

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ КЛИМАТОЛОГИИ

Гордов Е.П. ^{1),2)}

¹⁾ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, проспект Академический, 10/3

²⁾ Томский филиал, Федеральный научный центр информационных и
вычислительных технологий,

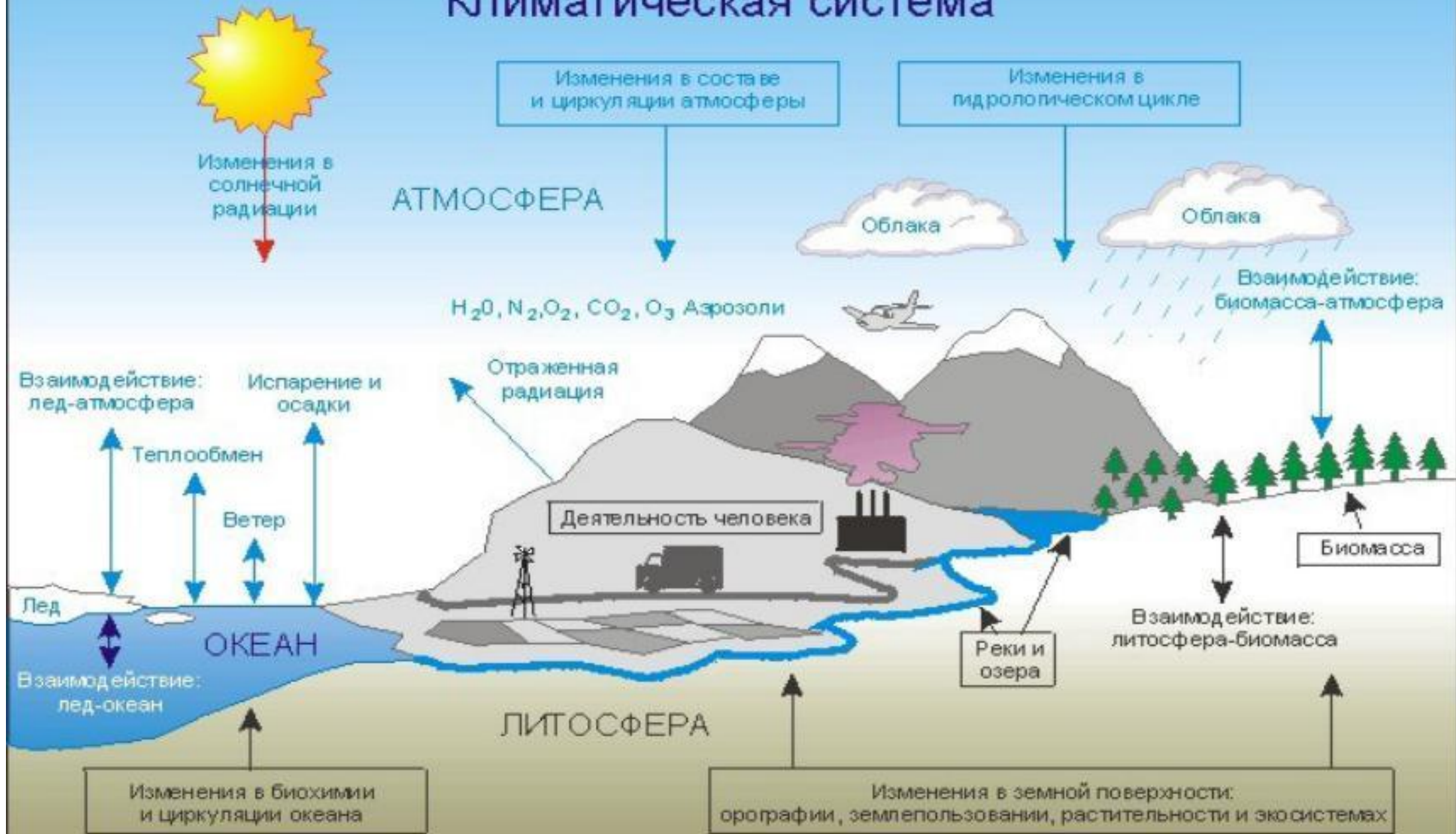
Россия, 634055, г. Томск, проспект Академический, 4; gordov@scert.ru

План

- **Климат**
- **ЦД – от промышленности до экосистем и планеты**
- **ЦД планеты**
 - ЕС**
 - NASA**
 - NOAA**
- **ВИП ГЗ**
- **ЦД болота**

Климат

Климатическая система



Климатическая система Земли - атмосфера, океан, суша, криосфера (лед и снег) и биосфера. Простые характеристики: температура, атмосферные осадки, влажность воздуха и почв, состояние снежного и ледового покрова, уровень моря. Сложные характеристики: динамика крупномасштабной циркуляции атмосферы и океана, частота и сила экстремальных метеорологических явлений, границы среды обитания растений и животных.

Нелинейность: глобальные климатические, биологические, геологические и химические процессы и природные экосистемы тесно связаны между собой. Изменения в одном из процессов могут сказаться на других, причем вторичные эффекты могут по силе превосходить первичные. Колебания : возможны резонансы и смена режимов.

Парниковый эффект –атмосфера (водяной пар, углекислый газ, метан, закись азота и другие малые газовые примеси) пропускает коротковолновое солнечное излучение, но задерживает длинноволновое тепловое излучение Земли.

Причины изменения климата

Естественные: смещение орбиты и угла наклона, изменение солнечной активности, вулканические извержения и изменение количества аэрозолей.

Вулканические извержения

В атмосферу выбрасываются значительные объемы аэрозолей, которые не пропускают часть приходящей солнечной радиации.

Солнечный цикл и орбита Земли

Интенсивность солнечной радиации меняется незначительно. Земля получает разное количество энергии в зависимости от положения ее эллиптической орбиты, которая испытывает колебания (ледниковые периоды).

Антропогенные: повышение концентрации парниковых газов, в основном CO_2 , образующегося при сжигании ископаемого топлива. Выброс аэрозольных частиц, сведение лесов, урбанизация и т.п.

Баланс солнечной и длинноволновой радиации

Приходящая солнечная радиация (342 Вт/м^2) равна отраженной радиации (107 Вт/м^2) плюс исходящей от Земли длинноволновой радиация (235 Вт/м^2).
Нарушение, вызванное антропогенной деятельностью составляет менее 3 Вт/м^2 . На радиационные потоки влияют парниковые газы и изменение подстилающей поверхности.

Рост концентрации в атмосфере парниковых газов

Концентрация парниковых газов (углекислого газа, метана, закиси азота) растет (280 ppm в 1750 г. и более 400 ppm сейчас).
Последствия наблюдаемы

Климатоскептики.

Климатология – область интенсивного использования пространственных данных (наблюдения, моделирование, анализ – уже Петабайты!).

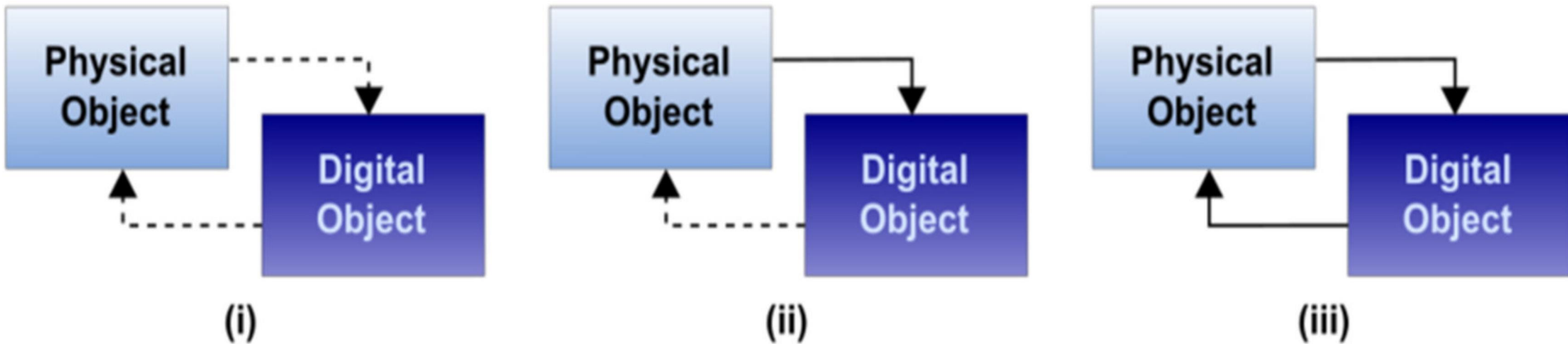
ЦД – от промышленности до экосистем и планеты

Цифровой двойник (ЦД)

ГОСТ Р 57700.37—2021 Компьютерные модели и моделирование ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ: цифровой двойник изделия — это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и (или) его составными частями.

Цифровая модель изделия - система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение изделия на различных стадиях жизненного цикла.

ЦД может рассматриваться как цифровая копия реального объекта и происходящих с ним процессов. Одним из характерных свойств ЦД является связь реального и виртуального объектов с помощью обмена данными в режиме реального времени, которая обеспечивает их синхронизацию.



