

Цифровые двойники систем и процессов как инструмент современной климатологии

Е.П. Гордов^{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

Адрес для переписки: gordov@scert.ru

Реферат. Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры современной климатологии, инспирированное развитием средств наблюдений и совершенствованием моделей, приведшим к бурному росту объемов климатических данных наблюдений и моделирования, привело к непрерывному усвоению новых подходов и инструментов информационно-вычислительных технологий. Новый, перспективный для использования в климатологии и ее приложениях подход – это уже широко используемая в промышленности концепция «цифрового двойника» (далее – ЦД), в рамках которой реальный (физический) объект заменяется таким его цифровым отражением, с помощью которого можно оптимизировать производство и весь последующий жизненный цикл конкретного изделия или процесса. Поскольку в последнее время ЦД становится очень популярным и в науках об окружающей среде, и климате, а в посвященных его созданию и использованию проектах уже ставят вопрос о ЦД всей планеты, то основы этой концепции, технологические требования, равно как и ожидаемые результаты, включая и возможность получения ответов на актуальные вопросы современной климатологии: «Кто виноват?» и «Что делать?», заслуживают детального обсуждения. Ниже на основе исходных определений ЦД из инженерных наук и приложений будут очерчены его свойства в науках об окружающей среде и представлены основные проекты, направленные на создание и использование ЦД объектов, систем/процессов, представляющих интерес для современной климатологии. Такой анализ позволит не только создать ту основу, которая необходима для разработки таких ЦД, но и определить, что именно может быть получено в результате.

В целом, развитие ЦД может обеспечить следующий шаг в исследованиях окружающей среды, в частности, погоды и климата. Двойники помогут пользователям интерактивно исследовать возможные изменения климата и обеспечивать их необходимой для адаптации климатической информацией. Кроме того, они смогут помочь в создании научной основы для реализации программы использования экосистем, для компенсации промышленных выбросов парниковых газов, необходимой для перехода к «зеленой» эконо-

мике. Конечно, для достижения этой цели необходимо создавать ЦД для многих климатических процессов и участвующих в формировании климата физических и экологических систем.

Ключевые слова. Цифровой двойник, большие данные, виртуальная среда, изменения климата.

Digital twins of systems and processes as a mean of modern climatology

E.P. Gordov^{1),2)}

¹⁾ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,
10/3, Akademicheskii ave., Tomsk, 634055, Russian Federation

²⁾ Tomsk Branch of Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
4, Akademicheskii ave., Tomsk, 634055, Russian Federation

Correspondence address: gordov@scert.ru

Abstract. Development of the information and computational infrastructure of modern climatology, inspired by the rapid growth in the volume of climate observation and modeling data due to the observational tools and models improvements, has led to the continuous assimilation of new approaches and tools of information and computational technologies. One of such new approaches, promising for use in climatology and its applications, is the concept of a “digital twin” (hereinafter – DT), which is already widely used in industry and business. In it a real (physical) object is replaced by its digital analogue, which can be used to optimize production and all the subsequent life cycle of a particular product or process. Quite recently, the DT has become very popular in the environmental and climate sciences, and in the projects dedicated to its creation and use, the question of the DT of the entire planet is already being raised. That is why basics of this concept, technological requirements, as well as the expected results, including the possibility of obtaining answers to topical questions of modern climatology: “Who is to blame?” and “What to do?” deserve detailed discussion. Below, based on the initial definitions of the DT from engineering sciences and applications, its properties in environmental sciences will be outlined and the main projects aimed at the creation and use of the DT objects, systems/processes of interest to modern climatology will be presented. Such an analysis will allow not only determine the basis that is necessary for the development of such DTs, but also outline what exactly might be obtained as a result.

All in all, the development of the DT could provide the next step in environmental research, in particular weather and climate. Twins will help users interactively explore possible climate change and provide them with the climate information they need to adapt. In addition, DTs will be able to help in creation of a scientific basis for the implementation of a program of using ecosystems to offset industrial emissions of greenhouse gases, necessary for the transition to a green

economy. Of course, to achieve this goal, it is necessary to create a DT for many climatic processes and the physical and ecological systems involved in climate formation.

Keywords. Digital twin, big data, virtual environment, climate change.

Введение

За последние десятилетия, по мере роста интереса исследователей и общества к изучению причин и последствий изменений климата, благодаря развитию инструментов локальных и дистанционных измерений характеристик окружающей среды, метеорологических и климатических моделей и поддерживающих их вычислительных ресурсов, резко увеличилась скорость накопления и объем климатических данных. По мере их трансформации в то, что сейчас принято называть «большие данные» (см., например, <https://www.bigdataschool.ru/> или <https://www.oracle.com/cis/big-data/what-is-big-data/>), развивалась и информационно-вычислительная инфраструктура поддержки климатических исследований (датчики, модели, сети, программные средства и вычислительные ресурсы). В процессе развития эта инфраструктура постоянно впитывала новые элементы, появляющиеся в ходе развития информационно-вычислительных технологий, являясь естественной областью для их использования, и, в свою очередь, оказывала стимулирующее обратное влияние на их развитие. На этом пути, по сути, уже произошло преобразование центров хранения климатических данных и обеспечения доступа к ним в центры поддержки удаленного анализа климатических данных, обеспечивающие пользователей необходимым для такого анализа инструментарием. Одним из примеров является Библиотека климатических данных Международного научно-исследовательского института по вопросам Климата и Общества (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/>), позволяющая пользователю через обычный веб-браузер выполнять анализ больших архивов климатических данных. Следующим шагом по освоению таких новых, перспективных для использования в климатологии и ее приложениях продуктов развития информационно-вычислительных технологий является уже широко используемая в промышленности концепция «цифрового двойника» (далее – ЦД), в рамках которой реальный (физический) объект заменяется таким его цифровым отражением, с помощью которого можно оптимизировать производство и весь последующий жизненный цикл конкретного изделия или процесса. Так как в последнее время ЦД становится очень популярным и в науках об окружающей среде, и климате, а в посвященных его созданию и использованию проектах уже ставят вопрос о ЦД всей планеты, то основы этой концепции, технологические требования, равно как и ожидаемые результаты (среди которых и возможность получения ответов на актуальные вопросы современной климатологии: «Кто виноват?» и «Что делать?»), заслуживают детального обсуждения. Ниже, на основе исходных определений ЦД из инженерных наук и приложений, будут очерчены его свойства в науках об окружающей среде и представлены основные проекты, направленные на создание и использование ЦД

объектов, систем/процессов, представляющих интерес для современной климатологии. Помимо понимания той основы, которая необходима для разработки таких ЦД, этот анализ позволит понять, что именно может быть получено в результате развития этого направления. Заметим, что современная климатология уже стала многодисциплинарной областью, объединившей практически все разделы наук об окружающей среде (более широко наук о Земле), значительная часть из которых используется при изучении формирования и динамики климата, и пересекающаяся с ней часть – при изучении откликов на климатические изменения. Поэтому в последующем тексте климатология и науки об окружающей среде будут использоваться как синонимы.

