

УДК 004.9:551.501.45 + 524.3 + 551.583

Веб-ГИС платформа «Климат» для исследования климатических процессов и откликов на них: потенциал и перспективы

Е.П. Гордов, Ю.Е. Гордова, И.Г. Окладников, А.А. Рязанова, А.Г. Титов*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

Кратко описаны история развития и современное состояние созданного в ИМКЭС СО РАН распределенного инструмента анализа больших массивов климатических данных. Потенциал платформы «Климат» иллюстрируется ее применением в области мониторинга происходящих и прогноза возможных в будущем изменений климата Сибири, определения региональных откликов на них, а также подготовки количественной основы для разработки мер по адаптации к ним. Обсуждаются возможные варианты создания виртуальной исследовательской среды и тематических цифровых двойников, позволяющих специалистам в области климатологии и смежных направлений использовать современные информационно-вычислительные технологии и ресурсы для решения фундаментальных и прикладных проблем, вызванных происходящими и прогнозируемыми изменениями климата.

Ключевые слова: информационно-вычислительная инфраструктура, веб-ГИС, изменение климата Сибири, аномалии, климатические индексы, адаптация; information and computing infrastructure, web GIS, Siberia climate change, anomalies, climate indices, adaptation, Siberia.

Введение

Активизация исследования наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений и их последствий для человечества вызвала резкое увеличение объема данных о состоянии окружающей среды и процессах, происходящих в ней. Существенное увеличение количества доступных для анализа данных произошло и благодаря открытию накопленных и пополняемых архивов. Понимание того, что традиционный подход к анализу этих постоянно растущих массивов данных не сможет дать ответы на возникающие вопросы, стимулировало в начале XXI в. развертывание работ по созданию доступных в Интернете инструментов анализа больших массивов геофизических данных. Эти инструменты, ориентированные на возможность обработки и анализа результатов наблюдений и моделирования без их предварительной загрузки из специализированных хранилищ, формируют основу информационно-вычислительной инфраструктуры наук об окружающей среде, которую в последнее время все чаще называют виртуальной исследовательской средой.

Современные распределенные инструменты анализа объединяют потенциал веб- и ГИС-технологий, тем самым обеспечивая учет геопривязанности тематических данных. Первоначально пользователями

таких систем могли быть лишь исследователи, владеющие навыками программирования, поэтому в ряде случаев интерактивность в них достигалась с помощью специально создаваемых языков программирования (см., например, библиотеку климатических данных <https://iridl.ldeo.columbia.edu/>). Однако в последнее время информация о процессах, происходящих в окружающей среде, необходима и представителям тех предметных областей, в которых навыки программирования необязательны. В частности, рост числа таких пользователей вызван тем фактом, что специалисты в различных секторах экономики, лица, принимающие решения, и население осознают необходимость реагировать на изменения климата с целью уменьшения их негативных последствий. Этим обусловлены дополнительные требования к функциональности создаваемых систем.

Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры наук об окружающей среде в мире поддерживается крупными хорошо структурированными программами, финансируемыми либо государством, либо научными фондами. Активно ведутся разработка и развертывание веб-сайтов и порталов, предоставляющих пользователям онлайн-инструменты для пространственно-временного анализа метеорологических и климатических данных. Примером может служить созданный на основе материалов Шестого оценочного доклада МГЭИК IPCC [1] интерактивный атлас (<https://interactive-atlas.ipcc.ch>), который представляет собой инструмент визуализации и анализа наблюдаемых и прогнозируемых

* Евгений Петрович Гордов (gordov@scert.ru); Юлия Евгеньевна Гордова (yulia@scert.ru); Игорь Георгиевич Окладников (oi@scert.ru); Анна Александровна Рязанова (raa@scert.ru); Александр Георгиевич Титов (titov@scert.ru).

характеристик климата. Список таких ресурсов представлен на сайте проекта ClimVis (<https://www.sei.org/projects-and-tools/projects/climvis/>). В России отдельные элементы этой инфраструктуры чаще всего создаются в рамках инициативных проектов.

Один из таких элементов – веб-ГИС платформа «Климат» (<http://climate.scert.ru/>) – аппаратно-программный прототип распределенного инструмента анализа больших массивов климатических данных для поддержки мониторинга природно-климатических изменений, определения региональных откликов на них и создания количественной основы для адаптации к ним. История создания и функциональность предшествующей версии системы 3.0 детально описана в [2]. В настоящей работе мы представим новые открытые для пользователей элементы платформы, функционал недавно созданной версии 4.0 программного обеспечения, а также приведем некоторые результаты анализа климатических изменений на территории Сибири, полученные с ее помощью. Кроме того, кратко обсудим возможные направления развития веб-ГИС «Климат» на основе анализа современных тенденций уменьшения выбросов парниковых газов и планируемого в мире перехода к «безуглеродной» экономике.