Типы ЦД:

(i) Цифровая модель;

(ii) Цифровая тень/статическая цифровая модель

(iii) Цифровой двойник/динамическая цифровая модель

Существенные отличия того, что подразумевается в концепции ЦД в разработках для климатологии от исходной версии:

Отсутствие полной физико-математической модели для многих систем и процессов и вычислительная сложность ее реализации;

Отсутствие требования о наличии передачи в реальном масштабе времени информации от виртуального образа к реальному объекту/процессу.

Возможность вмешательств «на ходу» практически нереализуема в этой области. Не является важным отличие ЦД от цифровой тени (системы связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта, содержащихся в данных, получаемых с реального объекта и/или от его моделей) и даже тогда, когда для анализа используются только данные наблюдений, речь идет о ЦД.

Конечные пользователи получаемого знания не являются знатоками компьютерных технологий и/или климатологии (промышленность, администрация, население).

ЦД планеты

ЕС

NASA

NOAA

Destination Earth

Destination Earth (DestinE), a European Commission flagship initiative for a sustainable future

The Destination Earth (DestinE) is a flagship initiative of the European Commission to develop a highly accurate digital model of the Earth on a global scale. This model will monitor, simulate and predict the interaction between natural phenomena and human activities. It will contribute to achieving the objectives of the twin transition, green and digital as part of the European Commission's [Green Deal](#) and [Digital Strategy](#).

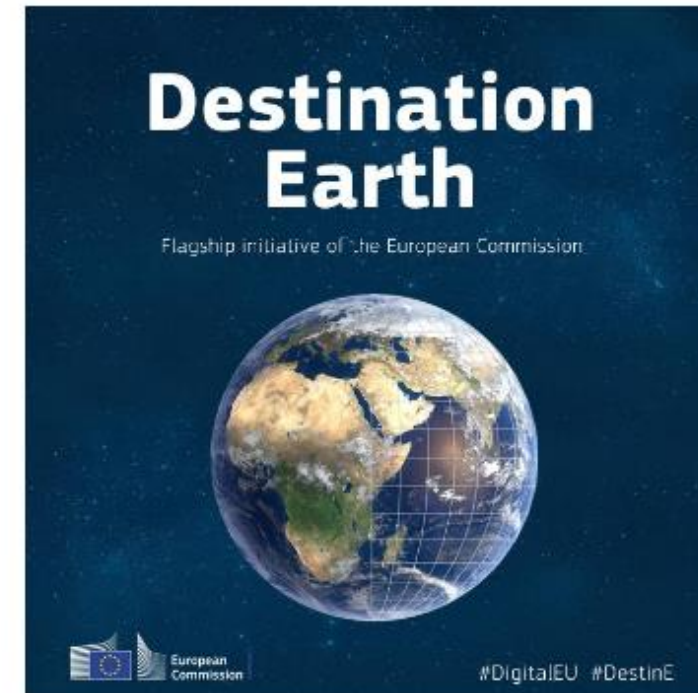


Destination Earth – new digital twin of the Earth will help tackle cli... [Поделиться](#)

DESTINATION EARTH


#DestinE #DigitalEU


Посмотреть на  YouTube    



Destination Earth

Flagship initiative of the European Commission



 European Commission



#DigitalEU #DestinE



- [A European Green Deal >](#)
- [A European strategy for data >](#)
- [Communication: Shaping Europe's digital future >](#)



The digital revolution of Earth-system science

Peter Bauer ¹✉, Peter D. Dueben¹, Torsten Hoefler², Tiago Quintino ³, Thomas C. Schulthess⁴ and Nils P. Wedi¹

Computational science is crucial for delivering reliable weather and climate predictions. However, despite decades of high-performance computing experience, there is serious concern about the sustainability of this application in the post-Moore/Dennard era. Here, we discuss the present limitations in the field and propose the design of a novel infrastructure that is scalable and more adaptable to future, yet unknown computing architectures.

The human impact on greenhouse gas concentrations in the atmosphere and the effects on the climate system have been documented and explained by a vast resource of scientific

commodity parallel processing. Moore's law drove the economics of computing by stating that every 18 months, the number of transistors on a chip would double at approximately equal cost. However,

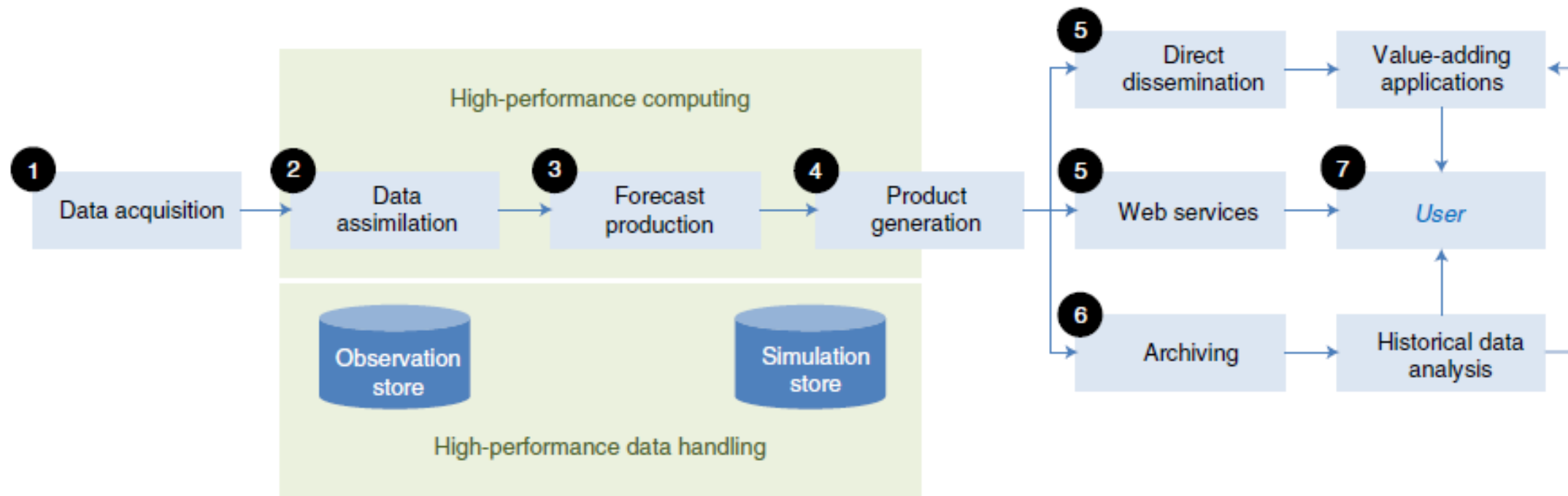
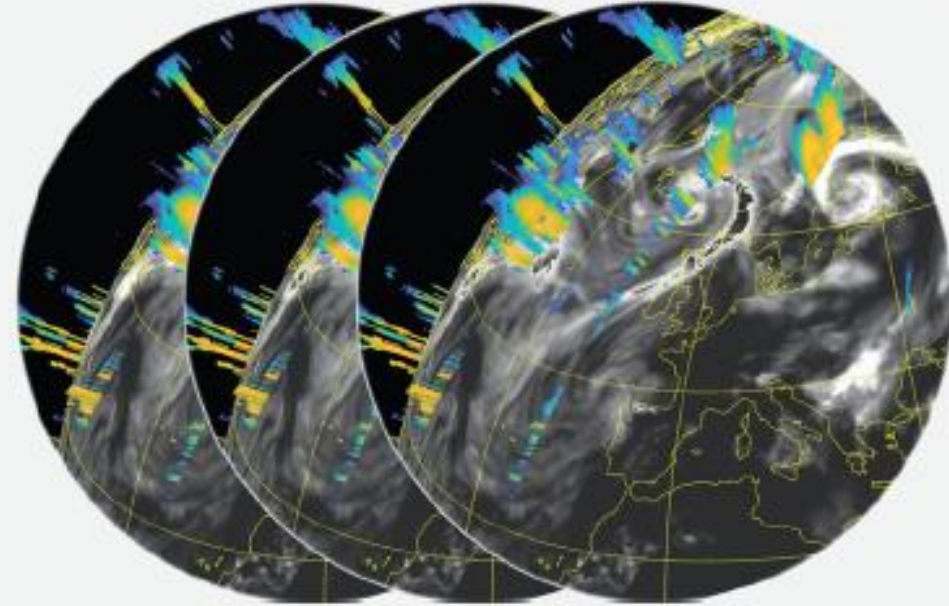
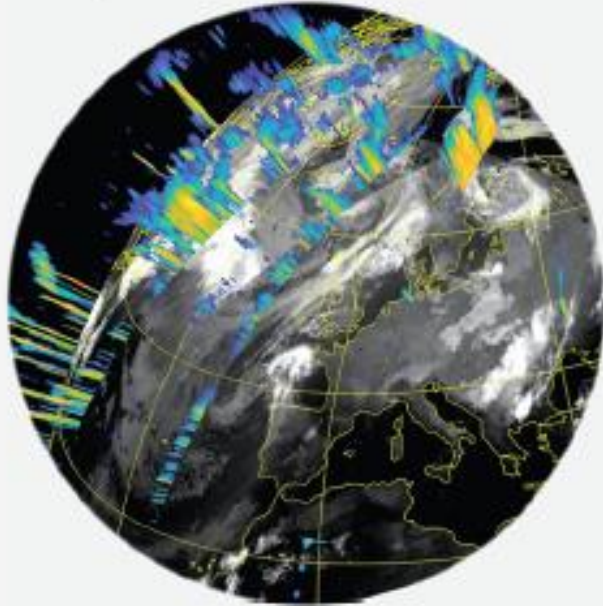
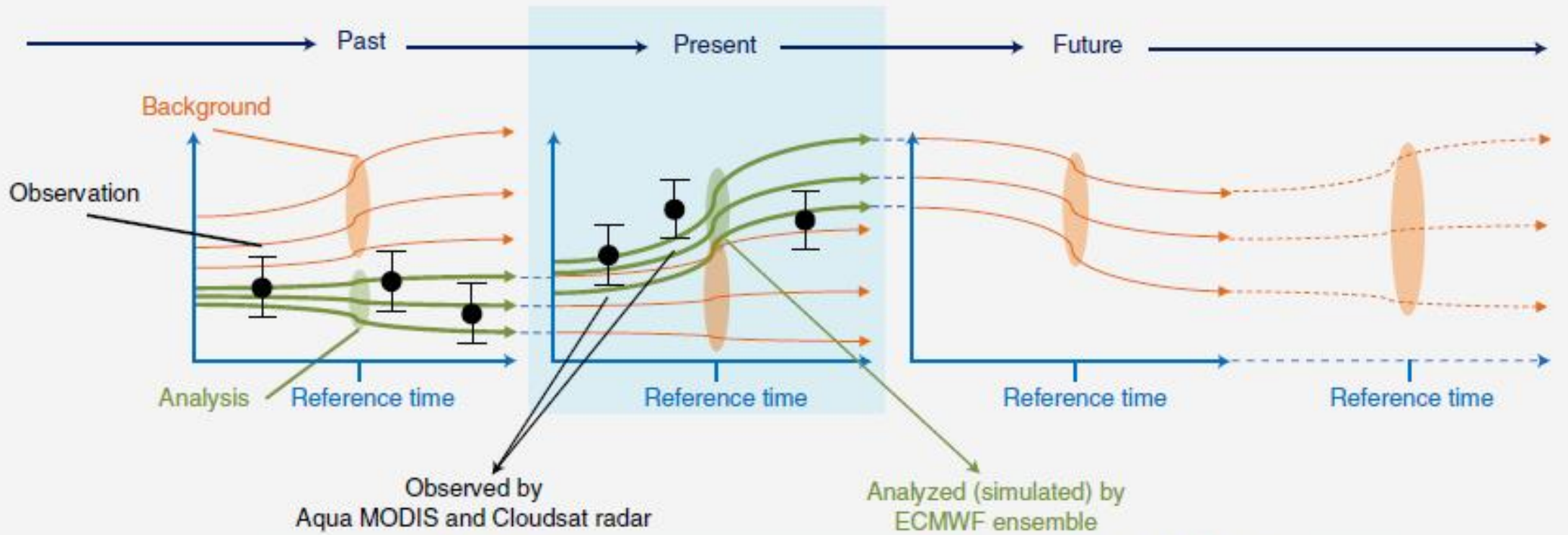


