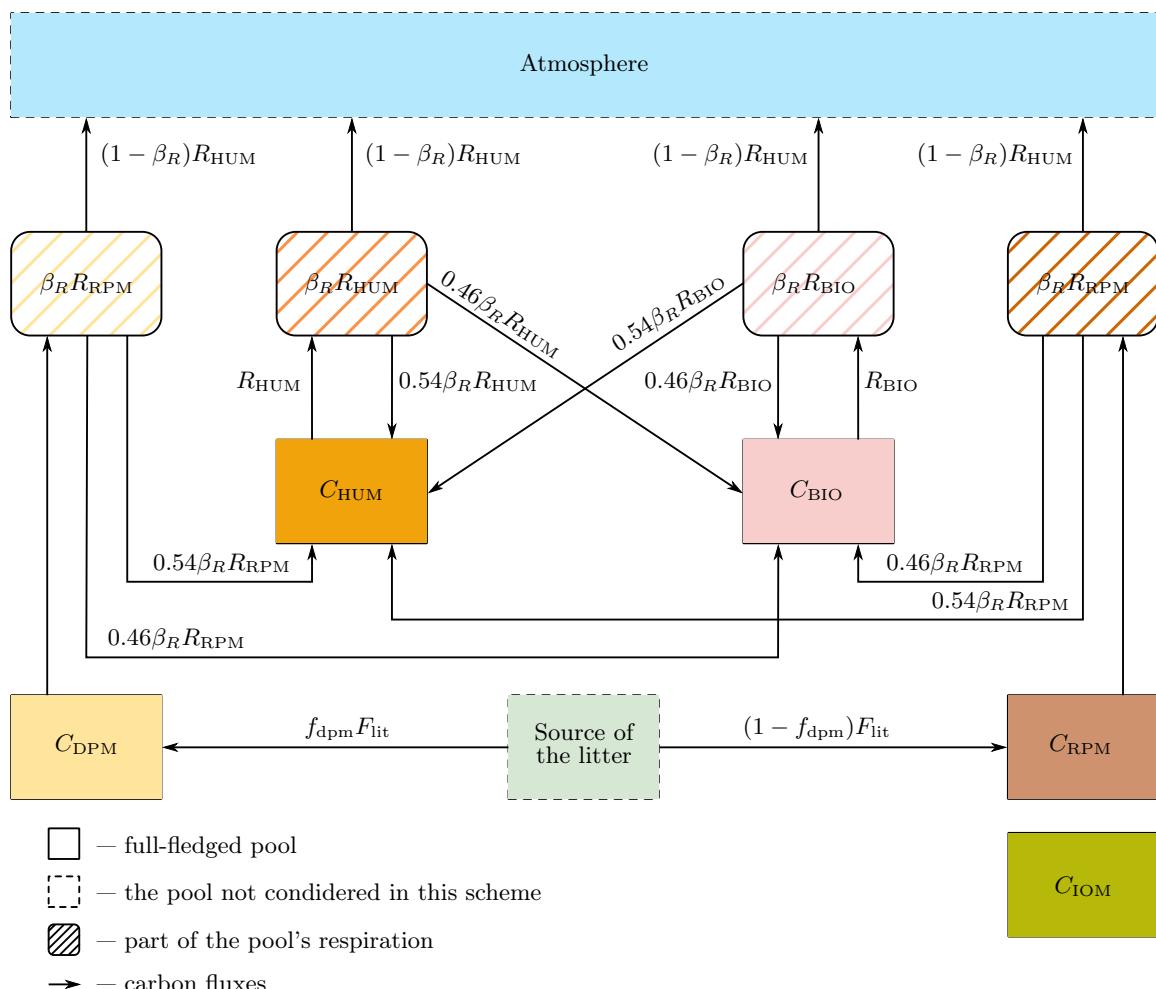


Рис. 6. Пулы и потоки углерода в модели RothC, внешние пулы обведены пунктирной границей

Fig. 6. Carbon pools and fluxes of the RothC model, external pools are outlined by dashed margin



Содержание углерода в пуле ИОМ вычисляется один раз по данным об общем запасе углерода и заданным начальным условиям и во время общего расчета не изменяется:

$$C_{\text{IOM}} = a_{q1} C_{\text{tot}}^{a_{q2}},$$

где  $C_{\text{tot}}$  — суммарное содержание углерода в почве (сумма всех пулов), измеряемое в  $[\text{кг}/\text{м}^2]$ ,  $a_{q1} = 0.049$ ,  $a_{q2} = 1.139$  — эмпирические безразмерные константы.

Изменение запасов углерода в пулах описывается с помощью следующих дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dC_{\text{DPM}}}{dt} &= f_{\text{dpm}} F_{\text{lit}} - R_{\text{DPM}}, \\ \frac{dC_{\text{RPM}}}{dt} &= (1 - f_{\text{dpm}}) F_{\text{lit}} - R_{\text{RPM}}, \\ \frac{dC_{\text{BIO}}}{dt} &= f_{\text{bio}} \beta_R R_s - R_{\text{BIO}}, \\ \frac{dC_{\text{HUM}}}{dt} &= f_{\text{hum}} \beta_R R_s - R_{\text{HUM}},\end{aligned}$$

где  $\beta_R$  — содержание глины (содержание глинистой фракции характерным размером менее 0.002 мм) в почве [%], косвенно отражающее рост физически защищенной фракции органического вещества и снижение скорости минерализации, описываемое процессами дыхания  $R_s$  — общая скорость дыхания по четырем пулам [ $\text{кг}/\text{с}$ ],  $R_{\text{BIO}}$ ,  $R_{\text{HUM}}$ ,  $R_{\text{RPM}}$  и  $R_{\text{DPM}}$  — дыхание пулов BIO, HUM, RPM и DPM соответственно (все измеряются в  $[\text{кг}/\text{с}]$ ),  $f_{\text{dpm}}$  — функция качества растительного опада (делит поступающий опад растительного происхождения по пулам DPM и RPM),  $f_{\text{bio}}$  — коэффициент распределения поступающего опада в пул BIO в процессе минерализации,  $f_{\text{hum}}$  — коэффициент распределения поступающего опада в пул HUM в процессе минерализации.

