

Разработка веб-сервисов для комплексного исследования окружающей среды на основе открытых стандартов моделирования

Александр Б. Столбов¹

¹Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН), ул. Лермонтова 134, Иркутск, Россия

Аннотация

Статья посвящена разработке прототипов веб-сервисов для комплексного моделирования окружающей среды, ориентированных на исследования Байкальской природной территории (БПТ). Предлагаемое решение основано на открытых стандартах моделирования (BMI - Basic Model Interface) и форматах данных (NetCDF), интегрированных в геопортал ИДСТУ СО РАН. Описаны ключевые типы сервисов: предобработки данных, конвертации и агрегации данных, а также реализации стандарта BMI. Практическая применимость демонстрируется на примере гидрологической модели MOSART-WM, реализующей сквозной цикл сценарного моделирования от исходных данных до визуализации результатов с использованием цифровой платформы геопортала.

Ключевые слова

Комплексное исследование окружающей среды, открытые стандарты моделирования, веб-сервисы, геопортал

1. Введение

Современные исследования в области комплексного моделирования окружающей среды требуют не только развития математических моделей, но и создания масштабируемой и доступной инфраструктуры, способной объединить многочисленные данные и обеспечить их оперативную обработку. В последние годы наметился устойчивый переход от локальных вычислительных сред к облачным веб-сервисам, предоставляющим доступ к моделям и их компонентам через стандартизированные интерфейсы. Ключевой проблемой практического применения такого подхода остается сложность интеграции разнородных источников данных и моделей. Решение этой проблемы требует создания единой среды, чему посвящены коллективные усилия научного сообщества, в частности развитие такой междисциплинарной дисциплины как комплексное моделирование окружающей среды (Integrated Environmental Modeling – IEM) [1-3].

Суть IEM заключается в создании методологии, требующей интеграции разнородных компонентов, включая математические модели различных природных и антропогенных процессов, пространственные данные, результаты мониторинга и сценарии воздействий для изучения взаимозависимости между экологическими, гидрологическими, атмосферными и социально-экономическими факторами. Конечной целью является получение научно обоснованных прогнозов состояния окружающей среды и оценки последствий природных или антропогенных изменений в зависимости от различных условий.

7th International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2025), July 7–11, 2025, Irkutsk, Russia

EMAIL: stolboff@icc.ru (A. 1)

ORCID: 0000-0001-6513-7030 (A. 1)



© 2025 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ICCS-DE 2025 Workshop Proceedings

DOI: 10.47350/ICCS-DE.2025.16

Задача разработки веб-сервисов является естественным развитием результатов, полученных при создании информационной системы о математических моделях окружающей среды, поддерживающих открытые стандарты моделирования – ИС КМОС [4]. Данная статья вносит вклад в это направление в контексте разрабатываемой в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ цифровой платформы исследования Байкальской природной территории (БПТ).

2. Веб-сервисы для комплексного исследовании окружающей среды

Основная задача разработки веб-сервисов предоставить унифицированный и доступный через веб-интерфейс инструментарий для выполнения полного цикла сценарного анализа, опираясь на открытые стандарты моделирования [5-6] и концепции, заложенные в концептуальной модели комплексного моделирования окружающей среды (КМ КМОС) [4, 7]. Так, элементы КМ КМОС описывают информацию о требованиях к вычислительной инфраструктуре и совместимости типов данных и форматов файлов; специфике применяемых каркасов моделирования; о характеристиках математических уравнений, численных методов, ограничениях на область определения переменных состояния и допустимые диапазоны параметров моделей

В настоящем исследовании основными системами, к изучению которых будут применяться разрабатываемые сервисы, являются объекты Байкальской природной территории, а в качестве целевой информационно-коммуникационной платформы используется геоportal ИДСТУ СО РАН [8]. Таким образом, предлагаемые сервисы для комплексного исследовании окружающей среды фактически будут сервисами геоportала с расширенной функциональностью, обеспечивающейся за счёт возможностей ИС КМОС. В качестве целевого стандарта выбран BMI (Basic Model Interface) – это открытый и унифицированный программный интерфейс, разработанный сообществом CSDMS (Community Surface Dynamics Modeling System) [5], так как по результатам предыдущего анализа [4] является на данный момент наиболее популярным и активно используемым или планируемым к внедрению в среде специалистов.