Fig. 1 | Typical production workflow in operational numerical weather prediction. (1) High-volume and high-speed observational data acquisition and pre-processing; (2) data assimilation into models to produce initial conditions for forecasts; (3) forecast production by Earth-system simulation models; (4) generation of output products tailored to the portfolio of weather and climate information users; (5) direct dissemination of raw output and web-products; (6) long-term archiving for reuse in statistical analyses and performance diagnostics; (7) user-specific applications and data-driven analytics.



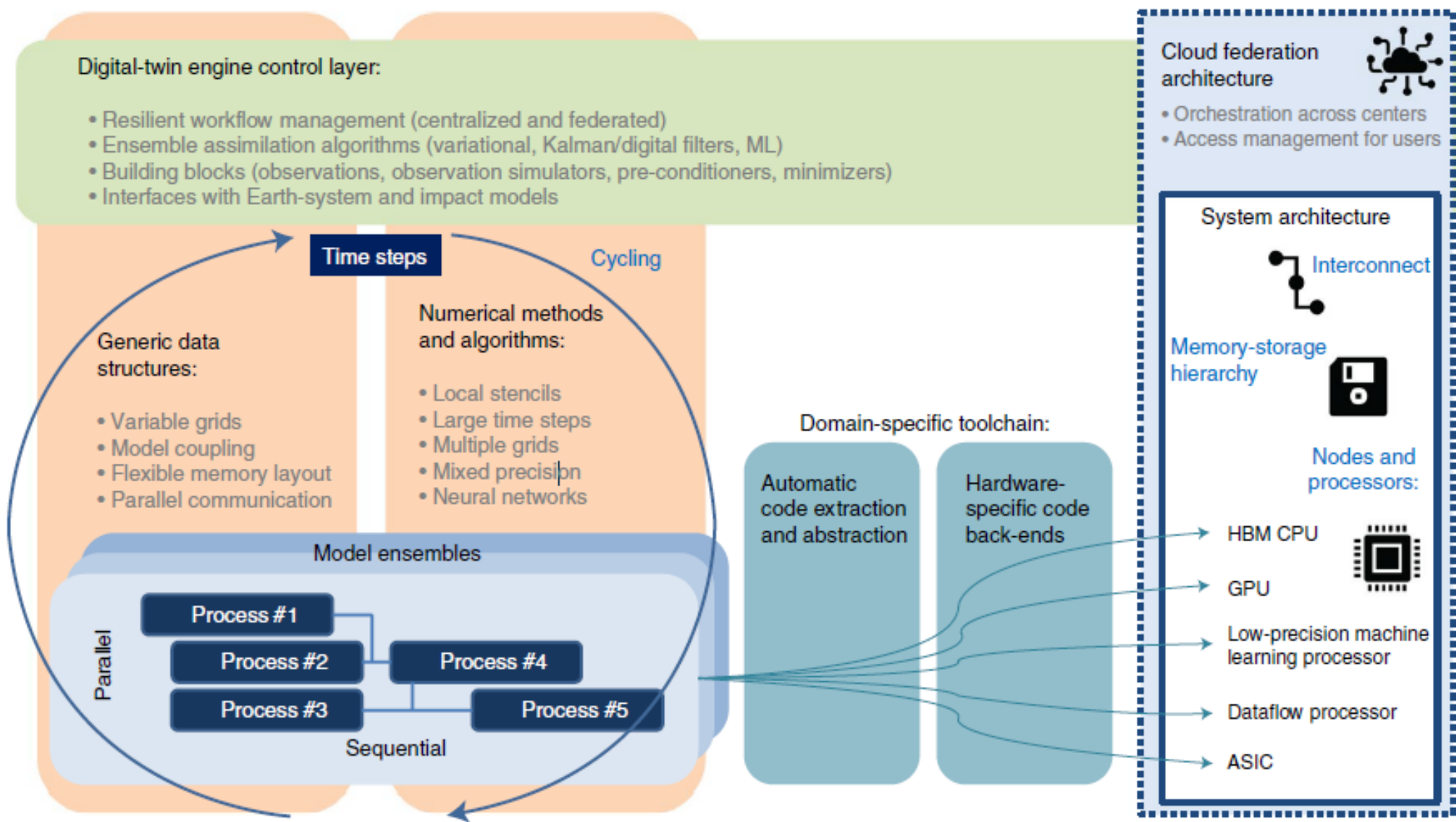


Fig. 3 | Conceptual view of an efficient software infrastructure for the Earth-system digital twin. The digital-twin control layer drives flexible workflows for Earth-system modeling and data assimilation using generic data structures and physical process simulations that exploit parallelism and are based on algorithms minimizing data movement. DSLs map the algorithmic patterns optimally on the memory and parallel processing power of heterogeneous processor architectures. The computing architecture is based on heterogeneous, large-scale architectures within federated systems.