История и определения

Сама концепция ЦД как динамической виртуальной модели системы, процесса или услуги была предложена еще в 2002 году. Согласно одной из основополагающих работ ее автора (Grieves, 2014), ЦД состоит из физического объекта в реальном пространстве, виртуального объекта в виртуальном и связей, обеспечивающих поток данных из реального пространства в виртуальное и поток информации из виртуального пространства в реальное. Таким образом, ЦТ может рассматриваться как цифровая копия реального объекта и происходящих с ним процессов. Поведение физического объекта преобразуется в поведение виртуального, и оба объекта синхронизированы. Одним из характерных свойств ЦД является связь реального и виртуального объектов с помощью обмена данными в режиме реального времени, которая обеспечивает их синхронизацию. Конечно, в первую очередь, данные от различных датчиков, описывающие состояние физического объекта, поступают к виртуальному, но обратный поток информации также существует и его наличие является принципиально важным для инженерных промышленных приложений (Segovia, Garcia-Alfaro, 2022). В настоящее время ЦД, по сути, стал очередной версией инструмента для автоматизации различных процессов в промышленности, экономике и управлении. Предшествующие версии, такие, как некогда популярные автоматизированные системы управления (далее – АСУ) технологических процессов и территорий, не дали желаемого результата в силу отсутствия адекватных моделей, необходимых датчиков, программных средств и вычислительных ресурсов. Все эти инструменты появились в ходе так называемой четвертой промышленной революции, которую можно кратко определить как тотальную цифровизацию всех сторон жизни человека и общества.

Основная идея многих определений ЦД, которые представлены в литературе, – это синхронизированное многоцелевое моделирование физической системы или процесса, отображающее (с помощью использования исторических и текущих измерений) поведение ее физического двойника (реальной системы или процесса). Более обще ЦД определяется как постоянно меняющийся цифровой профиль объекта или процесса, позволяющий пользователю на основании анализа огромного объема исторических и актуальных данных, полученных в ходе измерений и моделирования целого ряда показателей объ-

екта или процесса в реальном мире, получить ответы на поставленные вопросы, дать ему возможность управлять как ходом, так и результатом процесса. Использование ЦД дает возможность осуществлять в реальном времени мониторинг систем и процессов, а также своевременный анализ данных для предотвращения проблем до их возникновения (так называемая предиктивная аналитика); позволяет планировать профилактический ремонт с целью сокращения и предотвращения простоев; планировать будущие обновления и осуществление новых разработок. Цифровой двойник становится точной и актуальной копией физической системы, которая также отражает эксплуатационный контекст физического оборудования. Наличие постоянной связи ЦД с физическим прототипом позволяет в динамике отслеживать производительность и данные о техническом обслуживании каждого физического аналога, выявлять и сообщать об отклонениях, а также планировать техническое обслуживание.

Можно согласиться с утверждением (Malik, Vrem, 2020), что основа идеи о построении и использовании информационного (виртуального) ЦД далеко не нова и практически всегда использовалась для инженерного конструирования, строительства и понимания сложных физических систем. Ранее это был ЦД, существовавший лишь в воображении, и возможности его практического использования для описания функционирования систем или устройств были достаточно ограничены. В промышленности ситуация начала меняться с середины прошлого века, с появлением сначала двухмерного, а затем и трехмерного автоматизированного проектирования и построенного на их основе динамического вычислительного моделирования. В естественных науках появление компьютеров также привело к трансформации умозрительных моделей, подкрепленных подходящими математическими уравнениями, в численные модели, позволяющие с помощью вычислительных экспериментов анализировать временное поведение сложных систем. При этом о такой модели можно было забыть после получения результата (запуска производства). Появление концепции ЦД сделало моделирование, непрерывно использующее данные о поведении моделируемой (реальной) системы, базовой функциональностью информационно-вычислительных систем, описывающих жизненный цикл детали/устройства в производстве или временную (и/или пространственную) эволюцию сложной системы в науке. Использование ЦД в производстве позволяет вносить изменения в производство на основе сравнения вычисленных и «реальных» данных.

Согласно (Rasheed et al., 2019), главные технологические прорывы, приведшие к успешному использованию ЦД в различных областях, – это развитие Интернета вещей, обеспечивающее поступление данных от датчиков, машинное обучение и искусственный интеллект, обеспечивающие возможность глубокого анализа данных от датчиков и результатов моделирования, и появление графических процессоров, блоков тензорной обработки, равно как и облачных, и граничных вычислений. Конечно, в общем случае, ЦД опирается на комплекс цифровых технологий, которые используют подходы статистического анализа, машинного обучения, химии, физики, теории

управления, теории надежности, теории массового обслуживания, численного моделирования и оптимизации. Согласно отчету Oracle (Oracle. Digital Twins for IoT Applications ..., 2017), позитивы от использования ЦД включают: удаленный мониторинг и управление в режиме реального времени; сценарный анализ и оценку рисков; более эффективные системы поддержки решений; персонализацию продуктов и услуг: повышение информированности заинтересованных сторон.

Центральное место в ЦД занимает физическое моделирование меняющейся во времени системы/процесса, позволяющее на основе данных измерений, адекватной математической модели и глубокого анализа всех полученных данных прогнозировать поведение цифровой модели и, в случае необходимости, изменять сам физический объект/процесс. Конечно (Singh et al., 2021), термин ЦД относится к виртуальной копии или модели реального физического объекта, которые взаимосвязаны обменом данными в реальном или выбранном режиме времени. Цифровая модель может считаться версией ЦД, в которой обмен данными между физическим цифровым объектом производится вручную, т.е. изменения физического объекта не отражаются сразу в цифровом аналоге (и наоборот). Связь реального и виртуального объектов с помощью обмена данными в режиме реального времени, обеспечивающая их синхронизацию, является одним из характерных свойств ЦД. Несмотря на важность наличия обратного потока информации к виртуальному объекту, часто используется и такое понятие, как цифровая тень – такая версия ЦД, в которой данные о физическом объекте автоматически поступают к цифровому, в то время как обратное выполняется вручную. В этом случае изменения физического объекта сразу отображаются в цифровом. В ЦД же автоматически организуется двунаправленный поток данных и изменения в одном объекте меняют другой.

Конечно, ЦД является развитием численного моделирования, однако, используя Интернет вещей, они преодолевают его ограничения. Основное отличие цифровой модели от ЦД – это природа и направление потоков данных между физическим и виртуальным объектом. Цифровая модель является цифровой версией существующего объекта, полученной с помощью численной реализации его математической модели. Она не предусматривает автоматического обмена данными между ними и изменения состояния объекта после создания модели никак не влияют на модель, а значит и результаты моделирования. Если модель получает данные от физического объекта и усваивает их, то она актуализируется на основе поступающей новой информации и мы имеем дело с цифровой тенью. В ЦД поток данных автоматически синхронизирует цифровой объект с текущим состоянием физического, а цифровой объект посылает управляющую информацию физическому объекту. Таким образом, изменение состояния физического объекта автоматически ведет к изменениям цифрового и наоборот. Как правило, модель предсказывает поведение физического объекта на основе сделанных вначале предположений, в то время как ЦД использует данные о его текущем и прошлом поведении. Ясно, что опирающееся на первые принципы моделирование из-за необходимости использо-

вания различных предположений на пути от наблюдения и понимания процесса, математического описания его до решения полученных уравнений описывает лишь часть интересующего исследователя процесса. Его развитие, получившее название «опирающееся на данные моделирование» (Solomatine et al., 2009; Habib et al., 2021) основано на том предположении, что данные отражают как известную физику реальности, так и неизвестную. Популярность этого подхода выросла благодаря появлению недорогих датчиков, позволяющих регистрировать различные виды данных (текст, звук, изображение, включая и гиперспектральное, видео), современных вычислительных библиотек (tensorflow, torch, openAI) и недорогой вычислительной инфраструктуры (графические процессоры, блоки тензорной обработки, облачные и граничные вычисления). Некоторым преимуществом таких моделей является то обстоятельство, что они могут улучшаться по мере поступления новых данных. В то же время, они остаются «черным ящиком», что существенно ограничивает область их применения.