В настоящее время с учетом вышеупомянутого расширения круга пользователей климатической информации специализированный геоportal платформы для анализа региональных климатических и экологических изменений обеспечивает открытый доступ к ресурсам разным категориям пользователей.

Студентам и аспирантам профильных специальностей в разделе «Образовательные ресурсы» доступен лекционный курс «Мониторинг и прогнозирование климатических изменений» и методические пособия («Анализ климата будущего» и «Анализ экстремальных показателей региональных изменений климата») к выполняемым в системе вычислительным заданиям, нацеленным на всестороннее изучение современных климатических изменений и их возможных последствий.

Раздел «Для населения» содержит базовый информационный курс для широких слоев населения, в котором популярно излагаются и иллюстрируются основные понятия и проблемы климатологии, современные климатические изменения и их возможные последствия.

Для лиц, принимающих решения, и специалистов в смежных областях раздел «Изменения климата и адаптация» предлагает цифровые карты ключевых характеристик современного и возможного в будущем климата Сибири и его экстремальных проявлений в формате, удобном для дальнейшей работы в настольных ГИС. В этом же разделе доступны наборы вычисленных характеристик температуры и осадков, необходимых для разработки мер по адаптации к климатическим изменениям, возможным в период до 2050 г. Все файлы доступны для скачивания в разделе «Архив климатических характеристик».

Раздел «Климатический анализ» содержит инструментарий для анализа региональных климати-

ческих изменений и откликов на них на основе сервисов пространственных данных. Поскольку вычислительные ресурсы, используемые для анализа, ограничены, открытый доступ предоставляется лишь к демонстрационной версии платформы. Полная функциональность текущей версии веб-ГИС обеспечивается только для авторизованных пользователей.

Новая версия программного обеспечения

Как и в предыдущей версии, основными программными компонентами веб-ГИС платформы «Климат» являются структурированные архивы пространственных данных и их метаданные, вычислительное ядро, геоportal и веб-клиент ГИС. Сейчас компоненты вычислительного ядра, выполняющие обработку и анализ многомерных массивов пространственных данных, разработаны с использованием языка Python 3 и ряда математических и графических библиотек, таких как NumPy (<https://numpy.org/>) и Matplotlib (<https://matplotlib.org/>). Пространственные данные должны быть предварительно подготовлены:

- растровые данные приведены к формату NetCDF [3], упорядочены, сгруппированы и размещены на системах хранения;
- данные локальных наблюдений должны быть занесены в специальную базу данных, работающую под управлением СУБД PostgreSQL (<https://www.postgresql.org/>) с расширением PostGIS (<https://postgis.net/>);
- соответствующие метаданные, описывающие данные, внесены в специализированную базу метаданных.

Функциональные возможности вычислительного ядра непрерывно расширяются, и в настоящее время оно способно вычислять ~30 различных характеристик изменения климата.

Новая версия платформы «Климат» переведена на последнюю версию картографического ПО Geoserver 2.19.2 (<http://geoserver.org>), которая позволяет создавать картографические слои на основе данных в форматах GML, HFA/Erdas Imagine (.img), Oracle Georaster, Postgis Raster, GRIB и NetCDF помимо стандартных Shapefile, PostGIS, GeoTIFF и ArcGrid. Возможность прямого использования данных в форматах GRIB и GML позволит избежать предварительной конвертации ряда массивов данных, что существенно ускоряет анализ разнородных архивов данных.

Современные и возможные в будущем изменения климата Сибири

Наиболее часто климатические изменения характеризуются аномалиями – отклонениями выбранной метеорологической величины от ее среднего многолетнего состояния (климатической нормы). В качестве

базового периода для вычисления нормы обычно рассматривается 30-летний временной интервал. Согласно руководству ВМО по расчету климатических норм [4], стандартный опорный период для долгосрочной оценки изменения климата – 1961–1990 гг. Однако определения климатологических стандартных норм теперь применяются к последнему 30-летнему периоду, который завершается годом, кончающимся цифрой 0 (например, 1981–2010 гг.).