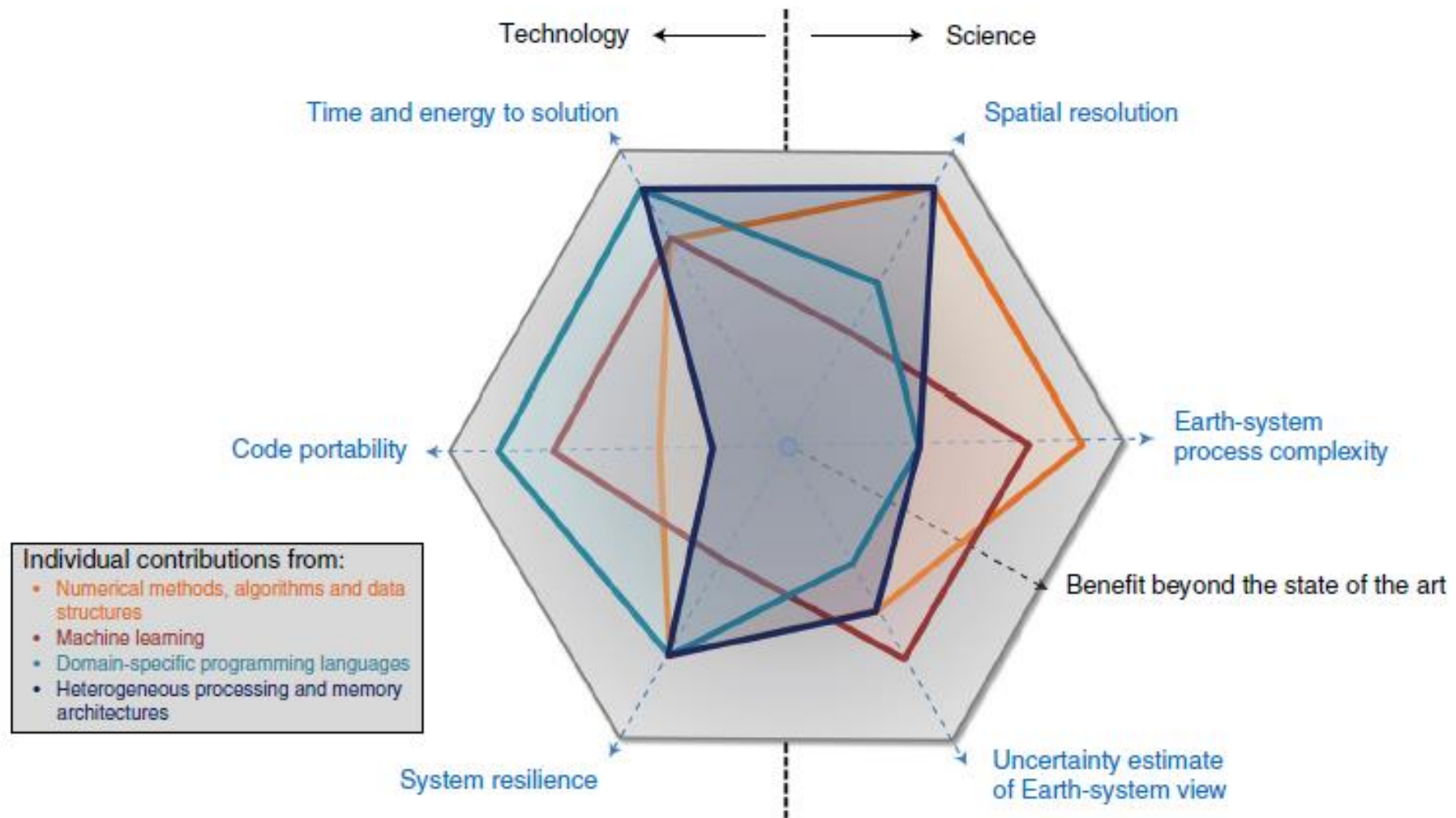
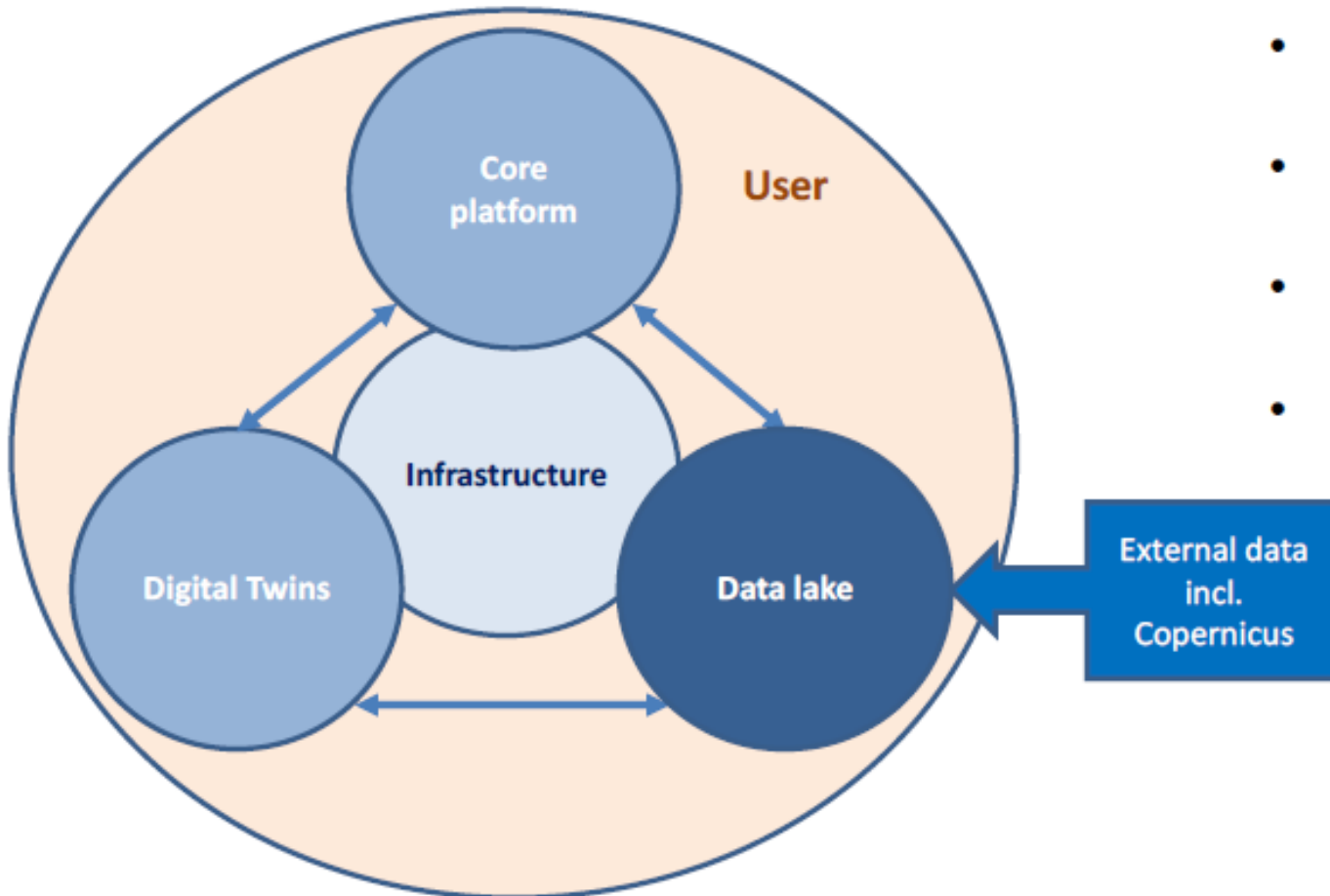


Fig. 4 | Expected contribution of main system developments necessary to achieve key science and computing technology performance goals. The distance from the center of the hexagon indicates the magnitude of the individual contributions towards enhanced efficiency for increased spatial resolution, more Earth-system complexity and better uncertainty information provided by ensembles as well as resilient, portable and efficient code and workflow execution, respectively.

Core Platform



- Portal to Users
- User Hosting (user space: MyDestinE)
- Catalogue and data access services
- PaaS & SaaS for analytics and modelling
- Community management (market place, annotations, open source)
- Advanced interface for interactive modelling (system dynamic, 3D,...)
- Operate the User Data API for Data Lake access and User DTs interface for on-demand production
- ...

Core Platform

Users make use of the DestinE Core Service Platform (DESP) to produce answers to their problems*

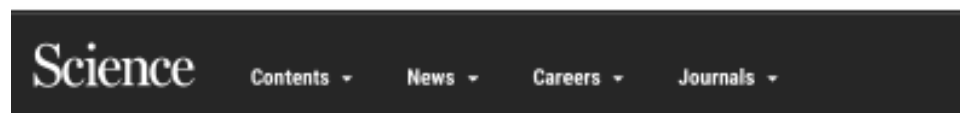
Platform combines generic & user specific services in a user customizable environment to :

- Unified access to data generated or collected/referenced by DestinE
- Applications to support development / modelling / analysis / visualization
- On-demand DT simulation / data retrieval / data transformation
- Develop & operate own applications / services
- Share results / data / applications / libraries

*in an open and extensible environment

Necessary break-throughs

1. Extreme-scale computing and data handling:
= *much more realistic models + better combination of simulations + observations*
2. Full integration of policy sectors in workflow for **actionable information incl. quality**
= *Earth-system + energy + food + water + finance*
3. Open and interactive access to data, software and workflows for users
= *non-expert access and intervention*



At 1-kilometer resolution, a European climate model (left) is nearly indistinguishable from reality (right). (LEFT) ECMWF; (RIGHT) ECMWF, © EUMETSAT