Цифровой двойник для наук об окружающей среде и сервисы, необходимые для его использования

На основе приведенных выше определений можно выделить те особенности ЦД, которые делают эту концепцию полезной и перспективной в науках об окружающей среде и, в частности, в климатологии, а также определить те сервисы, которые необходимы для его создания и использования. Физическими объектами в нашем случае являются экосистемы, окружающая среда выбранной территории (региона, страны), геосферы, вся планета Земля и/или происходящие в них процессы.

Хотя различные определения ЦД отражают специфику областей их использования (научные, промышленные, для стандартизации и пр.), общим является наличие в них цифровой реплики реального объекта (Hartmann, Van der Auweraer, 2020). Благодаря связи между реальным и виртуальным миром, обеспеченной потоками данных и информации, виртуальный объект существует одновременно с реальным. Так как виртуальный цифровой объект может быть оторван от реального, его можно изменять не меняя реального. Здесь сразу открывается возможность: используя основанные на данных модели, получать такие знания об объекте, которые было бы невозможно извлечь только из традиционных физико-математических моделей, использующих наблюдения.

Также конечная цель, обозначенная в таких определениях ЦД, как динамическое представление реального объекта/процесса, которое отражает его состояния и поведение в процессе жизненного цикла и может быть использовано для мониторинга, моделирования и анализа его текущих и будущих состояний и для вмешательств в них, или виртуальное представление физического объекта или процесса, реализованное через данные и моделирование, позволяющее осуществлять в реальном времени мониторинг и прогнозирование его поведения и создающее основу для улучшенного принятия решений (Ariesen-Verschuur et al., 2022), может принадлежать любой задаче из нашей области.

Ясно, что необходимые для создания и использования ЦД технологии, включающие в себя основанное на физике математическое моделирование систем и процессов, использующее данные моделирования, инструменты больших данных, вычислительные ресурсы, сети и платформы, а также взаимодействие человека и машины уже стали неотъемлемой частью климатологии (Гордов и др., 2018). То же можно сказать и об играющей важную роль в работе ЦД использовании различных способов усвоения данных, подтягивающих результаты вычислительного моделирования к данным наблюдений и о требовании того, что ЦД должен позволять делать соответствующие предсказания (прогнозы) с необходимым уровнем информации в подходящее время.

Основным отличием того, что подразумевается в концепции ЦД в представленных в литературе примерах разработки ЦД для климатологии от исходной версии, является отсутствие требования о наличии передачи в реальном масштабе времени информации от виртуального образа к реальному объекту/процессу. Эта важная для инженерных приложений возможность вмешательств «на ходу» практически нереализуема в нашей области. К счастью или к несчастью, но мы не можем управлять объектами/процессами в ней. Наверное, единственным исключением здесь являются искусственно контролируемые экосистемы типа теплиц. Поэтому здесь не всегда является важным отличие ЦД от цифровой тени и даже тогда, когда для анализа используются только данные наблюдений, речь идет о ЦД. Ведь цифровая тень – система связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта, содержащихся в данных, получаемых с реального объекта и/или от его моделей. Конечно, цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных и для которых строилась описывающая его модель, но не позволяет моделировать ситуации, в которых реальный объект не эксплуатировался. Однако, именно такая ситуация характерна для задач климатологии.

Некоторые общие характеристики ЦД для окружающей среды приведены в отчете Национального океанографического центра Великобритании (www.met.rdg.ac.uk) (Siddorn et al., 2022). В частности, здесь также обсуждается отличие трех основных подходов, активно используемых и развиваемых в климатологии. В первую очередь, это цифровая модель – содержащее информацию представление системы, которое может использовать методы работы с данными и/или получение знаний на основе полученных с его помощью данных. Хотя она может опираться на наблюдения, непрерывное автоматическое обновление, вызванное изменениями в реальном мире в ней не используется. Примером может быть климатическое моделирование или использующая наблюдения климатология с координатной сеткой.

Следующий подход – это цифровая тень, т.е. цифровая модель, интегрирующая информацию от ее физического оригинала. Наиболее известный пример – прогноз погоды, в процессе подготовки которого информация от физического оригинала усваивается моделью в режиме реального времени, однако обратного влияния прогноза на погоду нет.

Достаточно редкий пока вариант, полностью соответствующий каноническому определению ЦД – это цифровая модель с двусторонним потоком информации в режиме реального или правильно выбранного времени. Хотя такие ситуации характерны лишь для инженерных приложений, адаптационные мероприятия можно рассматривать как обратную связь ЦД с реальностью. Например, вызванные неблагоприятным прогнозом изменения в реальном мире, произведенные в правильное время, необходимо учитывать при подготовке нового прогноза.

В этом отчете также сформулированы основные требования к структуре управления потоками информации в ЦД для окружающей среды. С точки зрения структуры управления потоками информации, обеспечивающей полноценное использование результатов, получаемых с помощью ЦД, все три версии ЦД одинаковы. Действительно, если глобальная модель земной системы прогоняется с усвоением наблюдений в реальном времени (цифровая тень) и она создана так, чтобы ее результаты были стандартизованы и переданы другой группе, то можно получить, например, климатологию экстремальных порывов ветра в городе (цифровая модель). Эта цифровая тень может быть также использована для получения в реальном времени вероятностного прогноза, например, для сельского хозяйства, адаптирующегося на этой основе (ЦД). Необходимыми элементами ЦД, которые должны быть связаны структурой управления потоками информации, являются: данные от системы наблюдения за физическим объектом; данные из других источников (архивы, другие ЦД и др.); платформа, обеспечивающая как хранение и доступ к данным, так и необходимые вычислительные возможности; аналитический уровень, преобразующий данные наблюдений в понятные знания (с помощью использующих сценарии прогнозных моделей и/или искусственного интеллекта, определяющих возможности и их последствия); и уровень, обеспечивающий интерактивность (интерфейс, связывающий ЦД, данные и пользователя). Ясно, что в последнем случае, взаимодействие с пользователем предусматривает визуализацию, задаваемые пользователем преобразования результатов, возможность использования научных инструментов анализа результатов. Следует добавить, что интуитивно понятный интерфейс пользователя, равно как и его опыт, является ключевым для реализации потенциала ЦД. Для создания цифрового инструмента, обеспечивающего пользователя информацией для действий, необходимо понимание потребностей пользователя. Это могут быть и ГИС-слои, допускающие использование в экспертных системах, и простые предупреждения об угрозах. Собственно, структура управления потоками информации для ЦД должна адекватно определять все стороны, процессы, информацию и технологии для поддержки развития и использования информационно-вычислительной (кибер-физической) инфраструктуры, включающей и ЦД.