Рассмотрим принципиальную схему взаимодействия пользователей с сервисами на примере некоторой пространственно-распределённой модели объекта окружающей среды, представленную на рисунке 1.

Основными источниками данных являются:

- Внешние хранилища включают цифровые модели рельефа (DEM), данные дистанционного зондирования, климатические ряды, карты землепользования и другие геопространственные данные, релевантные для БПТ.
- Эксперт идентифицирует и предоставляет специфические параметры моделирования, например, специалист-гидролог может указать коэффициент Маннинга для различных типов поверхности и каналов, точки стока, параметры водохранилищ и др. Эксперт также оценивает качество исходных и подготовленных данных.

Основными типами сервисов являются:

1. Сервисы предобработки данных получают сырые данные (например, DEM) и выполняют критически важные преобразования. Например, на основе библиотеки `pysheds` [9] может быть реализована следующая функциональность:
 - устранение артефактов-впадин в DEM для обеспечения непрерывного стока;
 - обработка плоских участков DEM, добавление минимальных уклонов для определения направления стока;
 - расчет направлений стока (формат D8);
 - автоматическое или полуавтоматическое (с заданием точки стока экспертом) выделение границ водосборных бассейнов;
 - расчет накопленного стока (upstream area);
 - извлечение структуры речной сети по заданным пороговым значениям накопленного стока.
2. Сервисы конвертации и агрегации преобразуют обработанные геопространственные данные и другие входные данные в форматы, требуемые конкретной моделью. Например, для

большинства моделей, поддерживающих открытые стандарты моделирования, применяются следующие форматы:

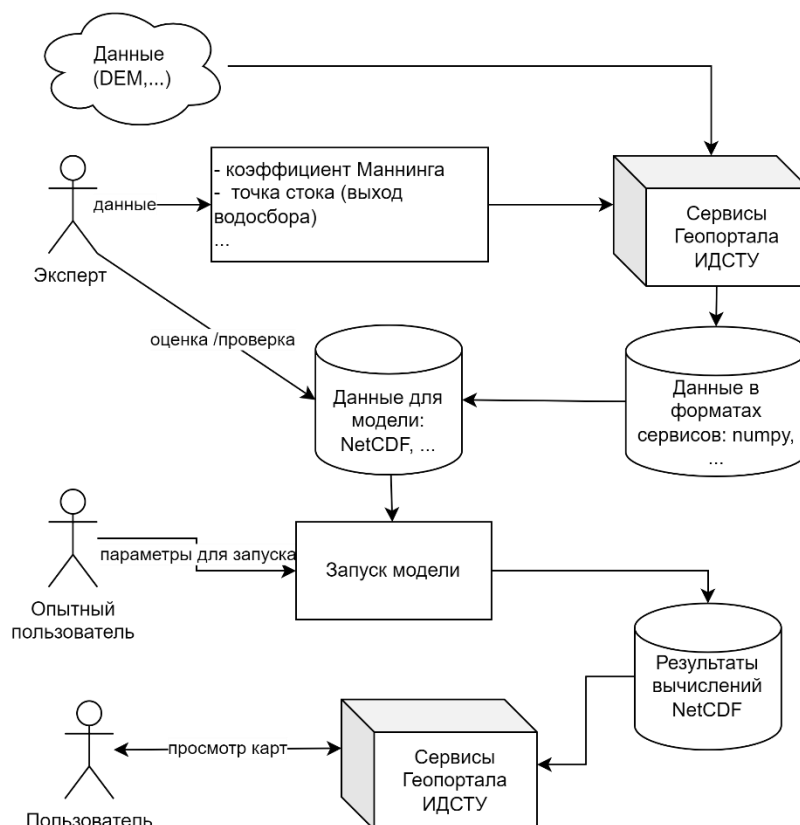


Рисунок 1: Прототип схемы взаимодействия пользователей с сервисами геопортала ИДСТУ СО РАН на примере гидрологической модели.