Europe is building a 'digital twin' of Earth to revolutionize climate forecasts

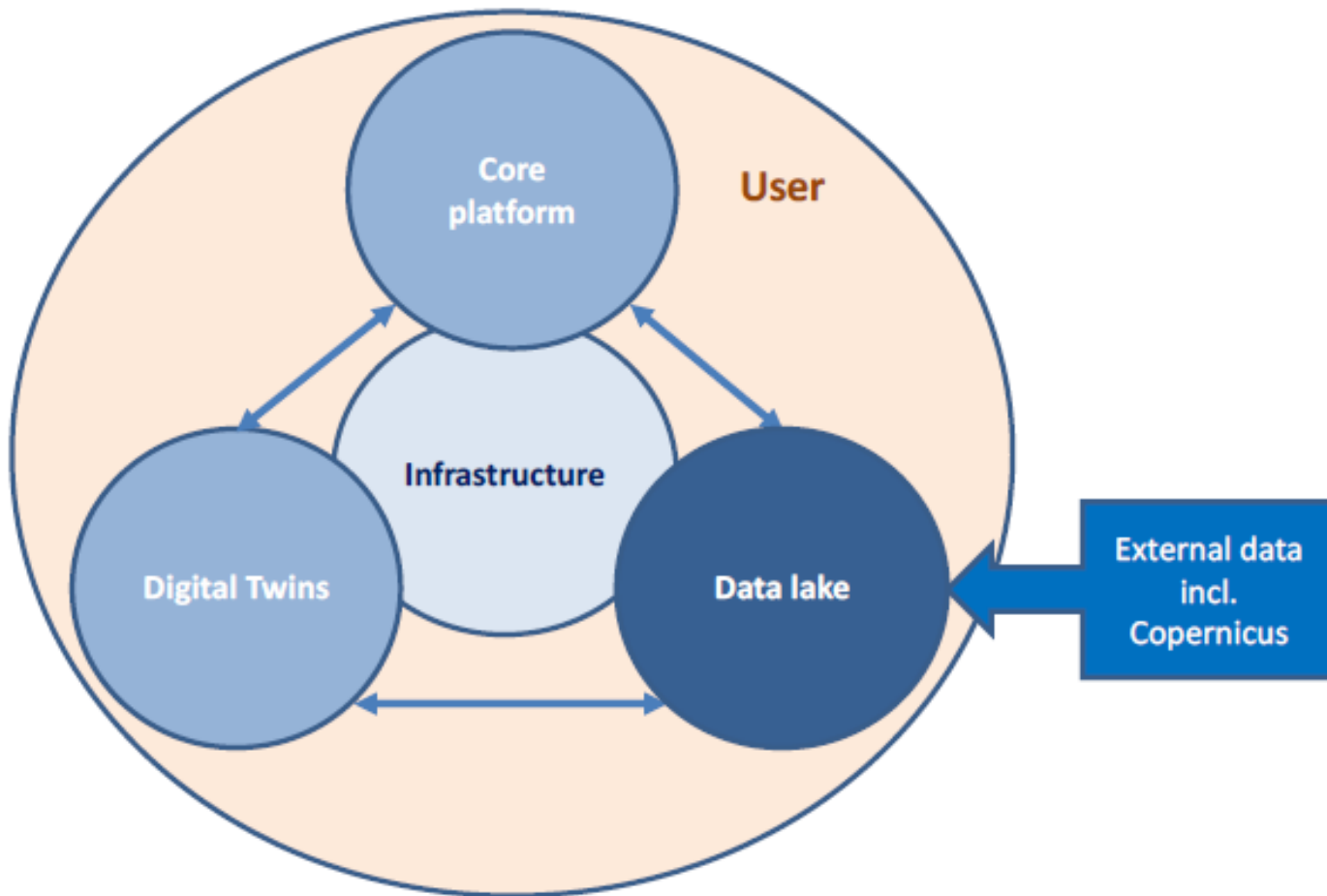
By Paul Vossen | Oct. 1, 2020, 10:40 AM

A screenshot of a NewScientist article. At the top right is the 'HPC wire' logo with the tagline 'Since 1967 - Covering the Frontiers of Computing in the World and the People Who Run Them'. Below the logo is a 'NEWSLETTERS' sign-up box. The article title is 'Building digital twins of Earth could help Europe cut carbon emissions'. It includes social media sharing icons for Facebook, Twitter, LinkedIn, and others. The author is Adam Vaughan, and the date is 12 October 2020. The article features a large image of a digital Earth globe with glowing blue and purple data points.



October 10, 2020

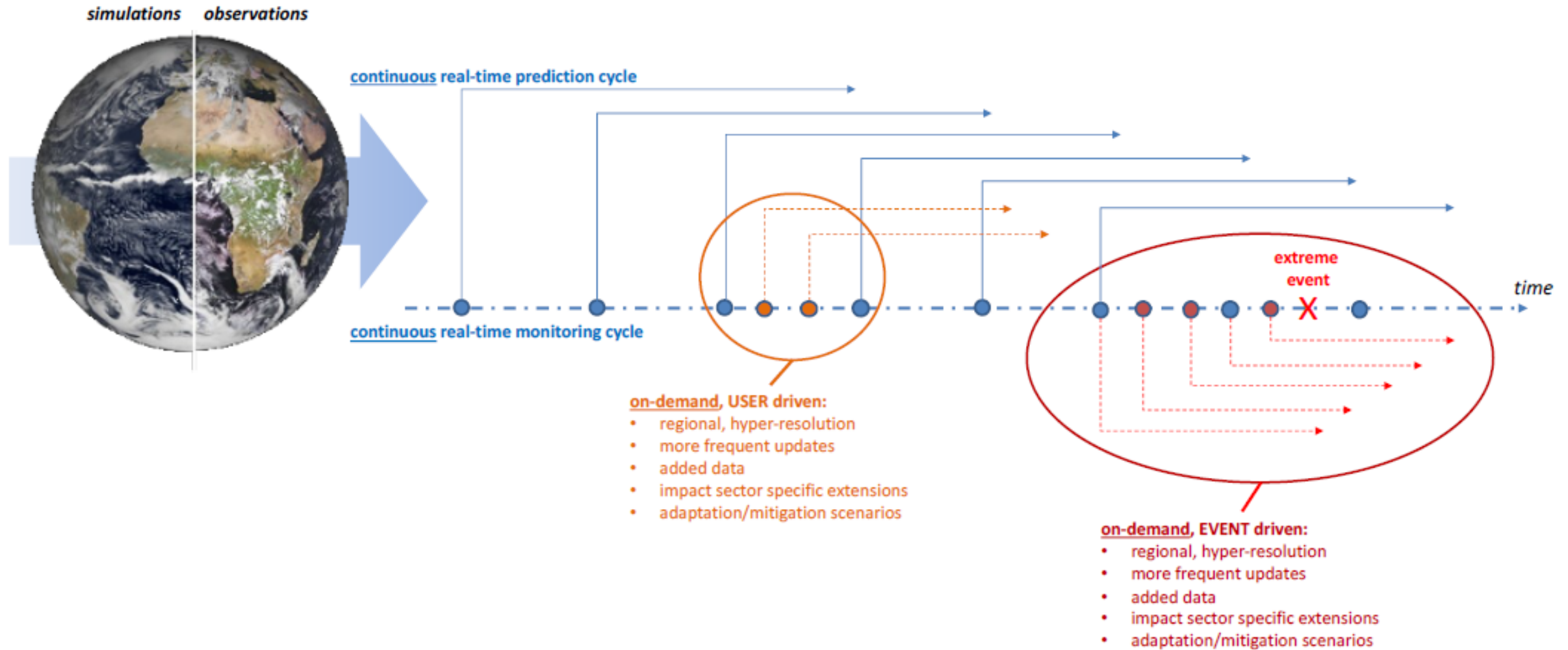
Digital Twins



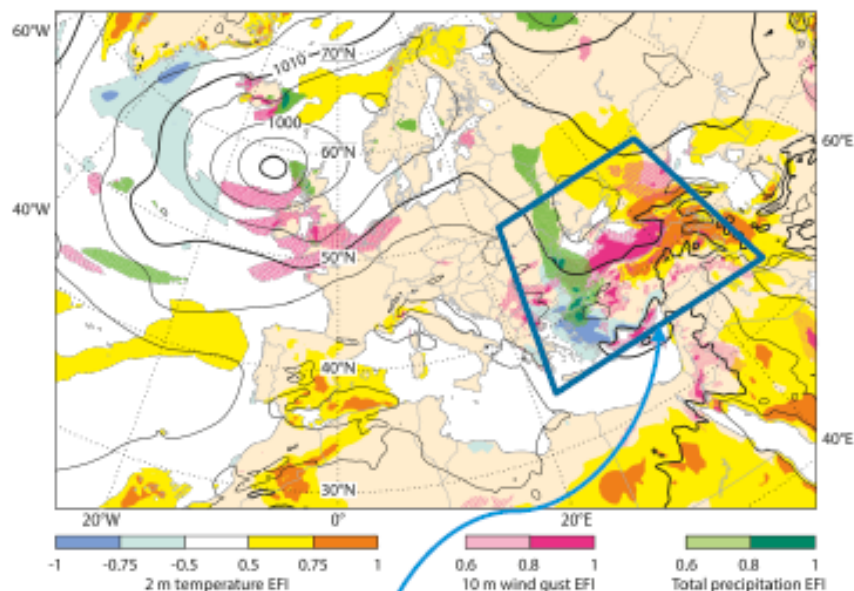
2 high-priority Digital Twins:

- 1. Weather-induced and Geophysical Extremes:** Environmental extremes at very high spatial resolution and close to real-time decision-making support at continental, country, coastline, catchment and city scales in response to meteorological, hydrological and air quality extremes.
- 2. Climate Change Adaptation:** Climate change adaptation policies and mitigation scenario testing at decadal timescales aiming at a real breakthrough at the level of reliability at regional and national levels, for understanding the causes and explaining the feedback mechanisms of change, and predicting possible evolution trajectories

Digital Twin production



Use-case example no. 1 – Extremes DT



wind-storm/flooding case

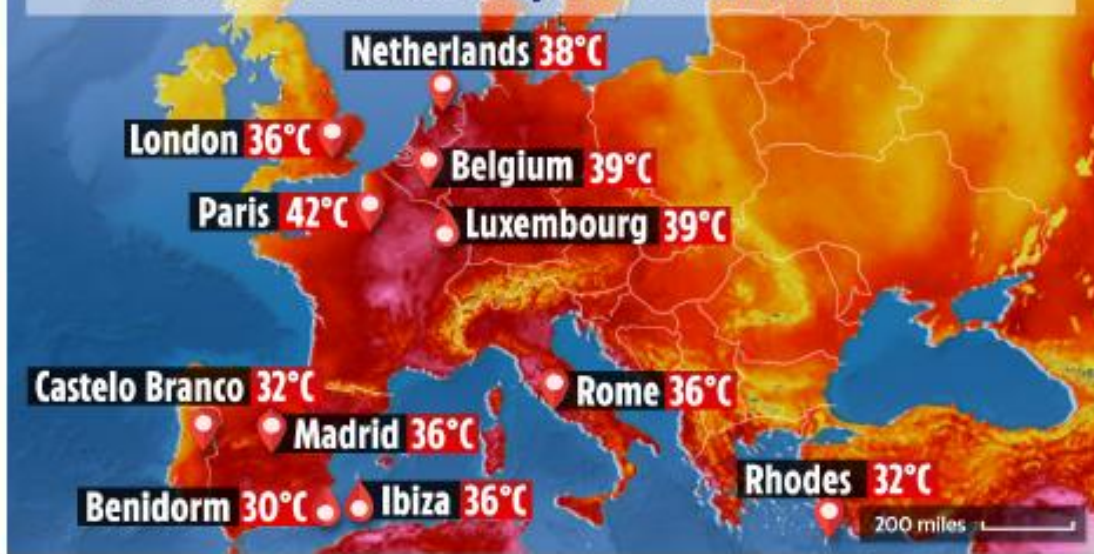
DT components:

- **EO based monitoring of all observables (and derivatives)**
- **Global, continuous** predicts extreme event with much enhanced reliability and more lead-time
 - decision on region, extremes type, scenario types, response time
- **On demand, limited-area** predicts regional effects over area of interest
 - decision on location, actual scenarios, agents/users
- **Hydrology/river-flow** predicts flooding/riverflow/dam
- **Wind-power** predicts gusts/power grid injection
- **Interactive scenarios:**
 - disaster management
 - strategic infrastructure planning
 - renewable energy infrastructure location/protection
 - insurance assessment/pricing

Use-case example no. 2 – Climate DT

EUROPEAN HEAT WAVE

BLAST FURNACE Paris to hit hottest temperature in history at 42°C tomorrow as Europe sizzles in new heatwave



DT components:

- **EO based monitoring of all observables (and derivatives)**
- **Global, continuous** predicts likely 2020-2050 trajectories with much enhanced reliability at regional level
 - natural variability vs anthropogenic forcing
 - decision on region, scenarios needed, response time
- **On demand, ML-downscaling** predicts regional/thematic effects over area of interest
 - decision on location, actual scenarios, agents/users
- **Interactive scenarios:**
 - greenhouse gas forcing
 - land use
 - weather (extremes) of the future
 - water/resource management
 - renewable energy infrastructure
 - insurance assessment/pricing
 - government incentives

Highlight



EVENT REPORT | 26 February 2021

Destination Earth initiative 3rd User Engagement Workshop - Summary Report



EVENT REPORT | 02 February 2021

Destination Earth (DestinE) Architecture Validation Workshop - Summary Report



EVENT | 11 February 2021

Destination Earth initiative 3rd User Engagement Workshop

NEWS ARTICLE | 04 July 2023

EU-US workshop on AI and Digital Twins forges closer collaboration opportunities

EU and US participants discussed topics of mutual interest in Artificial Intelligence (AI) and Digital Twins to intensify collaboration in addressing the common challenge of adaptation to climate change.



Hosting agreement signed for Europe's first exascale Supercomputer

The hosting agreement for Europe's first exascale supercomputer JUPITER has been signed between the European High-Performance Computing Joint Undertaking (EuroHPC JU) and the Jülich Supercomputing Centre in Germany, and witnessed by Robert Viola Director-General of the European Commission DG Connect.



India and EU sign Intent for Cooperation agreement in high performance computing and quantum technologies

India and EU sign an agreement for Cooperation on High Performance Computing, Weather Extremes and Climate Modelling, and Quantum Technologies.





Earth System Digital Twin

Towards understanding the evolution and interactions of Earth's most complicated systems

NASA Earth System Digital Twin

The Advanced Information Systems Technology (AIST) program leads NASA's Earth System Digital Twins (ESDT) efforts, developing novel technologies for integrating diverse Earth and human activity models, continuous observations and information system capabilities to provide unified, comprehensive representations and predictions that can be utilized for monitoring as well as for developing actionable information and supporting decision making.

ESDT could be used to help researchers better understand the fundamental Earth systems that impact everything from wildfires to climate change.

Organized around interconnected, multi-domain, high-scale modeling capabilities, the three major components of an ESDT are a continuously updated ***Digital Replica*** of the Earth System of interest, dynamic ***Forecasting*** models and ***Impact Assessment*** capabilities.

The ***Digital Replica*** is fed by continuous and targeted diverse observations, powered by Data Assimilation and Fusion, and provides an accurate representation of the current state of the system.

Forecasting is facilitated by advanced computational capabilities, Machine Learning (ML) and Surrogate Modeling, and provides real-time or near-real-time prediction of future states of the system.

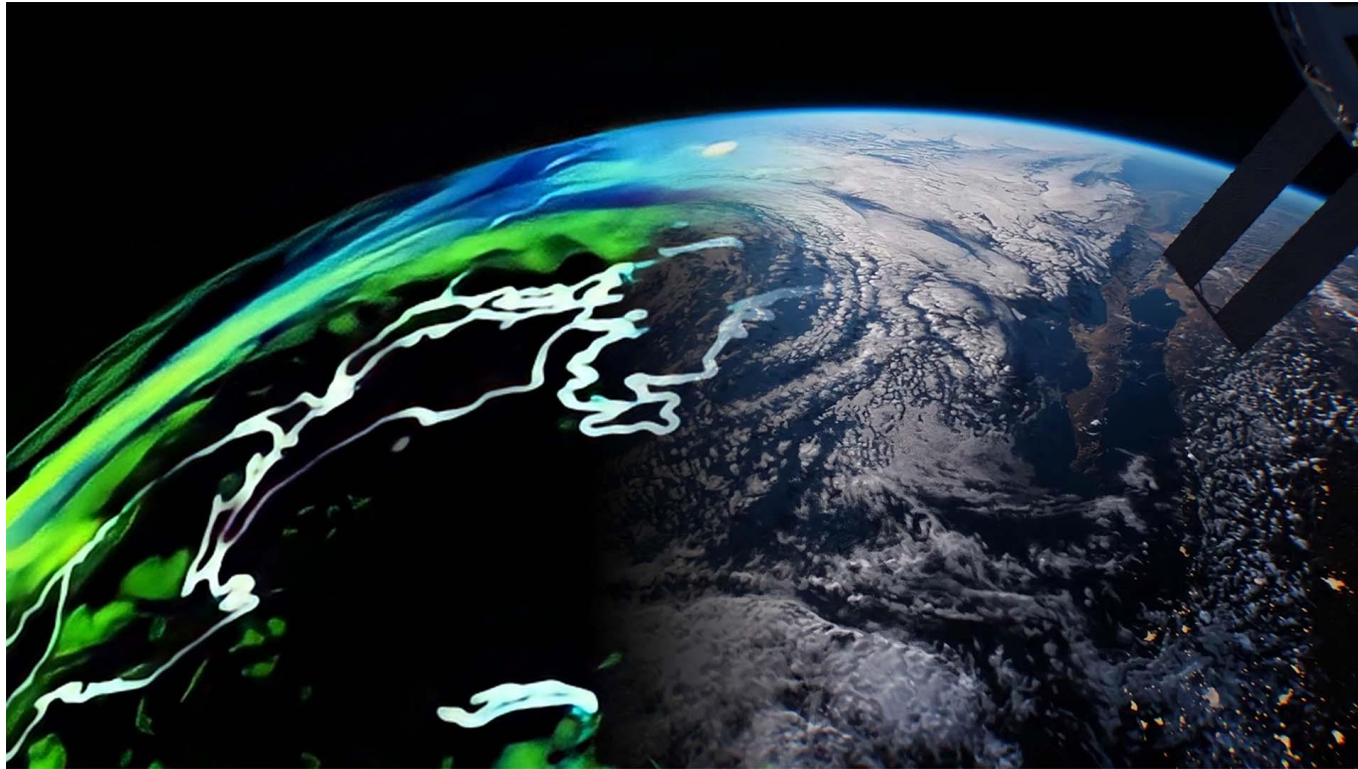
Finally, ***Impact Assessment*** uses the Digital Replica and forecasting capabilities with ML, causality, uncertainty quantification and advanced computation and visualization capabilities for running large amounts of simulated predictions quickly and at various spatial and temporal scales, opening the door to investigating “what-if” scenarios.