Конечно, уже само определение ЦД как постоянно меняющегося цифрового профиля физического объекта или процесса, предоставляющего накопленные исторические, и актуальные данные измерений и моделирования для анализа и прогноза поведения или отклика на изменение внешних условий

является многообещающим для общих и конкретных задач наук об окружающей среде. А обязательный в рамках ЦД анализ накопленных и поступающих данных может дать не только информацию о состоянии экологического объекта или процесса и прогноз его поведения и взаимодействия с другими системами, но открывает и перспективную возможность управления поведением объекта и процессами его взаимодействия с другими системами. Однако, то обстоятельство, что интегрированная в цифровой двойник модель должна иметь адекватную, использующую технологии Интернета вещей, систему усвоения актуальных данных измерений, уровень которой не уступает системам, используемым в современных моделях прогноза погоды, а оперативный анализ результатов прогнозного моделирования может потребовать привлечения нейронных сетей, несколько умеряет энтузиазм разработчиков. Кроме того, распространение этого подхода на нетехнические системы, такие, как экосистемы или окружающая среда выбранной территории, далеко не очевидно. Ведь модель объекта и его эволюции (процесса) играет существенную роль в эффективности ЦД, но экосистемы/территории являются сложными системами, а для них такую модель, которая позволит получить ответы на все возникающие у исследователя или практика вопросы, построить практически нельзя. Поэтому существенным элементом создания необходимого ЦД является выбор таких моделей экосистемы и процессов, происходящих в ней и с ее участием, использование которых позволит получить ответы на ключевые вопросы. Необходима также такая вычислительная система, которая объединяет цифровые двойники и их реальные прототипы и позволяет собирать данные и обмениваться ими. Конечно, сам по себе цифровой двойник экосистемы/территории не дает возможности получить ответы на интересующие нас вопросы. Для этого необходимо создание цифровой платформы (гибкой программной инфраструктуры) сопровождения цифрового двойника экосистемы/территории, которая, используя смежные «сквозные» цифровые технологии искусственного интеллекта, больших данных, распределенных реестров и другие современные подходы информационных технологий, позволяет реализовать необходимые сервисы. В первую очередь к ним относятся: сервис, обеспечивающий доступ к вычислительным мощностям, функционирующий по модели «on demand»; сервис, предоставляющий доступ к цифровому профилю объекта, платформенные технологии управления процессами моделирования и данными (Simulation Process & Data Management, SPDM), а также вычислительными ресурсами (Simulation Process, Data and Resources Management, SPDRM). Ясно, что ведущиеся исследования приводят к тому, что модели экосистем и процессов постоянно уточняются, поэтому в такой платформе должна быть обеспечена возможность уточнения и даже замены используемых моделей.

Важность исследований и разработок в этом направлении определяется их ожидаемой ролью в разработке ставших актуальными стратегий адаптации к изменениям климата. Так, в новой стратегии ЕС по адаптации к изменению климата (ЕС, 2021) утверждается, что цифровые технологии, в частности, ЦД, должны обеспечивать научную основу для принятия решений на основе

оценки рисков от прошлых, настоящих и возможных в будущем последствий. ЦД, являющиеся виртуальными представлениями физических систем Земли, отражают их поведение и могут использоваться для адаптации к изменениям климата в нескольких направлениях (Rigon et al., 2022). В частности, это виртуальные модели зданий, городов, других систем, которые могут выявить потенциальную уязвимость к экстремальным погодным явлениям или другому воздействию, вызванному изменениями климата. Они также могут использоваться для проверки эффективности адаптационных стратегий в почти реальных ситуациях.

Существующие ЦД и перспективы

Метеорология

Как уже упоминалось выше, метеорология является одной из важных для применения ЦД областей. В частности, многие метеорологические организации в мире интенсивно используют ЦД, не всегда называя их так. Они используют цифровые модели территории (поверхность, растительность, здания), математические модели и большие данные, поступающие от многочисленных источников, чтобы создать численный прогноз погоды, результаты которого затем доводятся до потребителя (Lazo et al., 2011; Bauer et al., 2015; Ronda et al., 2017). Кроме того, в этой области развиты наиболее совершенные методы усвоения, почти в реальном масштабе времени, больших данных хорошо распараллеленными моделями, организовано хорошо документированное архивирование данных и обеспечение доступа к ним. Одно из важных приложений таких ЦД – использование близкого к реальному времени прогноза для уточнения сценариев систем поддержки решений (Benjamin et al., 2016). Еще одно из применений концепции ЦД – использование вычислительных моделей для тестирования новых измерительных устройств до их создания или развертывания. В этом случае роль реальности выполняют системы симулирования наблюдательных экспериментов (observing system simulation experiment (OSSE)). Они позволяют имитировать процедуры, используемые при анализе различных наблюдений (спутниковых, баллонных, наземных и др.) для уточнения состояний атмосферы, океана или поверхности (Errico et al., 2013; Privé et al., 2013; James, Benjamin, 2017; Hoffman, Atlas, 2016). Конечно, в метеорологии существует еще много направлений, в которых развитие идей ЦД может оказаться полезным, примеры которых можно найти в следующих работах (Price et al., 2018; Nipen et al., 2019; Wang et al., 2008; Вязилов, 2022).

Экосистемы и окружающая среда территории

Почва

Одним из перспективных приложений подхода к «цифровизации» экосистем является разработка ЦД микробиома почвы для оценки потоков парниковых газов в условиях глобальных изменений (Mukhtar et al., 2022). Чтобы такие ЦД были чем-то большим, чем просто большой набор данных, они

должны количественно воспроизводить динамику микробных популяций в ходе сложных биогеохимических процессов, происходящих в почве. Метаболизм микробов является большим источником основных парниковых газов и этот подход, помимо получения количественных оценок для потоков в современных и сценарных условиях, открывает возможность и для управления ими, и/или плодородием почвы.

Лес

Несколько проектов, направленных на создание ЦД такой климатически важной экосистемы, как лес, уже реализуется. В частности, в недавней работе (Buonoscore et al., 2022) предложен подход к разработке ЦД леса, который должен использовать как технические новинки сбора информации на уровне деревьев, так и такие, уже устоявшиеся технологии мониторинга состояния лесов, как дистанционное зондирование. Предлагается интегрировать как мониторинг характеристик состояния отдельных деревьев и соответствующей окружающей среды, так и мониторинг характеристик состояния леса. Для создания ЦД предлагается измерять (хотя бы раз в час) и записывать 15 наборов переменных из двух групп: для дерева и для леса. В частности, для дерева это ИК температура листьев, спектральные компоненты света, радиальный рост, рост корней, потоки соков, летучие органические вещества, механическая устойчивость дерева. Для почвы, на которой растет дерево, это ее микробиология, влажность, питательные вещества, и дыхание. Кроме того, предлагается измерять метеорологические характеристики окружающего пространства: температуру воздуха, характеристики качества воздуха, влажность, скорость ветра. Этот набор данных позволит моделировать физические и биофизические процессы, происходящие как с деревом, так и вблизи него, такие как генерация биогенных летучих органических компонент, фенология дерева, рост биомассы, транспирация и устойчивость дерева. По сути, это даст описание виртуального дерева в виртуальном лесу и позволит, в частности, понять физиологические отклики дерева на засуху и гибель лесов при быстрых изменениях климата. Также предлагается измерять характеристики обмена энергией между атмосферой и поверхностью, смены режимов погоды, гидрологический режим бассейна, характеристики травоядной биоты, управления состоянием леса и др., используя для этого как технологии зондирования и мачты для измерения потоков газов и энергии, так и полевые работы по отслеживанию конкуренции деревьев и последствий работ по управлению лесом. Все это должно дать опирающуюся на данные систему, интегрирующую эко-физиологические процессы на уровне дерева с данными по структуре и динамике леса, которая позволит понять, как отклики леса на изменения климата, так и его роль в этих изменениях.