- NetCDF (Network Common Data Form) – основной целевой формат для описания входных/выходных данных и параметров для вычислительных моделей ИМЕ. При этом сервисы должны учитывать CF-conventions (Climate and Forecast Metadata Conventions): набор рекомендаций и стандартов для оформления метаданных в файлах NetCDF, разработанный для обеспечения совместимости, переносимости и однозначного понимания климатических, гидрологических, океанографических и других геофизических наборов данных.
 - Популярные сервисы визуализации используют numpy, GeoTIFF, GeoJSON.
2. Сервисы для реализации открытого стандарта моделирования как минимум должны включать следующие методы:
- Методы для управление процессом вычислений: update(), initialize() и т.п.
 - Методы для управление данными (переменными и параметрами) модели: get_start_time(), set_value(...), get_input_var_names() и т.п.
 - Методы для управления стекой (каждая переменная модели определяется с привязкой к 1D, 2D или 3D): get_var_location(...), get_var_grid(...) и т.п.

Основными типами пользователей являются:

- Эксперт – участвует на этапе настройки параметров запуска, может выполнять предварительные запуски для оценки адекватности данных и параметров перед основными расчетами.
- Опытный пользователь – задаёт параметры запуска, выбирает подготовленный набор входных данных и запускает модель через сервис.
- Обычный пользователь – просматривает исходные и подготовленные данные на интерактивной карте; запускает predetermined сценарии визуализации (карты,

временные графики) для результатов моделирования; проводит сравнительный анализ разных сценариев; экспортирует данные и графики.

3. Иллюстративный пример

В качестве иллюстративного примера была выбрана MOSART-WM (Model for Scale Adaptive River Transport – Water Management) [10] вычислительная гидрологическая модель, предназначенная для расчёта речного стока и управления водохранилищами в составе комплексных ESM (Earth System Models). В настоящее время тестирование работы сервисов осуществляется на условных данных. Результаты приведены на рисунках 2 и 3.

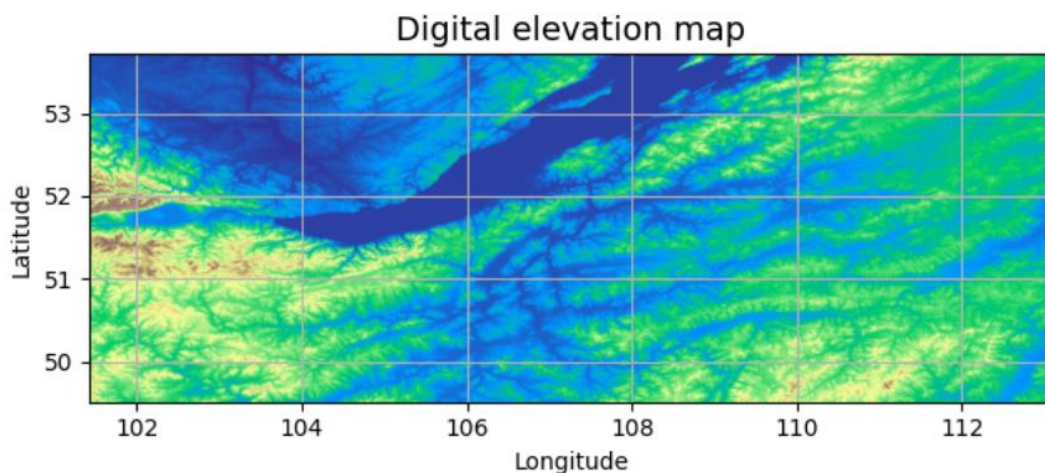


Рисунок 2: Пример применения сервиса для расчёта направления стока (на условных данных)

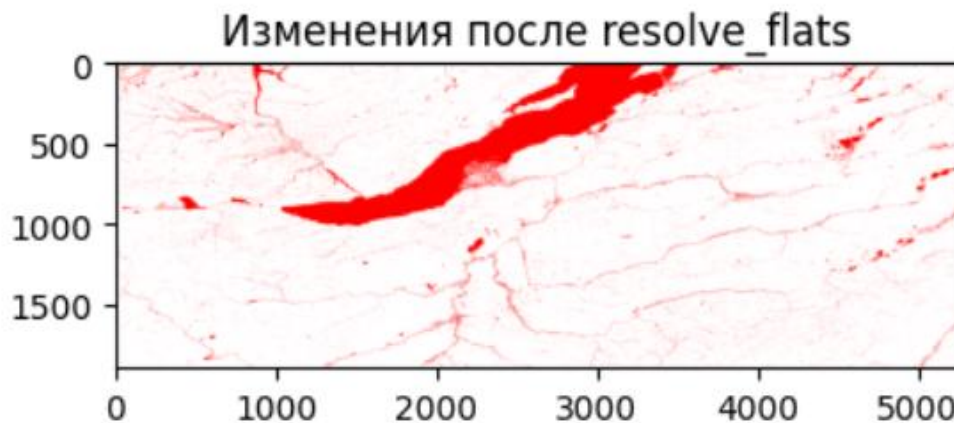


Рисунок 3: Пример применения сервиса для устранения плоских участков (на условных данных)