С использованием веб-ГИС «Климат» были вычислены поля аномалий метеорологических величин, климатических индексов и различных гидротермических коэффициентов, количественно характеризующие современные и возможные в будущем сезонные изменения от года к году приземной температуры и осадков на территории Сибири (50–65° с.ш., 60–120° в.д.). Кроме того, были вычислены тренды и годовые значения 24 климатических индексов, разработанных экспертной группой по обнаружению климатических изменений, мониторингу и индексам при Комиссии по климатологии ВМО (<http://etccdi.pacificclimate.org/index.shtml>), которые характеризуют экстремальность климата (частоту и магнитуду событий, попадающих в 5-процентный интервал максимальных и минимальных значений). Это, в частности, индексы жары, холода и экстремальных осадков. Полный список и расшифровка характеристик доступны по адресам: <http://climate.scert.ru/adaptation/library/indices/heatandcold/> и <http://climate.scert.ru/adaptation/library/indices/precipitation/>. Для современного периода были также вычислены тренды и сезонные или месячные значения различных гидротермических коэффициентов – комплексных показателей засушливости или переувлажненности территории, представляющих собой различные сочетания температуры воздуха и количества осадков. Их список и расшифровка представлены в системе (<http://climate.scert.ru/adaptation/library/coefficients/>).

При расчете характеристик для современного периода (по 2020 г.) использованы данные реанализа ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) с высоким пространственным разрешением 0,25 × 0,25 (~ 30 км). В качестве базового был выбран период с 1981 по 2010 г. Для расчета характеристик использовано несколько наборов данных различного разрешения. В частности, для периода до 2100 г. были использованы данные с пространственным разрешением T127 (~ 100 км) проекта CMIP6 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>), модель MPI-ESM-HR2, сценария SSP585) и данные с высоким пространственным разрешением (~ 25 км) проекта CORDEX (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>), модель MPI-ESM-LR, сценарий RCP 8.5, даунскейлинг для территории Центральной Азии (CAS-22) с помощью региональной REMO2015). Для периода до 2050 г. были использованы данные с высоким пространственным разрешением T359 (~ 50 км) подпроекта HighResMIP проекта CMIP6 (модель CNRM-CM6-1-HR, сценарий RCP 8.5). Так как в использованных наборах данных в качестве исто-

рического периода берутся различные временные промежутки, соответствующие базовые периоды различаются: для данных CMIP6 это 1961–1990 гг., для CORDEX – 1971–2005 гг. и для CMIP6 HighResMIP – 1981–2010 гг.

Благодаря высокому пространственному разрешению и полноте наборов использованных данных вычисленные поля характеристик изменения климата, доступные пользователям в разделе «Характеристики климатических изменений», существенно дополняют результаты анализа изменения климата региона, доступные в Шестом докладе и атласе МГЭИК.

Возникновение климатических рисков для населения и экономики Российской Федерации, вызванное климатическими изменениями [5], требует принятия мер по адаптации к ним. Некоторые необходимые для этого количественные оценки представлены в разделе «Характеристики для адаптации». В качестве основы для их вычисления был использован подготовленный Министерством экономики и развития РФ проект методических указаний по адаптации к изменениям климата [6], который содержит конкретную методологию оценки климатических рисков, включая количественные показатели их интенсивности, распространения и продолжительности воздействия. Критические значения гидрометеорологических показателей (температуры и осадков) для современного периода (1979–2020 гг.) были вычислены на основе данных реанализа ERA5, а для периода до 2050 г. – на основе данных подпроекта HighResMIP. Эти характеристики доступны по адресу <http://climate.scert.ru/adaptation/adapt/>.

Цифровые карты, представленные в разделе «Изменения климата и адаптация», по сути, формируют атлас, который не только иллюстрирует современные и возможные в будущем изменения климата Сибири и их предполагаемые последствия, но и дает количественные характеристики этих процессов с достаточным для приложенной пространственным разрешением. Следует добавить, что все вычисленные характеристики также открыты для пользователей в архиве климатических характеристик (<http://climate.scert.ru/environment/data/archive/>).

Заключение

Функционал текущей версии веб-ГИС платформы «Климат» и возможность его быстрого расширения вполне достаточны для количественной оценки текущих и возможных в будущем климатических изменений и откликов на них на основе обработки архивов данных наблюдений и моделирования. Действительно, разработанное программное обеспечение при его использовании на суперкомпьютерных платформах позволяет оперативно анализировать новые характеристики изменений климата, равно как и экологические и социально-экономические отклики на них. Более экономичным представляется развертывание распределенной сети тематических веб-ГИС, узлы которой обмениваются между собой лишь результатами анализа, а для работы

каждого из них не требуются супервычислительные ресурсы [7]. Тематика работы таких узлов может быть направлена на любую зависящую от климата область (экология, здоровье, экономика, транспорт, промышленность и т.д.). Реализация обоих подходов будет существенным шагом в обеспечении возможности использования современных информационно-вычислительных технологий и ресурсов для решения фундаментальных и прикладных задач, связанных с происходящими и прогнозируемыми изменениями климата, и создания виртуальной исследовательской среды для наук о Земле.