Менее амбициозный проект по созданию прототипа цифрового двойника локального участка леса, как элемента системы климатического мониторинга представлен в работе (Канев и др., 2022). Здесь, на первом этапе планируется создание сначала цифровой модели лесного участка (описывающего его структуру, функционал и эволюцию), а затем и собственно цифро-

вого двойника состоящего из цифровой модели и информационных связей с локальным участком леса. В основе цифрового моделирования локального участка леса лежит использование технологий наземного и воздушного лазерного сканирования с применением беспилотных летательных аппаратов с установленными лазерными сканерами. В результате такой съемки формируется облако точек, описывающих взаимное расположение объектов на участке сканирования и их форму. Сопоставив полученную трехмерную структуру лесного участка с видеорядом съемки можно полностью воссоздать отснятый участок с помощью технологий моделирования. В конечном счете, это позволит автоматизировать таксацию лесного участка, промоделировать различные сценарии развития лесных насаждений до 100 лет при разных способах ведения лесного хозяйства и провести анализ поглотительной способности углерода на период до 50 лет. Регулярное сканирование лесных участков позволит наблюдать их развитие и уточнять цифровой двойник, а также отслеживать процессы, не учтенные в цифровой модели лесного участка (например, незаконные вырубки). Таким образом, цифровой двойник локального участка леса позволяет получать автоматизированную оценку запасов древесины, проводить сценарное моделирование динамики лесных массивов для повышения качества эксплуатации лесного хозяйства, анализировать и обосновывать выбор стратегии ведения лесного хозяйства и лесопользования в эксплуатационных и защитных лесах РФ с позиций их климаторегулирующих функций.

Болото

Работы по созданию прототипа ЦД такой климатически существенной экосистемы как болото и платформы его сопровождения для использования в рамках создаваемой в России единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ, в том числе и парниковых газов (https://www.economy.gov.ru/material/news/v_rossii_poyavitsya_nacionalnaya_sistema_monitoringa_klimaticheskii_aktivnyh_veshchestv.html) начаты в ИМКЭС СО РАН. Основной задачей здесь является получение количественных оценок потоков и пулов углерода болотными экосистемами таежной зоны Западной Сибири и их динамики в меняющихся климатических условиях. Необходимым этапом работы для формирования ЦД болота, в первую очередь, является «оцифровка» всех доступных результатов наблюдений объекта (картирование, геоботанические описания, характеристики почвы, запасы торфа, гидрология, и т.п.) и организация оцифрованных данных и имеющихся (уже цифровых) доступных данных инструментальных наблюдений и моделирования (измерения и моделирование гидрометеорологических характеристик, потоков парниковых газов и т.п.) в реляционные базы данных, обеспечивающие централизованный сбор, хранение, поиск, выборку данных и метаданных собранных характеристик объекта. Переход от исходного формата файлов данных к универсальному SQL интерфейсу обеспечивает основу автоматизированного обновления и унифицированной комплексной обработки данных разных источников. Следующим, и ключевым этапом, является

подбор, разработка и валидация математических моделей высокого уровня адекватности для основных процессов формирования потоков парниковых газов. В качестве таких моделей выбраны модификация модели поверхности суши ИВМ РАН – МГУ, позволяющая, по заданному атмосферному форсингу, вычислять локальные и площадные гидротермические характеристики почвы, включая потоки тепла и влаги (Богомолов и др., 2020), и эмпирическая модель, позволяющая определять потоки парниковых газов по заданным или измеряемым микрометеорологическим характеристикам (Dyukarev, 2017; Dyukarev et al., 2019; Дюкарев, 2020). Использование модели поверхности суши в цифровом двойнике болота носит вспомогательный характер, т.к. ее функция здесь – это вычисление гидротермодинамических характеристик, влияющих на потоки парниковых газов, и результаты выполняемых измерений используются только для ее валидации и коррекции результатов моделирования. Основной моделью цифрового двойника, которая работает на основе потоковых данных камерных и пульсационных измерений, является эмпирическая модель потоков. Наличие этих моделей, их валидация на ключевых участках позволит не только восстанавливать пропуски в результатах прямых измерений характеристик потоков, но и осуществить переход к получению количественных оценок для рассматриваемой территории. Следующим этапом, необходимым для решения поставленных задач и создания, в конечном счете, прототипа распределенной информационной системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых газов болотных экосистем на основе цифрового двойника, является разработка необходимых сервисов и создание гибкой программной инфраструктуры цифровой платформы сопровождения цифрового двойника экосистемы. К числу таких сервисов относятся сервисы пополнения баз данных, запуска моделей, архивации и анализа результатов вычислений, в частности, вычисления потоков парниковых газов для заданных интервалов времени (30 минут, сутки, декада, месяц, вегетационный сезон и год) на ключевых участках и на выбранной территории. Существенную роль также играют сервисы, обеспечивающие визуализацию полученных результатов на выбранной картографической основе и доступ к ним различных групп пользователей. Платформа не только должна объединить все разработанные сервисы, но и обеспечить возможность ее эффективного использования различным группам пользователей, в частности, опытным и начинающим исследователям, и лицам, принимающим решения. Функциональность платформы должна позволять получение достоверных количественных оценок пулов и потоков углерода в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири и их отклика на происходящие изменения климата. Следует добавить, что использование в качестве форсинга результатов климатического моделирования открывает возможность применения прототипа для анализа откликов потоков на реализацию того или иного сценария изменения климата. Для разработки платформы планируется использовать подходы и инструменты, созданные в процессе разработки прототипа цифровой исследовательской и образовательной платформы (виртуальной исследовательской среды) анализа и прогнозирования процессов,

идуших в окружающей среде региона под влиянием глобальных изменений веб-ГИС Климат (Гордов и др., 2022) (<http://climate.scert.ru/>). Это, в частности, сервисы, предоставляющие доступ к климатическим и метеорологическим компонентам цифрового профиля объекта окружающей среды, обеспечивающие прослеживаемость изменения ее характеристик, сервис, обеспечивающий доступ к вычислительным мощностям, функционирующий по модели «on demand» и позволяющий пользователю выполнять вычисления, необходимые для анализа выбранных характеристик объекта, с помощью проверенных алгоритмов, сервис, позволяющий разработчику быстро включать в вычислительный конвейер новые элементы и добавлять новые архивы геопривязанных данных, а также, платформенные технологии управления процессами моделирования и данными, и вычислительными ресурсами.

Сельское хозяйство

Еще одной областью, в которой активно идет развитие ЦД, является сельское хозяйство (Nasirahmadi, Hensel, 2022). Здесь направления их применения включают почву, ирригацию, роботизацию на полях и фермах, и т.д. Компонентами ЦД являются физические системы (сложная и меняющаяся окружающая среда, сами объекты или устройства (растения, почвы, животные, механизмы), датчики (собирающие и передающие информацию о нем, модели (отражающие меняющиеся свойства физических объектов) и, конечно же, анализирующие собранную информацию платформы. Эти платформы не только готовят информацию для управления процессами или системами, но и могут передавать ее физическим объектам, управляя их поведением. Такие системы уже следят с помощью оптических датчиков за состоянием растительности и выявляют ее заболевания, за погодой и почвой, определяющими урожайность, за влажностью и температурой в зернохранилищах, обеспечивают пищевую цепочку и контролируют содержание аммиака на фермах и управляют движением техники.