These will allow to understand better the impact of one system on another one, and better predict Earth Science events, e.g., severe weather events. This third component provides hypothetical future states of the system.

The [National Oceanic and Atmospheric Administration](#) partnered with [NVIDIA](#) and others to build a digital replica of Earth.

The Earth Observation Digital Twin will use AI technology and NVIDIA's Omniverse computing platform to ingest and analyze NOAA's many massive datasets and display the findings in real time.

The digital twin will integrate data from sensors on land and in the ocean, as well as NOAA and private sector assets in the cryosphere, the atmosphere, and in space.



NOAA на базе ИИ создаст цифрового двойника атмосферы Земли

Цель проекта - перевести метеорологические данные в 3D-визуальный формат, максимально приближенный к реальному восприятию погоды людьми.

Американская военно-промышленная корпорация Lockheed Martin и компания NVIDIA создают цифрового двойника глобальных погодных условий для **NOAA**. Новая технология, построенная на базе системы искусственного интеллекта, объединит данные сенсоров и позволит сформировать более качественную и актуальную модель нашей планеты.

Новая концепция будет называться NOAA Earth Observing Digital Twin. Ее основой будет модель, данные которой в конечном итоге будут поступать в систему прогнозирования погоды.

Объединение технологий искусственного интеллекта Lockheed Martin и Nvidia Omniverse позволит исследователям NOAA создать мощную систему для более эффективного прогнозирования погоды в глобальном масштабе.

ВИП ГЗ

2 сентября 2022 г. Председателем Правительства Российской Федерации, **М. В. Мишустинным**, подписано [распоряжение № 2515-р](#) о выделении Минобрнауки России, Росгидромету, ФГБОУ ВО “Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова” субсидий на выполнение научно-исследовательских работ в рамках реализации **важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ)**, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

Консорциумы исполнителей:

Моделирование глобального климата;

Океаны и моря;

Углерод в экосистемах;

Суша: мониторинг и адаптация;

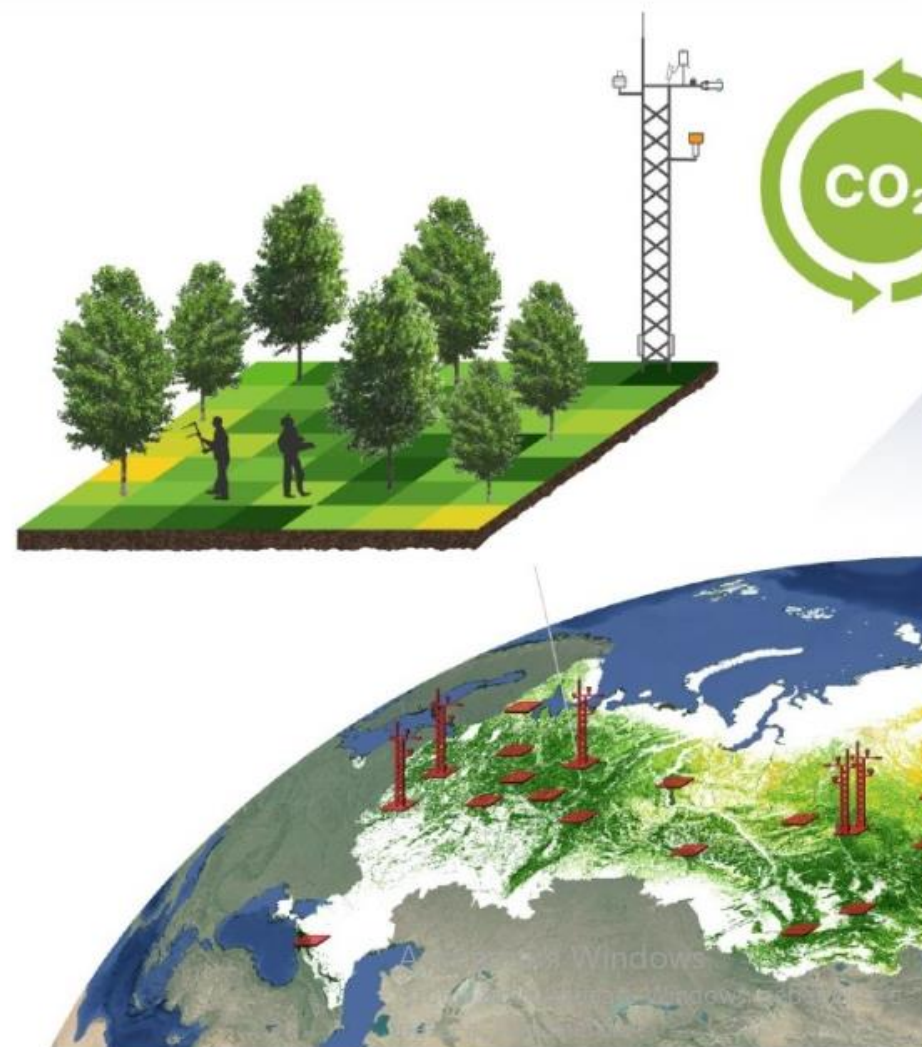
Экономика климата;

Антропогенные выбросы: кадастр.



РОССИЙСКИЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА УГЛЕРОДА

[Подробнее](#)



ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

ЦЕЛЬ

МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Разработать национальную систему мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории РФ на основе интеграции данных

наземных измерений

дистанционного зондирования

математического моделирования

Создать систему учета данных по потокам парниковых газов и бюджету углерода в наземных экосистемах



Активация Windows
Позвольте активировать Windows, перейдите в раздел "Параметры".

[О проекте](#)[Новости](#)[Блоки проекта](#)[Результаты](#)[Лаборатория мониторинга углеродного баланса](#)[Наши видео](#)[Глоссарий](#)

RU EN

[Мониторинг и комплексный анализ потоков углерода](#)[О проекте](#)[Блоки проекта](#)[Результаты](#)[Лаборатория мониторинга углеродного баланса](#)[Наши видео](#)

УГЛЕРОД

Проект ИМКЭС СО РАН "Система мониторинга пулов и потоков углерода в лесных и болотных экосистемах южно-таежной зоны Западной Сибири"

Реализуется в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения

"Национальная система мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации"



Проект нацелен на создание сети мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири на основе стандартизированной инфраструктуры мирового уровня и создание основы для разработки прототипа распределенной информационно-аналитической системы сбора, хранения, обработки и анализа данных мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири опирающейся на цифровой двойник болотных экосистем и цифровую платформу его сопровождения (сервисы, необходимые для его использования).

ЦД болота

Блок 2. Создание концептуальной и программной основы для разработки прототипа распределенной информационно-аналитической системы сбора, хранения, обработки и анализа данных мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири

Три кита распределенной информационно-аналитической системы (РИАС):

- Данные наблюдений и измерений
- Модели
- Сервисы

Результат: количественная оценка потоков парниковых газов и пулов углерода в наземных экосистемах территории и их динамики

Первые задачи

- Концепция прототипа РИАС
- Трансформация наборов данных в базы данных (разработка схем баз данных обеспечивающих хранение, пополнение и доступ к тематическим наборам данных)
- Выбор и подготовка моделей обеспечивающих количественную оценку потоков парниковых газов и пулов углерода в наземных экосистемах территории
- Разработка блок-схем алгоритмов обработки данных текущих измерений и результатов моделирования
- Разработка архитектуры прототипа РИАС и его блоков

Результаты

- Концепция прототипа РИАС - цифровая платформа, интегрирующая оцифрованные данные, модели основных процессов формирования потоков парниковых газов и сервисы, необходимые для ее эффективной работы и использования (пополнения баз данных, запуска моделей, архивации и анализа результатов вычислений, визуализации полученных результатов на выбранной картографической основе и доступа к ним).
- Трансформация наборов данных в базы данных - разработаны схемы баз данных данных: потоков углерода, тепла и влаги для болот территории и "Термический режим почв юга таёжной зоны Западной Сибири" (ThermalRegime) и программный интерфейс для доступа к ним.