Однако возникают новые вызовы, такие как прогнозирование экстремальных метеорологических явлений и использование этих прогнозов в качестве основы интерактивных систем поддержки принятия решений, необходимых для снижения наносимого этими явлениями ущерба, а также планируемый переход к низкоуглеродной экономике. Эти вызовы требуют усвоения текущих данных мониторинга моделями, анализа больших архивов климатических данных, характеризующих современное и возможное в будущем состояние локального/регионального климата и конкретных экосистем, и эффективной обработки квазинепрерывного потока данных инструментального мониторинга и метеорологического или климатического моделирования. Так, для перехода к низкоуглеродной экономике необходимо решение задач оценки и управления вкладом в баланс углерода различной природы. Пример подхода к решению этих задач – создание в России сети карбоновых полигонов [8]. Ясно, что простого достоверного инструментального мониторинга уровня выбросов и поглощения CO₂ различными экосистемами здесь недостаточно. Не помогут управлять уровнем выбросов или поглощения парниковых газов ни суперкомпьютерные вычисления на базе имеющихся и разрабатываемых моделей различных систем, ни последующий анализ полученных результатов. По сути, необходимо создание «цифрового двойника» [9] анализируемой системы со всеми ее взаимосвязями с локальной реализацией современного или прогнозируемого климата Земли. Движение в этом направлении начато в реализуемом в Европе мегапроекте Destination Earth [10] (<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>).

Для решения обеих задач необходима информационно-вычислительная среда, обеспечивающая предиктивную аналитику путем объединения потоковой обработки данных наблюдений и прогнозного моделирования, которые поступают в режиме квази-реального времени, с результатами пакетного ана-

лиза больших архивов данных. В настоящее время один из наиболее удачных подходов к решению проблемы совместного использования методов пакетной и потоковой обработки данных – Лямбда-архитектура [<https://hazelcast.com/glossary/lambdarchitecture/>], которая позволяет обрабатывать большие данные в режиме, близком к реальному времени. Этот подход является отказоустойчивым и масштабируемым. Именно такая архитектура будет использована в рамках проекта № 121031300158-9, что закладывает основу для дальнейшего развития веб-ГИС платформы «Климат».

1. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate* / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.). New York: Cambridge University Press (in press).
2. *Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г., Воронай Н.Н., Рязанова А.А., Лысков В.Н.* Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры для современной климатологии // Метеорол. и гидрол. 2018. № 11. С. 20–30.
3. *Network Common Data Form* [Электронный ресурс] URL: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>.
4. *Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм, 2017, ВМО № 1203.* [Электронный ресурс] URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4168.
5. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме.* Росгидромет, 2014. 60 с.
6. *Методические рекомендации по оценке климатических рисков* [Электронный ресурс] / Минэкономразвития России. 2020. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/bd510e454cdb320e16838a0a00cde7df/4sdfgl4589i.pdf>.
7. *Gordov E., Shiklomanov A., Okladnikov I., Prusevich A., Titov A.* Development of Distributed Research Center for analysis of regional climatic and environmental changes // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. V. 48. N 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012033.
8. *Регламент* рассмотрения Экспертным советом при Минобрнауки России предложений от заинтересованных организаций по созданию карбоновых полигонов в рамках пилотного проекта от 5 февраля 2021 г. № 74 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.minnobrнауки.gov.ru/upload/iblock/7f1/fdtxh03gk5nhaizf33vtpszellzaal53.pdf>.
9. *Bauer P., Stevens B., Hazeleger W.* A digital twin of Earth for the green transition // Nat. Clim. Change. 2021. DOI: 10.1038/s41558-021-00986-y.
10. *Voosen P.* Europe is building a ‘digital twin’ of Earth to revolutionize climate forecasts // Science. 2020. DOI: 10.1126/science.abf0687.

E.P. Gordov, Yu.E. Gordova, I.G. Okladnikov, A.A. Ryazanova, A.G. Titov. **Climate web GIS platform for research of climate processes and responses to them: Potential and prospects.**

The history of development and the current state of the created distributed tool for the analysis of large arrays of climate data are briefly described. The potential of the Climate platform is illustrated by its applications in monitoring of current and prediction of possible future climate changes in Siberia, determining regional responses to them, and preparing a quantitative basis for developing adaptation measures. Possible options for creating a virtual research environment and thematic digital twins are discussed, providing specialists in climatology and related areas with opportunities to use modern information and computing technologies and resources in solution of fundamental and applied problems posed by ongoing and projected climate changes.