Хотя сельскохозяйственные ЦД находятся еще на ранней стадии развития, уже ясно, что их можно использовать для выбора действий в сложных потоках работ, автоматизированного анализа собранных данных, определения состава и возможностей почв, моделирования урожайности, агрометеорологического прогноза и оценки стрессов, вызванных инвазивными сорняками и насекомыми, качеством почвы, ее загрязнениями и другими факторами (MentorMate, 2020). Работы по развитию цифрового земледелия, опирающегося на моделирование в рамках ЦД всей цепочки производства сельскохозяйственной продукции и ее элементов, начаты и в России (Кирюшин и др., 2018). Ясно, что благодаря ЦД можно сделать земледелие в целом более эффективным.

Водные ресурсы

Проекты создания ЦД водных ресурсов выходят за рамки отдельных систем и относятся уже к территориям и происходящим на них процессам. Так, в (Henriksen et al., 2023) представлен проект разрабатываемого в Дании гидрологического ЦД, который, оперируя на основе спутниковой информа-

ции, сетей датчиков уровня воды, влажности, и гидрологических моделей, обеспечивающих прогноз, сможет помочь в уменьшении рисков для населения, промышленности и инфраструктуры. В частности, ЦД отражает аномалии влажности и засушливости территории и в реальном масштабе времени или в прогнозном режиме (5-10 суток) обеспечивает предупреждения о рисках наводнений или засухи. Кроме того, этот ЦД позволит определять уязвимые районы и инфраструктуру. Планируется проводить синхронизацию ЦД с реальностью раз в сутки, что вполне достаточно как в случае наводнений, так и для управления рисками от наводнений и засух.

В рамках программы «Приоритет 2030» создан консорциум для реализации нового федерального проекта «Цифровой Обь-Иртышский бассейн», который, по словам его организаторов (<https://www.spbstu.ru/media/news/partnership/polytech-digital-model-ob-Irtysh-basin/>), станет первым в стране цифровым двойником бассейна рек. Ожидается многокомпонентный результат создания цифровой модели речной системы: от решения актуальных технологических, экологических и социально-экономических задач на территории Обь-Иртышского бассейна до разработки основы для создания в стране отрасли экологического машиностроения. Следует добавить, что несколько иная точка зрения на эффективность и целесообразность создания ЦД для гидрологии изложена в недавней публикации (Данилов-Данильян, 2019). В рамках этой же программы начато выполнение проекта «Цифровой двойник геосистемы приморской территории» (<https://ibss-ras.ru/News-IBSS/1774/>).

Глобальные проекты

В климатологию ЦД естественно вошли вместе с большими данными. В первую очередь это произошло в центрах климатических данных, в которых собираются большие массивы результатов измерений и моделирования, необходимые как для понимания процессов, происходящих в атмосфере, океане и на поверхности Земли, так и для подготовки начальных условий для их прогнозирования. Согласно (Nativi et al., 2021) у новой парадигмы извлечения готового к использованию знания из потоков данных есть три компонента: коллекции больших данных (агрегированные и концептуализированные цифровые отпечатки), генерация глубокого понимания на их основе (с помощью аналитики больших данных), интерпретация этого понимания и генерация готового к использованию знания (достигаемого с помощью специализированных платформ, взаимодействующих с пользователями и обеспечивающих их персонализированными услугами). Использование этой парадигмы в изучении глобальных изменений климата и устойчивого развития, являющегося прикладной целью климатических исследований, привело к появлению новой модели научных исследований (Guo et al., 2020), которая характеризуется не только взаимодействием между различными областями науки (естественные, социальные и гуманитарные науки), но и к трансдисциплинарному обмену знаниями и его совместному порождению. Эта модель, иногда называемая большими данными о Земле, нацелена на

получение информации из больших данных и обеспечение знанием ученых, инженеров и лиц, принимающих решения. Сейчас ЦД развиваются в рамках нескольких научных и инженерных сообществ: наблюдений Земли (Nativi et al., 2020), космических агентств (ESA Digital Twin Earth Challenge, 2020), исследователей климата (World Climate Research Programme, 2020), океанографов (European Commission, 2020), цифровой Земли (Van Genderen et al., 2020), и метеорологов, нацеленных на уменьшение рисков от природных катастроф (Australian Government Bureau of Meteorology, 2020). Несмотря на определенные различия в подходах этих сообществ, ЦД Земли определяется, как цифровая реплика компонент системы Земля, ее структуры, процессов и явлений, получаемая в результате слияния цифрового моделирования и массива наблюдений в реальном мире (потоков данных от локальных, дистанционных и синтезированных наблюдений). Конечно, ЦД Земли должен включать цифровую симуляционную модель, которая меняется и осовременивается в соответствии с ее физическим оригиналом. Эти ЦД претендуют на роль инструмента, который даст основу для понимания происходящих и возможных в будущем изменений климата и позволит выбрать такие отклики общества на них, которые обеспечат устойчивое развитие человечества. Считается, что именно с их помощью можно получить ответы на основные вопросы современной климатологии; Что происходит с климатом (что будет?); Причины происходящего (кто виноват?); Последствия для общества и окружающей среды (позитивы и негативы); Как остановить/замедлить изменения климата? и Как адаптироваться к ним (что делать?)? ЦД Земли должен позволить пользователю с помощью разработанных программных средств пройти всю цепочку анализа от прошлого или настоящего к возможному для выбранных сценариев развития будущему, откликов на возможные изменения, и получить количественные результаты в необходимом масштабе и понятном формате (визуализация).

На создание цифровых двойников природных и климатических систем и процессов и поддерживающих их использование платформ в мире уже направлено несколько крупных проектов. Наиболее масштабной и перспективной выглядит рассчитанная на 10 лет инициатива Европейского Союза DestinE (Destination Earth, 2020) по созданию цифрового двойника нашей планеты (Bauer et al., 2021), который должен дать основу для перехода к «зеленой» экономике. В ее рамках будет создана цифровая модель Земли высокого (до 1 км для Европы) горизонтального разрешения, которая станет основой для мониторинга и прогноза естественных и антропогенных процессов. Базирующиеся на непрерывных наблюдениях, моделировании и высокопроизводительных расчетах цифровые двойники (два первых: «Погодные и геофизические экстремальные явления» и «Адаптация к климатическим изменениям»), дадут пользователям высококачественную информацию, сервисы, модели, сценарии, прогнозы и инструменты визуализации возможных в будущем явлений и их последствий. Высокоточное представление цифровой версии Земли станет возможным благодаря использованию новой климатической модели и огромному вычислительному потенциалу специально соз-

даваемого суперкомпьютера. Пространственное разрешение, запланированное в проекте DestinE, будет огромным шагом вперед относительно текущего уровня компьютерного моделирования. Для сравнения, действующая климатическая модель Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды имеет пространственное разрешение около 9 км.

Считается, что использование ЦД Земли поможет предвидеть, отслеживать и лучше понимать ключевые явления и процессы, происходящие с планетой. Например, метеорологи смогут не просто прогнозировать стихийные бедствия, но и рассчитывать возможные последствия, а также способы их предотвращения с высокой точностью и детализацией. Климатологов эта модель заинтересует в плане возможности более детального прогнозирования изменений погоды на десятилетия вперед. В целом, данные DestinE могут существенно улучшить понимание процессов, происходящих в системе Земля. Существенным фактором является и то, что пользователи смогут получить доступ не только к результатам, но и к инструментам, т.к. планируется создание такой открытой и гибкой программной инфраструктуры, которая даст возможность и пользователям–неспециалистам вмешиваться в поток вычислений и получать ответы на свои конкретные запросы. Таким образом, представители научного сообщества, бизнеса, образовательных организаций, фермеры или студенты смогут использовать DestinE для решения своих задач, которые требуют использования надежных данных о Земле и ее различных характеристиках, не только актуальных или специально созданных в данный момент, но и возможных в будущем. Конечно, создаваемая в рамках проекта цифровая модель Земли высокого горизонтального разрешения, станет основой для мониторинга и прогноза естественных и антропогенных процессов.