Величина  $f_{\text{dpm}}$  определяется при помощи соотношения

$$f_{\text{dpm}} = \frac{\alpha_{\text{dr}}}{1 + \alpha_{\text{dr}}},$$

где  $\alpha_{\text{dr}}$  — коэффициент, который участвует в распределении поступающего опада по пулам DPM и RPM. Обычно он принимает следующие значения:  $\alpha_{\text{dr}} = 0.25$  для лесов,  $\alpha_{\text{dr}} = 0.33$  для кустарников,  $\alpha_{\text{dr}} = 0.67$  для естественных лугов и кустарников,  $\alpha_{\text{dr}} = 1.44$  для сельскохозяйственных культур.

Коэффициенты распределения поступающего опада по пулам BIO и HUM в процессе минерализации определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{bh}} &= r_1 (r_2 + r_3 \exp(r_4 \beta_R)), \\ f_{\text{bio}} &= \frac{r_5}{1 + \alpha_{\text{bh}}}, \\ f_{\text{hum}} &= \frac{r_6}{1 + \alpha_{\text{bh}}},\end{aligned}$$

где  $r_1 = 1.67$ ,  $r_2 = 1.85$ ,  $r_3 = 1.6$ ,  $r_4 = -0.0786$ ,  $r_5 = 0.46$ ,  $r_6 = 0.54$  — безразмерные параметры, полученные эмпирическим путем.

Величина  $R_s$  есть сумма скоростей разложения отдельных пулов  $R_s = \sum_i R_i$ , где индекс  $i = \text{DPM}, \text{RPM}, \text{BIO}, \text{HUM}$ . Слагаемые  $R_i$  вычисляются следующим образом:

$$R_i = k_{si} F_T(T_{\text{soil}}) F_S(S) F_v(v) C_i,$$

где  $k_{si}$  — скорость дыхания единицы массы каждого пула в стандартных условиях [ $1/\text{с}$ ],  $F_T(T_{\text{soil}})$  — функция температуры почвы,  $F_S(S)$  — функция влажности почвы,  $F_v(v)$  — функция наличия растительного покрова.

Функция температуры почвы учитывает изменение температуры почвы в верхнем деятельном слое суши (0–30 см) и определяется следующим образом:

$$F_T(T_{\text{soil}}) = \frac{b_1}{1 + e^{b_2/(T_{\text{soil}} - b_3)}},$$

где  $T_{\text{soil}}$  — среднемесячная температура почвы [К],  $b_1 = 47.9$  — безразмерный параметр,  $b_2 = 106$ ,  $b_3 = 254.85$  — параметры размерности [К]. Значения  $b_1, b_2, b_3$  получены эмпирическим путем.

Функция влажности почвы отражает линейное снижение скорости минерализации органического материала при росте дефицита влажности почвы до постоянной минимальной величины при приближении к влажности завядания.

Подход с использованием влажности почвы и влажности завядания [19] отличается от актуального, используемого в модели [6], в котором применяются эвапотранспирация и данные о количестве осадков. Функция влажности почвы может быть параметризована в следующем виде:

$$F_s(S) = \begin{cases} 1 - d_1(s - s_o), & \text{если } s > s_o, \\ d_2 + d_1 \left( \frac{s - s_{\min}}{s_o - s_{\min}} \right), & \text{если } s_{\min} < s \leq s_o, \\ d_2, & \text{если } s \leq s_{\min}, \end{cases}$$

где  $s$  — влажность верхнего слоя почвы в незамерзшем состоянии в массовых долях [мг воды/мг почвы],  $s_o$  — оптимальная влажность почвы, при которой множитель  $F_s(S)$  максимален (равен единице),  $d_1 = 0.8$  и  $d_2 = 0.2$  — безразмерные эмпирические коэффициенты.

Оптимальная для скорости минерализации органического материала влажность почвы связана с влажностью завядания из-за ее способности имитировать замедление дыхания в очень влажных почвах. Влажность завядания определяется экспериментально:

$$\begin{aligned} s_o &= \frac{1}{2} \cdot (1 + s_w), \\ s_{\min} &= c \cdot s_w, \end{aligned}$$

где  $s_w$  — влажность завядания,  $c = 1.7$  — безразмерный эмпирический коэффициент.

Влияние растительного покрова описывается следующим образом:

$$F_v(v) = e_1 + e_2 \cdot (1 - v),$$

где  $v$  — наличие растительного покрова. Если почва голая, то  $v = 0$ , а если присутствует покрытие растениями, то  $v = 1$ . Безразмерные эмпирические коэффициенты  $e_1$  и  $e_2$  равны 0.6 и 0.4 соответственно.