Модель обладает следующими отличительными особенностями: поддержка BMI API; адаптивный временной шаг (один цикл базовой модели разбивается на 3 шага MOSART; внутри каждого шага расчёта стока со склона выполняется 4 шага вычислений относительно русла; локальное изменение шага по уклону, ширине и длине канала); масштабируемость – работает на разрешениях от 1 км (локальные бассейны) до 100 км (глобальные расчёты). Библиотеки для расчётов по модели были успешно установлены и запущены на цифровой платформе геоportала ИДТСУ СО РАН. При этом в качестве модели рельефа также были использованы данные геоportала.

4. Заключение

В статье представлены первые результаты автора по разработки прототипов веб-сервисов для комплексного моделирования окружающей среды на основе программных библиотек, реализующих открытые стандарты моделирования, в частности на данный момент применялись NetCDF (для хранения и обмена данными) и BMI (для организации вычислений).

Для демонстрации принципиальной возможности применения созданных прототипов была выбрана простая гидрологическая модель MOSART-WM. На её основе был реализован сквозной цикл сценарного моделирования: от исходных данных (DEM) через сервисы предобработки и формирования входных NetCDF файлов до запуска вычислений на цифровой платформе геопортала ИДСТУ СО РАН.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

6. References

- [1] R. Argent, An overview of model integration for environmental applications - Components, frameworks and semantics, *Environmental Modelling & Software* 19 (2004) 219–234. doi: 10.1016/S1364-8152(03)00150-6.
- [2] R. Moore, A. Hughes, Integrated environmental modelling: Achieving the vision, *Geological Society London Special Publications* 408 (2016) 17–34. doi:10.1144/SP408.12.
- [3] T. Iwanaga, H.H. Wang, S.H. Hamilton, V. Grimm, T.E. Koralewski, A. Salado, S. Elsayah, S. Razavi, J. Yang, P. Glynn, J. Badham, A. Voinov, M. Chen, W.E. Grant, T.R. Peterson, K. Frank, G. Shenk, C.M. Barton, A.J. Jakeman, J.C. Little, Socio-technical scales in socio-environmental modeling: Managing a system-of-systems modeling approach, *Environmental Modelling & Software* 135 (2021).
- [4] Столбов А.Б. Разработка информационной системы о математических моделях окружающей среды, поддерживающих открытые стандарты моделирования, Материалы VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2024), 1-5 июля, 2024, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024. С.34-38.
- [5] G.E. Tucker, E.W.H. Hutton, M.D. Piper, B. Campforts, T. Gan, K.R. Barnhart, A.J. Kettner, I. Overeem, S.D. Peckham, L. McCready, J. Syvitski, CSDMS: a community platform for numerical modeling of Earth surface processes, 2022. doi:10.5194/gmd-15-1413-2022.
- [6] Q. Harpham, A. Hughes, R.V. Moore, Introductory Overview: The OpenMI 2.0 Standard for Integrating Numerical Models, *Environmental Modelling & Software* 122 (2019) 1–13. doi:10.1016/j.envsoft.2019.104549.
- [7] А.А. Лемперт, А.Б. Столбов, В.В. Козлов, Использование онтологического подхода для интеллектуальной поддержки сценарного моделирования водных объектов Приангарья, *Информационные и математические технологии в науке и управлении* 19 (2020) 14–24. doi: 10.38028/ESI.2020.19.3.002.
- [8] Feoktistov A., Gorsky S., Kostromin R., Fedorov R., Bychkov I. Integration of web processing services with workflow-based scientific applications for solving environmental monitoring problems, *ISPRS International Journal of Geo-Information* (2022). Vol. 11, № 1 DOI: 10.3390/ijgi11010008
- [9] Pysheds – Simple and fast watershed delineation in python, 2025. URL: <https://mattbartos.com/pysheds/>.
- [10] Thurber et al., mosartwmpy: A Python implementation of the MOSART-WM coupled hydrologic routing and water management model, *Journal of Open Source Software* 6 (2021) 3221. <https://doi.org/10.21105/joss.03221>