Работы по созданию ЦД Земли начаты не только в Европе. Так NVIDIA анонсировала свои планы о работах в этом направлении. На первом этапе компания намерена создать суперкомпьютер Earth-2 (<https://blogs.nvidia.com/blog/2021/11/12/earth-2-supercomputer/>) для поддержки климатического моделирования сверхвысокого разрешения. Поставлена цель достигнуть необходимого для учета роли облаков в тепловом балансе разрешения в метрах. Считается, что такой суперкомпьютер вместе с адекватной моделью создаст основу для ЦД Земли.

Также, недавно в США была представлена (<https://www.llnl.gov/news/updated-exascale-system-earth-simulations>) вторая версия проекта Energy Exascale Earth System Model (E3SM), по мнению разработчиков представляющая собой цифровой двойник Земли для моделирования климата. Модель E3SMv2 позволяет уменьшить сетку региональной модели в районе Северной Америки до 25 км со 100 км на остальной карте мира, что в разы повышает детальность прогнозов для территории США.

Помимо работ по созданию ЦД всей Земли, значительные усилия принимаются по разработке и применению ЦД океана. Эти работы ведутся в рамках специального проекта DITTO (Digital twin of the Ocean, <https://ditto-oceandecade.org/>) одной из глобальных программ ООН «Десятилетие науки об

Океане для устойчивого развития» (2021-2031). На сайте этого проекта можно найти детальную информацию как о ЦД для океанографии и ее приложений, так и о выполняемых в рамках проекта работах (<https://ditto-oceandecade.org/author/ditto>).

Считается, что DITTO позволит пользователям и партнерам создавать сценарии развития, связанные с океаном, для решения таких вопросов, как энергетика, добыча полезных ископаемых, рыболовство и туризм. Цифровые двойники помогут количественно оценить экологические изменения и ожидаемые выгоды. DITTO позволит специалистам в области океана, включая научных пользователей, создавать свои собственные локальные или тематические цифровые двойники "своих океанских проблем", используя разработанные стандартные рабочие процессы.

В рамках этой программы ИО РАН осуществляется проект создания ЦД Каспийского моря (The Caspian Sea Digital Twin (CasSeaDi) – Ocean Decade). Его целью является создание "Центра данных Каспийского моря", который будет включать обновленный архив спутниковых, океанографических, гидрометеорологических, гидродинамических моделей, данных атмосферных реанализов, результатов региональных прогнозов изменения климата, электронных атласов, электронной библиотеки публикаций по Каспийскому морю. База данных позволит оценить антропогенные нагрузки на окружающую среду Каспийского моря, происходящие изменения климата, экстремальные погодные и климатические явления, влияние изменения климата на природные и социально-экономические системы, дать количественную основу для разработки стратегии и механизмов адаптации Каспийского моря к изменению климата.

Заключение

Как показывает предшествующий анализ, для успешного создания и использования ЦД необходимо четыре ключевых элемента поддержки: сам физический объект или процесс, обширное хранилище данных (иногда называемое озером данных), заполненное всеми видами данных и информацией для создания и постоянного обновления ЦД, сам ЦД, включающий модели с доступом к данным, анализ и необходимое для функционирования инструментов систем поддержки решений понимание, а также сами инструменты систем поддержки решений, включающие визуализацию и приспособленные к нуждам пользователей интерфейсы. Конечной целью ЦД является поддержка решений и обеспечение своевременных вмешательств, приводящих к лучшему результату. Хотя ЦД часто путают с прогнозными моделями, они отличаются направленностью на генерацию дополнительной информации о возможных решениях, способных в свою очередь изменять и физический объект. ЦД не только обеспечивает прогнозную информацию, но и отвечает на вопрос «что, если».

ЦД для природных объектов и территорий окружающей среды, в отличие от их инженерных аналогов, скорее ориентированы не на конечный продукт (изделие, устройство), а на создание научно-обоснованных подходов. Это

обстоятельство позволяет использовать физико-математические модели, лишь частично отражающие объект и его поведение. Объект или процесс, конечно, фиксируется с помощью наблюдений (мониторинга), данные которого поступают в исследовательскую инфраструктуру и дают исследователям новые идеи. Это знание затем используется в моделях (таких как модели климата или видов), численные результаты которых проверяются на соответствие наблюдениям. Только на следующем этапе можно включить в рассмотрение влияние человека и оценить (и предсказать) как антропогенный фактор ее меняет.

Современный уровень информационно-вычислительных технологий (модели, вычислительные ресурсы, усвоение данных, виртуальная исследовательская среда с облачными хранилищами и вычислениями, Интернет вещей и машинное обучение) уже дает необходимую основу для создания ЦД и платформ их сопровождения для экосистем (леса, поля, луга, пашни, болота, водоемы и т.д.), территорий, климатической системы Земли и ее подсистем и процессов, происходящих в них. Именно эти информационно-вычислительные платформы, использующие ЦД систем и процессов, могут вывести климатологию на новый уровень, как понимания и прогноза хода климатических процессов, так и практических приложений этого знания. В частности, этот путь может дать научную основу для адаптации к климатическим изменениям, решению задачи мониторинга и контроля обмена парниковыми газами экосистем и атмосферы и, в конечном счете, управления вкладом земной поверхности в баланс углерода. На такой научной основе можно реализовать программы использования экосистем для компенсации индустриальных выбросов парниковых газов, необходимые для перехода к «зеленой» экономике.

Суммируя, можно сказать, что ЦД формирует новую парадигму в исследовании окружающей среды, в частности, погоды и климата. Двойники помогут интерактивно исследовать возможное будущее климата и обеспечат пользователей необходимой климатической информацией. Конечно, для достижения этой цели необходимо создавать ЦД для многих климатических процессов и участвующих в формировании климата физических и экологических систем.

Появление нового инструмента, интегрирующего современные модели процессов и участвующих в них систем, данные измерений, новые средства анализа получаемых больших массивов данных моделирования и мониторинга, визуализации его результатов и доведения их до заинтересованных сторон открывает специалистам новые возможности. В частности, приведенные выше примеры создания и использования ЦД климатических систем и процессов, позволяют уточнить их роль в формировании локального, регионального и глобального климата, его режимов и динамики. Ясно, что появление ЦД для новых процессов и систем позволит уточнить понимание их роли в этом. Большое значение имеет и открывающаяся на основе использования соответствующих ЦД возможность уточнения последствий различных адаптационных мероприятий. Кроме того, обеспечиваемая ЦД возможность выполнения климатического анализа не только специалистами в области моделирования и/или статистики, существенно расширяет круг пользователей, что несомненно при-

ведет к появлению новых результатов и, как следствие, к более глубокому пониманию процессов формирования и динамики климата.

Работа выполнена в рамках тем FWNW-2021-0006 и FWRG-2021-0004.

Список литературы

Богомолов, В.Ю., Дюкарев, Е.А., Степаненко, В.М. (2020) Моделирование температурного и влажностного режима болотных и минеральных почв в модели деятельного слоя с учетом изменения термодинамических свойств почвы по глубине, *Сборник трудов ENVIROMIS-2020*, Томск, ЦНТИ, с. 93-96.