**5. Численные эксперименты.** В ходе численных экспериментов были выполнены расчеты на основе конструктора в разных конфигурациях модели углеродного цикла и произведено сопоставление результатов с экспериментальными данными динамики содержания углерода в почве в длительных полевых опытах с удобрениями [33] Донского Федерального аграрного научного центра (ФАНЦ) Ростовской области и Долгопрудной агрохимической опытной станции (ДАОС 3), расположенной в Московской области.

Входные данные для серий экспериментов собраны с вышеуказанных агроклиматических станций по данным реанализа ERA5 [34]. Входные данные представляют ежемесячный набор метеорологических и биохимических переменных, таких как температура воздуха, наличие растительного покрова, поступление углерода в почву в виде растительных остатков и органического удобрения.

В качестве постоянного параметра модели принято содержание глинистой фракции размером менее 0.002 мм. Для проверки качества моделирования были также использованы экспериментальные данные по содержанию углерода в верхнем слое почвы за отдельные годы наблюдений: 0–20 см для почв подзолистого ряда (ДАОС 3) и 0–30 см для черноземов (ФАНЦ).

В качестве входных данных использованы среднемесячные значения влажности почвы из ERA5.

Расчеты производились на основе внедренных в конструктор моделей INMCM, SOCS, RothC с месячным шагом по времени и с применением данных измерений, охватывающих периоды с 1975 по 2017 г. включительно (станция ФАНЦ) и с 1937 по 2011 г. включительно (станция ДАОС 3).

Метод, примененный для инициализации значений пулов углерода, рассмотрим на примере данных наблюдений со станции ФАНЦ.

1. Назовем период времени, за который имеются данные измерений (1975–2017 гг.), валидационным периодом. Интегрирование системы уравнений модели углеродного цикла начиналось за 250 лет до начала валидационного периода (1975 г.) с нулевыми начальными значениями пулов; промежуток времени с начала интегрирования до начала валидационного периода назовем предварительным (“разгоночным”) периодом.

2. В ходе предварительного периода измеренные за валидационный период временные ряды внешних данных (интенсивность поступления органического углерода, температура почвы, влажность почвы, наличие растительного покрова) циклически повторялись.
3. По завершении предварительного периода (1975 г.) суммарное содержание углерода в почве приходило к квазиравновесному состоянию, а углеродные соединения, представленные пулами, имели почти постоянное отношение к суммарной массе углерода. Небольшие отклонения вызывались сезонными колебаниями внешних данных: температура и влажность почвы.
4. Полученное к концу предварительного периода относительное распределение суммарного углерода по пулам использовалось вместе с наблюдаемыми данными о суммарном содержании углерода в 1975 г. для инициализации пулов в численном эксперименте, охватывающем валидационный период, а именно: полученные в ходе предварительного вычисления значения процентного содержания углерода в пулах относительно общего содержания в почве применялись к данным наблюдения суммарного содержания углерода в почве на начало расчета.

На рис. 7, 8 представлена динамика запасов углерода в почве по результатам расчетов в рамках этих моделей в сравнении с данными натурных измерений содержания углерода в почве.

На рис. 7 демонстрируется довольно хорошее совпадение результатов. Все три модели — INMCM, SOCS, RothC — имеют небольшое значение среднеквадратичного отклонения: 0.135, 0.068, 0.133 по отношению к натурным измерениям содержания углерода в почве. Одна из причин такого поведения — это линейный тренд изменения содержания углерода в почве. Данные модели довольно успешно воспроизводят случаи, в которых нет резких отклонений от линии тренда изменения. Также все три модели калибровались под этот случай внешних данных.

В расчетах, связанных с внешними данными ДАОС 3 (рис. 8), наблюдается значительное расхождение между результатами вычислений всех моделей и данными натурных измерений содержания углерода в почве.

Результаты численных экспериментов показывают, что модели не воспроизводят наблюдаемые колебания содержания углерода, а демонстрируют более плавную динамику. При этом основные предикторы моделей (поступление опада, температура, влажность) также характеризуются плавной динамикой и не демонстрируют корреляцию с колебаниями в данных наблюдений. С этой точки зрения модели ведут себя ожидаемым образом. Причинами отклонения моделей от данных наблюдений могут быть, например, неучет значимых процессов в структуре моделей, изменения методики или трудно объяснимые причины отклонений результатов наблюдений в отдельные годы от общего направления изменений.

Ни одна из моделей не может воспроизвести изменения запасов углерода в почве в соответствии с данными натурных измерений. Значения среднеквадратичного отклонения для моделей INMCM, SOCS, RothC в данном расчете составили: 0.455, 0.291, 0.357 соответственно.