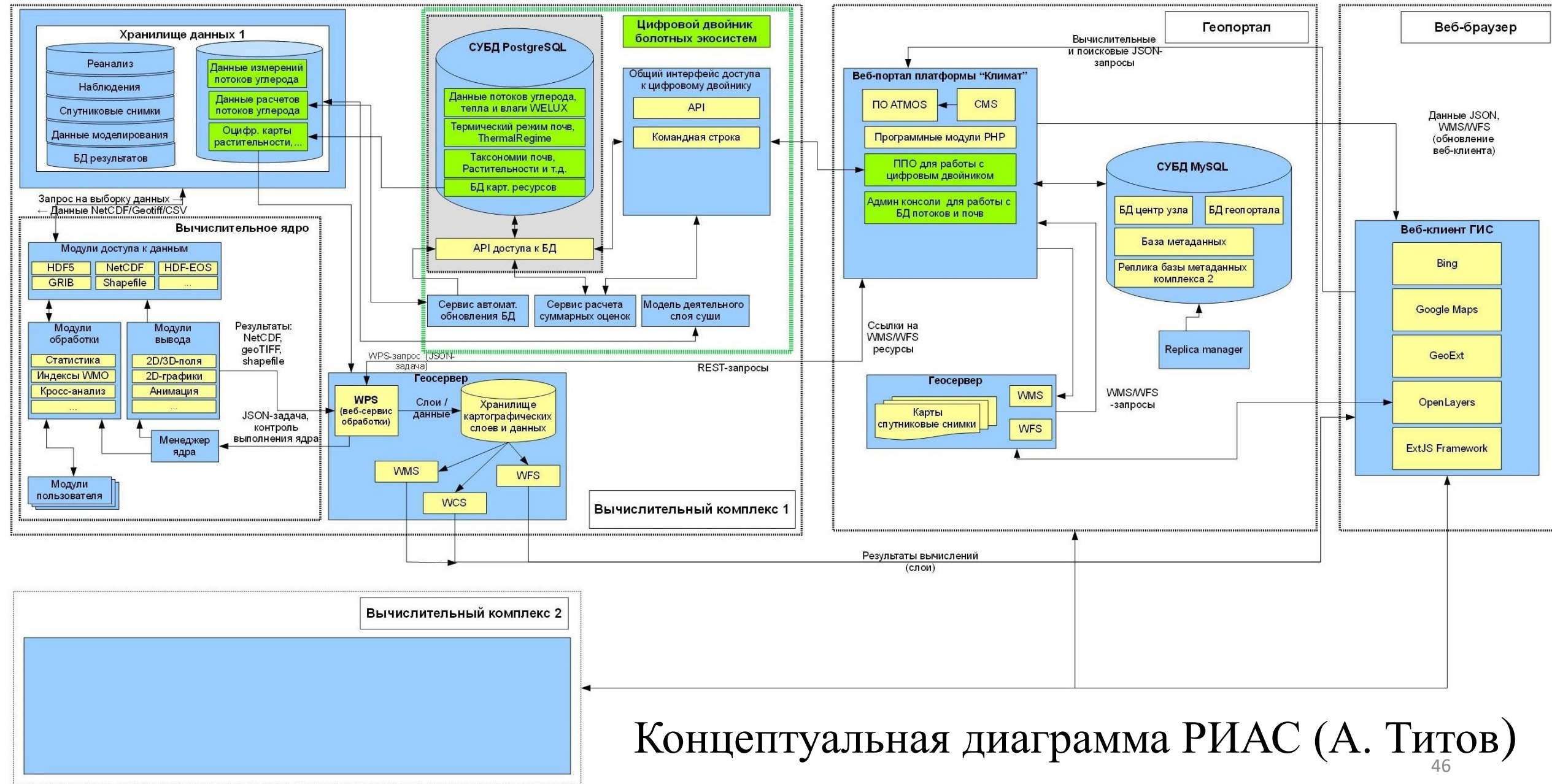
- Подготовлены модели, обеспечивающие количественную оценку потоков парниковых газов и пулов углерода в наземных экосистемах территории:
 - модификация (Богомолов) модели поверхности суши ИВМ РАН – МГУ, позволяющая, по заданному атмосферному форсингу, вычислять локальные и площадные гидротермические характеристики почвы и
 - эмпирическая модель (Дюкарев), позволяющая определять потоки парниковых газов по микрометеорологическим характеристикам
- Разработаны блок-схемы и UML диаграммы алгоритмов обработки потоковых данных измерений типовой станции микрометеорологического мониторинга

- Создана концептуальная и программная основа цифровой платформы мониторинга потоков парниковых газов и пулов углерода в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири, интегрирующей оцифрованные данные, модели основных процессов формирования потоков парниковых газов и сервисы, необходимые для ее эффективной работы (пополнение баз данных, запуск моделей, архивация и анализ результатов вычислений, визуализация полученных результатов на выбранной картографической основе)

Создана концептуальная и программная основа цифровой платформы мониторинга потоков парниковых газов и пулов углерода в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири, интегрирующей оцифрованные данные, модели основных процессов формирования потоков парниковых газов и сервисы, необходимые для ее эффективной работы (пополнение баз данных, запуск моделей, архивация и анализ результатов вычислений, визуализация полученных результатов на выбранной картографической основе

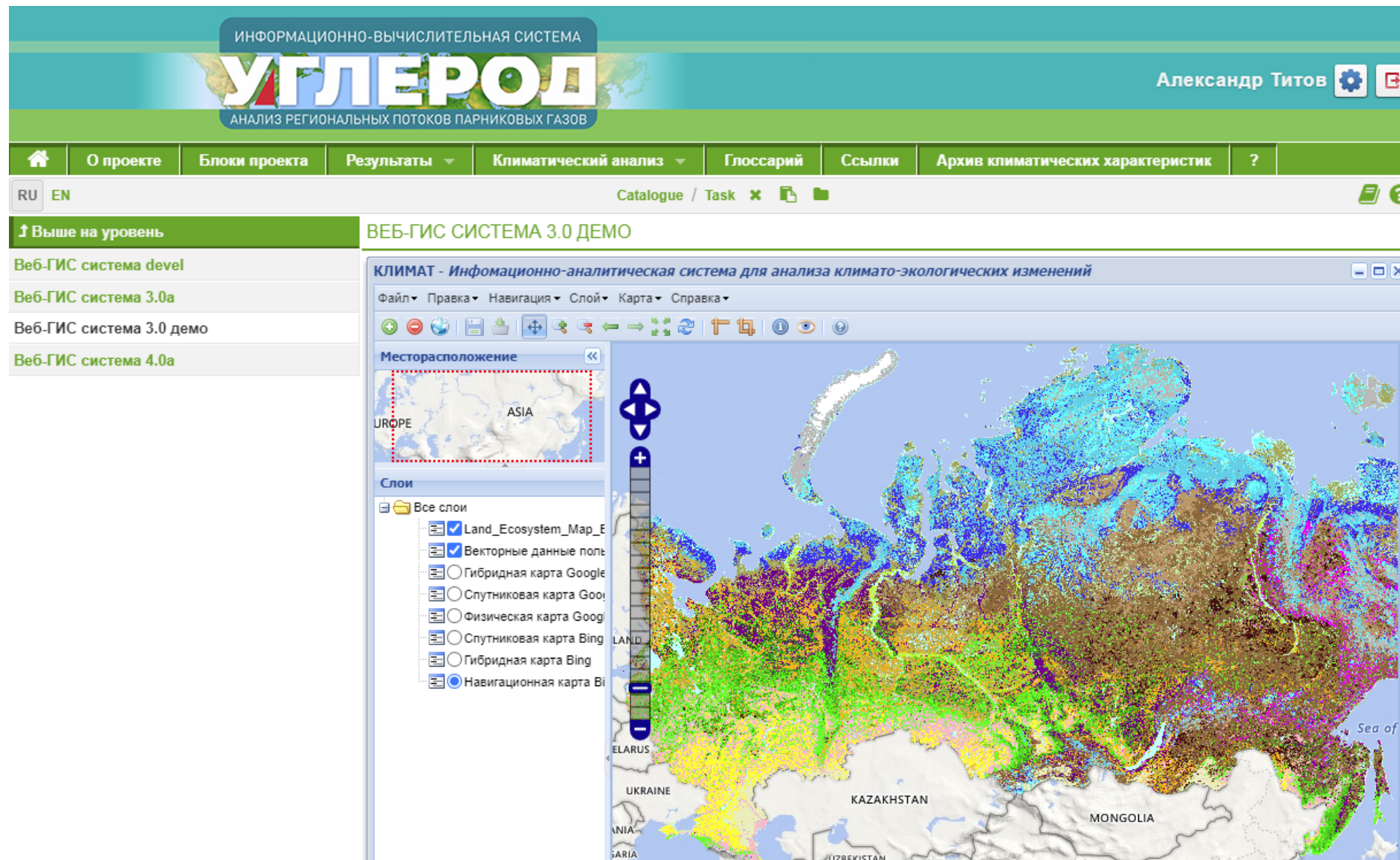
Выбраны и подготовлены модели, обеспечивающие количественную оценку потоков парниковых газов и пулов углерода в наземных экосистемах территории: модификация модели поверхности суши ИВМ РАН – МГУ, позволяющая, по заданному атмосферному форсингу, вычислять локальные и площадные гидротермические характеристики почвы и эмпирическая модель, позволяющая определять потоки парниковых газов по микрометеохарактеристикам.

Архитектура прототипа РИАС и его блоков



Концептуальная диаграмма РИАС (А. Титов)

Карта наземных экосистем ИКИ РАН в интерфейсе геопортала прототипа системы. Геопортал реализован на языках PHP и JavaScript, приложения работы с данными - на языках PHP, Python и GDL.



Спасибо за внимание!