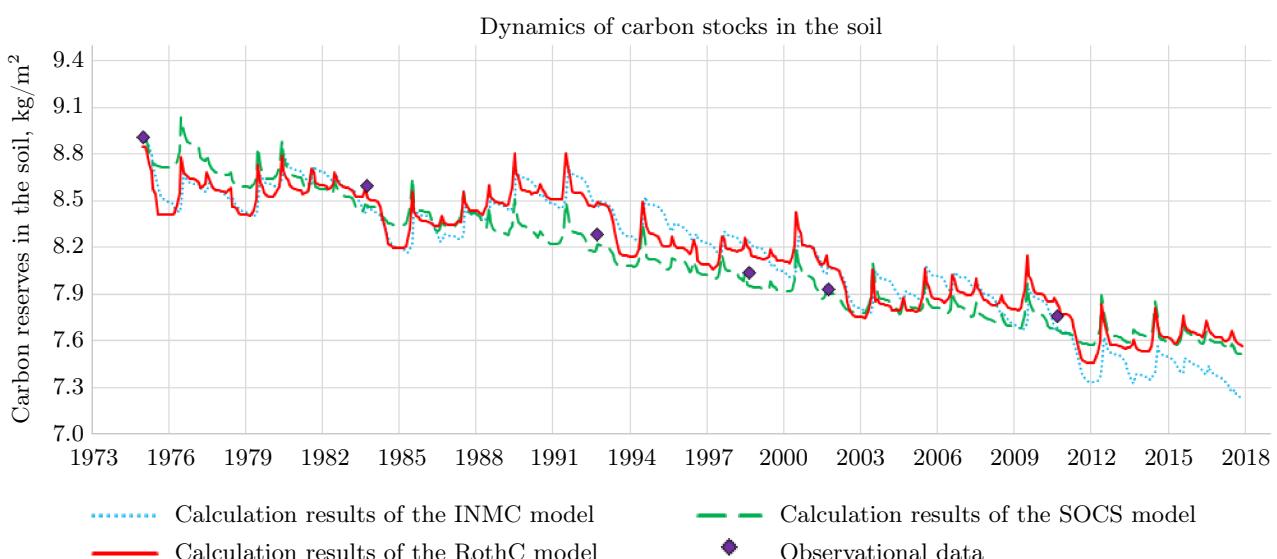


Рис. 7. Результат расчетов КМУЦ на основе данных ФАНЦ, моделей INMCM, SOCS и RothC

Fig. 7. The result of constructor calculations based on data from FANC and INMCM, SOCS, RothC models

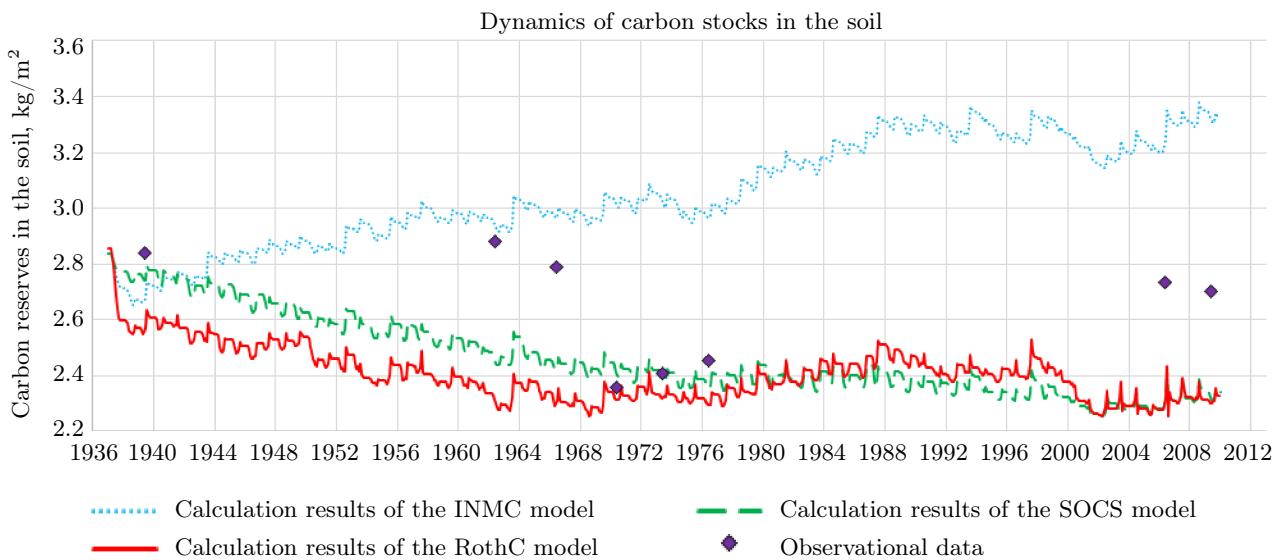


Рис. 8. Результат расчетов КМУЦ на основе данных ДАОС 3, моделей INMCM, SOCS и RothC

Fig. 8. The result of constructor calculations based on data from DAES 3 and INMCM, SOCS, RothC models

По мнению коллектива авторов, причина расхождения результатов модели с данными наблюдений заключается в особенностях проведения измерения (возможно, изменилась методика наблюдений либо произошло незадокументированное удаление части верхнего слоя почвы), поскольку характерные времена известных естественных процессов разложения и переноса углерода в почве не соответствуют наблюдаемому на рис. 8 падению полного органического углерода на 15% между 1966 и 1970 гг.

**6. Заключение.** Углеродный цикл почвы играет ключевую роль в климатических процессах, однако существующие модели углеродного цикла имеют ограниченную гибкость, а их применение на практике требует глубоких знаний программирования. Это затрудняет использование моделей в различных научных и прикладных задачах. Целью работы является разработка конструктора моделей углеродного цикла почвы, позволяющего пользователям без специализированных навыков программирования выбирать и настраивать модели под конкретные условия.

Конструктор реализован на языке Fortran 2008, и сейчас в него включены три модели углеродного цикла: INMCM, SOCS и RothC. Конструктор предоставляет интерфейс для задания пулов углерода, потоков между ними и множителей, описывающих скорость переходов. Пользователь имеет возможность настраивать модель через текстовый файл, выбирая параметры сетки, значение временного шага и входные данные. Для численного решения уравнений используется схема расщепления по времени.

Проведены численные эксперименты на основе данных полевых опытов, проведенных агрохимическими научными станциями ФАНЦ и ДАОС 3 с использованием реализованных моделей. Результаты показали хорошее соответствие с натурными измерениями для опыта ФАНЦ (среднеквадратичное отклонение для моделей INMCM, SOCS и RothC составило 0.135, 0.068 и 0.133 соответственно). Однако между результатами моделирования и опытными данными, полученными на станции ДАОС 3, наблюдались значительные расхождения.

Конструктор позволяет гибко настраивать модели углеродного цикла, что упрощает их применение в исследованиях и мониторинге. Для повышения точности планируется расширить набор моделей и улучшить параметризацию процессов. В планах коллектива добавление новых моделей (например, ROMUL) и учет процессов адвекции и диффузии растворенного вещества (углеродсодержащие соединения, влага и иные компоненты) в почвах.

Также предусмотрена интеграция конструктора в модель Земной системы за счет сопряжения конструктора и программного кода модели деятельного слоя суши TerM, где внешними данными для работы конструктора будут данные, полученные из TerM. Они будут использоваться конструктором для расчета значений пулов и потоков на каждом шаге по времени, а затем передаваться обратно в программу TerM.



В настоящее время реализация конструктора моделей углеродного цикла представляет собой рабочий программный комплекс, выполняющий простые вычисления по углеродному циклу, но в перспективе он должен стать полноценной системой для выполнения сложных комплексных расчетов по совершенно разным моделям углеродного цикла с простым и понятным пользовательским интерфейсом.

## Список литературы

1. Комаров А.С., Чертков О.Г., Михайлов А.В. и др. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007.
2. Ågren G.I., Bosatta E. Reconciling differences in predictions of temperature response of soil organic matter // Soil Biol. Biochem. 2002. **34**, N 1. 129–132. doi [10.1016/S0038-0717\(01\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00156-0).
3. Piao S., Sitch S., Ciais P., et al. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO<sub>2</sub> trends // Glob. Chang. Biol. 2013. **19**, N 7. 2117–2132. doi [10.1111/gcb.12187](https://doi.org/10.1111/gcb.12187).
4. Garsia A., Moinet A., Vazquez C., et al. The challenge of selecting an appropriate soil organic carbon simulation model: a comprehensive global review and validation assessment // Global Change Biology. 2023. **29**, N 20. 5760–5774. doi [10.1111/gcb.16896](https://doi.org/10.1111/gcb.16896).
5. Рыжова И.М., Романенков В.А., Степаненко В.М. Современное развитие моделей динамики органического вещества почв (обзор) // Вестник Московского ун-та. Серия 17. Почвоведение. 2024. **79**, № 4. 122–129. doi [10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-122-129](https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-122-129).
6. Coleman K., Jenkinson D. RothC-26.3 – a model for the turnover of carbon in soil // Evaluation of Soil Organic Matter Models. Vol. 38. Berlin: Springer, 1996. 237–246. doi [10.1007/978-3-642-61094-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_17).
7. Del Grosso S.J., Parton W.J., Adler P.R., et al. DayCent model simulations for estimating soil carbon dynamics and greenhouse gas fluxes from agricultural production systems // Managing Agricultural Greenhouse Gases. New York: Elsevier, 2012. 241–250. doi [10.1016/b978-0-12-386897-8.00014-0](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386897-8.00014-0).
8. Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Abakumov E.V. Application of the ROMUL mathematical model for estimation of CO<sub>2</sub> emission and dynamics of organic matter in the subantarctic lithozems // Eurasian Soil Science. 2022. **55**. 413–424. doi [10.1134/S1064229322040123](https://doi.org/10.1134/S1064229322040123).
9. Рыжова И.М. Анализ динамики органического вещества почв на основе минимальных моделей круговорота углерода // Почвы-стратегический ресурс России: тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв (Сыктывкар, 2020–2022 гг.). Часть 2. Москва–Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2021. 130–131.
10. Gilhespy S.L., Anthony S., Cardenas L., et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): model evolution // Ecological Modelling. 2014. **292**. 51–62. doi [10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004).
11. Abramoff R.Z., Guenet B., Zhang H., et al. Improved global-scale predictions of soil carbon stocks with millennial version 2 // Soil Biol. Biochem. 2022. **164**. Article Number 108466. doi [10.1016/j.soilbio.2021.108466](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108466).
12. Tupek B., Lehtonen A., Yurova A., et al. Modelling boreal forest's mineral soil and peat C dynamics with the Yasso07 model coupled with the Ricker moisture modifier // Geosci. Model Development. 2024. **17**. 5349–5367. doi [10.5194/gmd-17-5349-2024](https://doi.org/10.5194/gmd-17-5349-2024).
13. Павлова В.Н. Продуктивность зерновых культур в России при изменении агроклиматических ресурсов в 20–21 веках // Диссертация на соискание ученой степени доктор географических наук: 25.00.30. М.: ФГБУ ВНИИСХМ, 2021.
14. Poluektov R.A., Fintushal S.M., Oparina I.V., et al. Agrotool — a system for crop simulation // Arch. Agron. Soil Sci. 2002. **48**, N 6. 609–635.
15. Nendel C. MONICA: a simulation model for nitrogen and carbon dynamics in agro-ecosystems // Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land and water resources in agricultural landscapes of Central Asia. Cham: Springer, 2014. 389–405. doi [10.1007/978-3-319-01017-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5_23).
16. Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., et al. The DSSAT cropping system model // Eur. J. Agron. 2003. **18**, N 3–4. 235–265. doi [10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7).
17. Hadiya N.J., Kumar N., Mote B.M. Use of WOFOST model in agriculture – a review. Agric. Rev. 2018. **39**, N 3. 234–240. <https://arccjournals.com/journal/agricultural-reviews/R-1691>. Cited July 27, 2025.
18. Best M.J., Pryor M., Clark D.B., et al. The joint UK land environment simulator (JULES), model description – Part 1: energy and water fluxes // Geosci. Model Dev. 2011. **4**, N 3. 677–699. doi [10.5194/gmd-4-677-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-677-2011).
19. Clark D.B., Mercado L.M., Sitch S., et al. The joint UK land environment simulator (JULES), model description – Part 2: carbon fluxes and vegetation // Geosci. Model Dev. 2011. **4**, N 3. 701–722. doi [10.5194/gmd-4-701-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-701-2011).
20. Wiltshire A.J., Burke E.J., Chadburn S.E., et al. JULES-CN: a coupled terrestrial carbon-nitrogen scheme (JULES vn5.1) // Geosci. Model Dev. 2021. **14**, N 4. 2161–2186. doi [10.5194/gmd-14-2161-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-2161-2021).

21. Cox P.M. Description of the TRIFFID dynamic global vegetation model. Hadley Centre Technical Note 24, Met Office, UK. 2001. <https://jules.jchmr.org/sites/default/files/2023-06/JULES-HCTN-24.pdf>. Cited July 27, 2025.
22. Oleson K.W., Dai Y.J., Bonan G.B., et al. Technical description of the community land model (CLM). Published by National Center for Atmospheric Research, Boulder, 2004.
23. Melton J.R., Arora V.K., Wisernig-Cojoc E., et al. CLASSIC v1.0: the open-source community successor to the Canadian Land Surface Scheme (CLASS) and the Canadian Terrestrial Ecosystem Model (CTEM) — Part 1: Model framework and site-level performance // Geosci. Model Dev. 2020. **13**, N 6. 2825–2850. doi [10.5194/gmd-13-2825-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-2825-2020).
24. Asaadi A. and Arora V.K. Implementation of nitrogen cycle in the CLASSIC land model // Biogeosciences. 2021. **18**, N 2. 669–706. doi [10.5194/bg-18-669-2021](https://doi.org/10.5194/bg-18-669-2021).
25. Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudré N., et al. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system // Glob. Biogeochem. Cycles. 2005. **19**, N 1. Article ID GB1015. doi [10.1029/2003GB002199](https://doi.org/10.1029/2003GB002199).
26. Boussetta S., Balsamo G., Arduini G., et al. ECLand: the ECMWF land surface modelling system // Atmosphere. 2021. **12**, N 6. Article Number 723. doi [10.3390/atmos12060723](https://doi.org/10.3390/atmos12060723).
27. 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. 363–377. doi [10.1515/rnam-2024-0031](https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0031).
28. Volodin E.M., Blagodatskikh D.V., Bragina V.V., et al. Computational framework for the Earth system modelling and the INM-CM6 climate model implemented on its base // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. 2024. **39**, N 6. 379–392. doi [10.1515/rnam-2024-0032](https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0032).
29. Travova S.V., Stepanenko V.M., Medvedev A.I., et al. Quality of soil simulation by the INM RAS–MSU soil scheme as a part of the SL-AV weather prediction model // Russ. Meteorol. Hydrol. 2022. **47**, N 3. 159–173. doi [10.3103/S1068373922030013](https://doi.org/10.3103/S1068373922030013).
30. Yin X., Struik P.C. C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> photosynthesis models: an overview from the perspective of crop modelling // NJAS: Wagening. J. Life Sci. 2009. **57**, N 1. 27–38. doi [10.1016/J.NJAS.2009.07.001](https://doi.org/10.1016/J.NJAS.2009.07.001).
31. Farquhar G.D., von Caemmerer S., Berry J.A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species // Planta. 1980. **149**, N 1. 78–90. doi [10.1007/BF00386231](https://doi.org/10.1007/BF00386231).
32. Network Common Data Form (NetCDF). <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>. Cited July 31, 2025.
33. Лаборатория географической сети. <https://www.vniia-pr.ru/laboratori/otdl-geoseti/lab-geogr-seti/>. Cited July 31, 2025.
34. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present // 2023. Copernicus Climate Change Service (C3S). Climate Data Store (CDS). doi [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47).

Получена  
18 июня 2025 г.

Принята  
23 июля 2025 г.

Опубликована  
26 августа 2025 г.

### Информация об авторах

*Георгий Михайлович Файкин* — аспирант, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1, стр. 4, 119234, 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.

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

*Сюмбель Камилевна Шангареева* — аспирант, стажер-исследователь; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1, стр. 4, 119234, Москва, Российская Федерация.



Ирина Михайловна Рыжова — д.биол.н., профессор; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения, Ленинские Горы, 1, стр. 12, 119234, Москва, Российская Федерация.

Владимир Аркадьевич Романенков — д.биол.н., заведующий кафедрой; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения, Ленинские Горы, 1, стр. 12, 119234, Москва, Российская Федерация.

Ильшат Талгатович Хусниев — аспирант, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения, Ленинские Горы, 1, стр. 12, 119234, Москва, Российская Федерация.

## References

1. A. S. Komarov, O. G. Chertov, A. V. Mikhailov, et al., *Modeling the Dynamics of Organic Matter in Forest Ecosystems* (Nauka, Moscow, 2007) [in Russian].
2. G. I. Ågren and E. Bosatta, “Reconciling Differences in Predictions of Temperature Response of Soil Organic Matter,” *Soil Biol. Biochem.* **34** (1), 129–132 (2002). doi [10.1016/S0038-0717\(01\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00156-0).
3. S. Piao, S. Sitch, P. Ciais, et al., “Evaluation of Terrestrial Carbon Cycle Models for Their Response to Climate Variability and to CO<sub>2</sub> Trends,” *Glob. Chang. Biol.* **19** (7), 2117–2132 (2013). doi [10.1111/gcb.12187](https://doi.org/10.1111/gcb.12187).
4. A. Garsia, A. Moinet, C. Vazquez, et al., “The Challenge of Selecting an Appropriate Soil Organic Carbon Simulation Model: A Comprehensive Global Review and Validation Assessment,” *Glob. Chang. Biol.* **29** (20), 5760–5774 (2023). doi [10.1111/gcb.16896](https://doi.org/10.1111/gcb.16896).
5. I. M. Ryzhova, V. A. Romanenkov, and V. M. Stepanenko, “Modern Development of Soil Organic Matter Dynamics Models (Review),” *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* **79** (4), 493–499 (2024). doi [10.3103/S0147687424700467](https://doi.org/10.3103/S0147687424700467).
6. K. Coleman and D. Jenkinson, “RothC-26.3 — A Model for the Turnover of Carbon in Soil,” in *Evaluation of Soil Organic Matter Models* (Springer, Berlin, 1996), Vol. 38, pp. 237–246. doi [10.1007/978-3-642-61094-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_17).
7. S. J. Del Gross, W. J. Parton, P. R. Adler, et al., “DayCent Model Simulations for Estimating Soil Carbon Dynamics and Greenhouse Gas Fluxes from Agricultural Production Systems,” in *Managing Agricultural Greenhouse Gases* (Elsevier, New York, 2012), pp. 241–250. doi [10.1016/b978-0-12-386897-8.00014-0](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386897-8.00014-0).
8. M. A. Nadporozhskaya, S. S. Bykhovets, and E. V. Abakumov, “Application of the ROMUL Mathematical Model for Estimation of CO<sub>2</sub> Emission and Dynamics of Organic Matter in the Subantarctic Lithozems,” *Eurasian Soil Sci.* **55**, 413–424 (2022). doi [10.1134/S1064229322040123](https://doi.org/10.1134/S1064229322040123).
9. I. M. Ryzhova, “Analysis of Soil Organic Matter Dynamics Based on Minimal Carbon Cycle Models,” in *Soils are a Strategic Resource of Russia: Abstracts of the VIII Congress of the V.V. Dokuchaev Society of Soil Scientists and the School of Young Scientists on Soil Morphology and Classification (Syktyvkar, 2020–2022). Part 2*. Moscow—Syktyvkar: IB FITZ Komi NC UrO RAS, 2021. 130–131 [in Russian].
10. S. L. Gilhespy, S. Anthony, L. Cardenas, et al., “First 20 Years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model Evolution,” *Ecol. Model.* **292**, 51–62 (2014). doi [10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004).
11. R. Z. Abramoff, B. Guenet, H. Zhang, et al., “Improved Global-Scale Predictions of Soil Carbon Stocks with Millennial Version 2,” *Soil Biol. Biochem.* **164**, Article Number 108466 (2022). doi [10.1016/j.soilbio.2021.108466](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108466).
12. B. Tupek, A. Lehtonen, A. Yurova, et al., “Modelling Boreal Forest’s Mineral Soil and Peat C Dynamics with the Yasso07 Model Coupled with the Ricker Moisture Modifier,” *Geosci. Model Dev.* **17**, 5349–5367 (2024). doi [10.5194/gmd-17-5349-2024](https://doi.org/10.5194/gmd-17-5349-2024).
13. V. N. Pavlova, *Productivity of Grain Crops in Russia with Changes in Agro-Climatic Resources in the 20th and 21st Centuries*, Doctoral Thesis in Geographical Sciences (Federal State Budgetary Institution “VNIISHM”, Moscow, 2021) [in Russian].
14. R. A. Poluektov, S. M. Fintushal, I. V. Oparina, et al., “Agrotool — A System for Crop Simulation,” *Arch. Agron. Soil Sci.* **48** (6), 609–635 (2002). doi [10.1080/0365034021000041597](https://doi.org/10.1080/0365034021000041597).
15. C. Nendel, “MONICA: A Simulation Model for Nitrogen and Carbon Dynamics in Agro-Ecosystems,” in *Novel Measurement and Assessment Tools for Monitoring and Management of Land and Water Resources in Agricultural Landscapes of Central Asia* (Springer, Cham, 2014), pp. 389–405. doi [10.1007/978-3-319-01017-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5_23).
16. J. W. Jones, G. Hoogenboom, C. H. Porter, et al., “The DSSAT Cropping System Model,” *Eur. J. Agron.* **18** (3–4), 235–265 (2003). doi [10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7).

17. N. J. Hadiya, N. Kumar, and B. M. Mote, “Use of WOFOST Model in Agriculture – A Review,” *Agric. Rev.* **39** (3), 234–240 (2018). <https://arccjournals.com/journal/agricultural-reviews/R-1691>. Cited July 27, 2025.
18. M. J. Best, M. Pryor, D. B. Clark, et al., “The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), Model Description — Part 1: Energy and Water Fluxes,” *Geosci. Model Dev.* **4** (3), 677–699 (2011). doi [10.5194/gmd-4-677-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-677-2011).
19. D. B. Clark, L. M. Mercado, S. Sitch, et al., “The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), Model Description - Part 2: Carbon Fluxes and Vegetation,” *Geosci. Model Dev.* **4** (3), 701–722, (2011). doi [10.5194/gmd-4-701-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-701-2011).
20. A. J. Wiltshire, E. J. Burke, S. E. Chadburn, et al., “JULES-CN: a Coupled Terrestrial Carbon-Nitrogen Scheme (JULES vn5.1),” *Geosci. Model Dev.* **14** (4), 2161–2186, (2021). doi [10.5194/gmd-14-2161-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-2161-2021).
21. P. M. Cox, *Description of the TRIFFID Dynamic Global Vegetation Model* (Hadley Centre Technical Note 24, Met Office, UK, 2001). <https://jules.jchmr.org/sites/default/files/2023-06/JULES-HCTN-24.pdf>. Cited July 27, 2025.
22. K. W. Oleson, Y. J. Dai, G. B. Bonan, et al., *Technical Description of the Community Land Model (CLM)*. Published by National Center for Atmospheric Research, Boulder, 2004.
23. J. R. Melton, V. K. Arora, E. Wisernig-Cojoc, et al., “CLASSIC v1.0: The Open-Source Community Successor to the Canadian Land Surface Scheme (CLASS) and the Canadian Terrestrial Ecosystem Model (CTEM) — Part 1: Model Framework and Site-Level Performance,” *Geosci. Model Dev.* **13** (6), 2825–2850 (2020). doi [10.5194/gmd-13-2825-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-2825-2020).
24. A. Asaadi and V. K. Arora, “Implementation of Nitrogen Cycle in the CLASSIC Land Model,” *Biogeosciences* **18** (2), 669–706 (2021). doi [10.5194/bg-18-669-2021](https://doi.org/10.5194/bg-18-669-2021).
25. G. Krinner, N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, et al., “A Dynamic Global Vegetation Model for Studies of the Coupled Atmosphere-Biosphere System,” *Glob. Biogeochem. Cycles* **19** (1), Article ID GB1015 (2005). doi [10.1029/2003GB002199](https://doi.org/10.1029/2003GB002199).
26. S. Boussetta, G. Balsamo, G. Arduini, et al., “ECLand: The ECMWF Land Surface Modelling System,” *Atmosphere* **12** (6), Article Number 723 (2021). doi [10.3390/atmos12060723](https://doi.org/10.3390/atmos12060723).
27. 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), 363–377 (2024). doi [10.1515/rnam-2024-0031](https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0031).
28. E. M. Volodin, D. V. Blagodatskikh, V. V. Bragina, et al., “Computational Framework for the Earth System Modelling and the INM-CM6 Climate Model Implemented on Its Base,” *Russ. J. Numer. Anal. Math. Model.* **39** (6), 379–392 (2024). doi [10.1515/rnam-2024-0032](https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0032).
29. S. V. Travova, V. M. Stepanenko, A. I. Medvedev, et al., “Quality of Soil Simulation by the INM RAS–MSU Soil Scheme as a Part of the SL-AV Weather Prediction Model,” *Russ. Meteorol. Hydrol.* **47** (3), 159–173 (2022). doi [10.3103/S1068373922030013](https://doi.org/10.3103/S1068373922030013).
30. X. Yin and P. C. Struik, “C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> Photosynthesis Models: An Overview from the Perspective of Crop Modelling,” *NJAS: Wagening. J. Life Sci.* **57** (1), 27–38 (2009). doi [10.1016/J.NJAS.2009.07.001](https://doi.org/10.1016/J.NJAS.2009.07.001).
31. G. D. Farquhar, S. von Caemmerer, and J. A. Berry, “A Biochemical Model of Photosynthetic CO<sub>2</sub> Assimilation in Leaves of C<sub>3</sub> Species,” *Planta* **149** (1), 78–90 (1980). doi [10.1007/BF00386231](https://doi.org/10.1007/BF00386231).
32. Network Common Data Form (NetCDF). <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>. Cited July 27, 2025.
33. Geographic Network Laboratory <https://www.vniia-pr.ru/laboratori/otdl-geoseti/lab-geogr-seti/>. Cited July 27, 2025.
34. H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, et al., “ERA5 Hourly Data on Single Levels from 1940 to Present,” Copernicus Climate Change Service (C3S). Climate Data Store (CDS) (2023). doi [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47).

Received  
June 18, 2025

Accepted  
July 23, 2025

Published  
August 26, 2025

### Information about the authors

*George M. Faykin* — Graduate Student, Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Leninskie Gory, 1, building 4, 119234, Moscow, Russia.

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



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

*Siumbel K. Shangareeva* — Graduate Student, Intern Researcher; Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Leninskie Gory, 1, building 4, 119234, Moscow, Russia.

*Irina M. Ryzhova* — Dr. Sci., Professor; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Leninskie Gory, 1, building 12, 119234, Moscow, Russia.

*Vladimir A. Romanenkov* — Dr. Sci., Head of the Department; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Leninskie Gory, 1, building 12, 119234, Moscow, Russia.

*Ilshat T. Khusniev* — Graduate Student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Leninskie Gory, 1, building 12, 119234, Moscow, Russia.