Вязилов, Е.Д. (2022) Цифровой двойник для окружающей среды, *Сборник трудов ENVIROMIS-2022*, Томск, ЦНТИ, с. 323-326.

Гордов, Е.П., Окладников, И.Г., Титов, А.Г., Воропай, Н.Н., Рязанова, А.А., Лыкосов, В.Н. (2018) Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры для современной климатологии, *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 20-30.

Гордов, Е.П., Гордова, Ю.Е., Окладников, И.Г., Рязанова, А.А., Титов, А.Г. (2022) Веб-ГИС платформа «Климат» для исследования климатических процессов и откликов на них: потенциал и перспективы, *Оптика атмосферы и океана*, т. 35, № 02, с. 132-135, doi: 10.15372/AOO20220208.

Данилов-Данильян, В.И. (2019) Экология, гидрология, цифровизация, цифровые двойники и азбучные истины методологии моделирования, *Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения*, Сборник научных трудов, Москва, Студия Ф1, с. 497-450.

Дюкарев, Е.А. (2020) Моделирование сезонного хода углеродного обмена в болотных экосистемах, *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*, т. 1, № 5, с. 56-61.

Канев, А.И., Якубов, А.Р., Чумаченко, С.И., Терехов, В.И. (2022) Создание прототипа цифрового двойника локального участка леса, как элемента системы климатического мониторинга, *Сборник докладов ENVIROMIS-2022*, Томск, ЦНТИ, с. 424-425.

Кирюшин, В.И., Иванов, А.И., Козубенко, И.С., Савин, И.Ю. (2018) Цифровое земледелие, *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, № 5, с. 3-5.

Ariesen-Verschuur, N., Verdouw, C., Tekinerdogan, B. (2022) Digital Twins in greenhouse horticulture: A review, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 199, 107183.

Australian Government Bureau of Meteorology (2020) *A Land of Storms, Floods and Bushfires: Seamless and Integrated Forecasting*, Australian Government: Canberra, Australian, 2020.

Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W. (2021) A digital twin of Earth for the green transition, *Nature Climate Change*, vol. 11, pp. 80-83, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>.

Bauer, P., Thorpe, A., Brunet, G. (2015) The quiet revolution of numerical weather prediction, *Nature*, vol. 525, no. 7567, p. 47.

Benjamin, S.G., Weygandt, S.S., Brown, J.M., Hu, M., Alexander, C.R., Smirnova, T.G., Olson, J.B., James, E.P., Dowell, D.C., Grell, G.A. et al. (2016) A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The rapid refresh, *Monthly Weather Review*, vol. 144, no. 4, pp. 1669-1694.

Buonocore, L., Yates, J., Valentini, R. (2022) A Proposal for a Forest Digital Twin Framework and Its Perspectives, *Forests*, vol. 13, no. 4, p. 498, available at: <https://doi.org/10.3390/f13040498>.

Dyukarev, E., Godovnikov, E., Karpov, D., Kurakov, S., Lapshina, E., Filippov, I., Filippova, N., Zarov, E. (2019) Net Ecosystem Exchange, Gross Primary Production And Ecosystem Respiration In Ridge-Hollow Complex At Mukhrino Bog, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 12, no. 2, pp. 227-244, doi:10.24057/2071-9388-2018-77.

Dyukarev, E.A. (2017) Partitioning of net ecosystem exchange using chamber measurements data from bare soil and vegetated sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 239, pp. 236-248, doi:10.1016/j.agrformet.2017.03.011.

EC (2021) *EU Strategy on Adaptation to Climate Change. COM/2021/82 Final*, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=COM:2021:82:FIN> (accessed on 1 December 2022).

Errico, R.M., Yang, R., Priv'e, N.C., Tai, K.-S., Todling, R., Sienkiewicz, M. E., Guo, J. (2013) Development and validation of observing system simulation experiments at NASA's Global Modeling and Assimilation Office, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139, no. 674, pp. 1162-1178.

ESA Digital Twin Earth Challenge (2020) Available at: <https://copernicus-masters.com/prize/esa-challenge/> (accessed on 1 January 2021).

European Commission (2020) *A Transparent & Accessible Ocean: Towards a Digital Twin of the Ocean*, Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research_and_innovation/green_deal/gdc_stakeholder_engagement_topic_09-3_digital_ocean.pdf (accessed on 2 January 2020).

European Commission-DG CNECT (2020), *Destination Earth (DestinE)*, Available at: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/destination-earth-destine> (accessed on 2 January 2021).

Grieves, M. (2014) *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*, White Paper, Melbourne, FL, USA, Florida Institute of Technology, pp. 1-7.

Guo, H., Nativi, S., Liang, D., Craglia, M., Wang, L., Schade, S., Corban, C., He, G., Pesaresi, M., Li, J. et al. (2020) Big Earth Data science: An information

framework for a sustainable planet, *International Journal of Digital Earth*, vol. 13, pp. 743-767.

Habib, M.K., Ayankoso, S.A., Nagata, F. (2021) Data-Driven Modeling: Concept, Techniques, Challenges and a Case Study, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Takamatsu, Japan, pp. 1000-1007, doi:10.1109/ICMA52036.2021.9512658.

Hartmann, D., Van der Auweraer, H. (2020) *Digital Twins*, 2001.09747v1 [cs.CY].

Henriksen, H.J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I.K., Kragh, S.J., Bøgh, E., Stisen, S. (2023) A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital), *Water*, vol. 15, p. 25, available at: <https://doi.org/10.3390/w15010025>.

Hoffman, R.N., Atlas, R. (2016) Future observing system simulation experiments, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, no. 9, pp. 1601-1616.

James, E.P., Benjamin, S.G. (2017) Observation system experiments with the hourly updating rapid refresh model using GSI hybrid ensemble-variational data assimilation, *Monthly Weather Review*, vol. 145, no. 8, pp. 2897-2918.

Lazo, J.K., Lawson, M., Larsen, P.H., Waldman, D.M. (2011) US economic sensitivity to weather variability, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 92, no. 6, pp. 709-720.

Malik, A.A., Brem, A. (2020) *Man, machine and work in a digital twin setup: a case study*, pre-print, arXiv, 2006.08760 [cs.CY].

MentorMate (2020) The Future of Farming: 7 Ways A Digital Twin Can Be Applied to Agriculture. available at: <https://medium.com/@MentorMate/the-future-of-farming-7-ways-a-digital-twin-can-be-applied-to-agriculture-595a1750c453> (accessed on 12 October 2020).

Mukhtar, H., Wunderlich, R.F., Lin, Y.-P. (2022) Digital Twins of the Soil Microbiome for Climate Mitigation, *Environments*, vol. 9, no. 34, available at: <https://doi.org/10.3390/environments9030034>.

Nasirahmadi, A., Hensel, O. (2022) Toward the Next Generation of Digitalization in Agriculture Based on Digital Twin Paradigm, *Sensors*, vol. 22, p. 498, available at: <https://doi.org/10.3390/s22020498>.

Nativi, S., Delipetrev, B., Craglia, M. (2020) *Destination Earth: Survey on Digital Twins Technologies and Activities, in the Green Deal Area*, Luxembourg, European Commission.

Nativi, S., Mazzetti, P., Craglia, M. (2021) Digital Ecosystems for Developing Digital Twins of the Earth: The Destination Earth Case, *Remote Sensing*, vol. 13, p. 2119, available at: <https://doi.org/10.3390/rs13112119>.

Nipen, T., Seierstad, I., Lussana, C., Kristiansen, J. (2019) *Private observations improve MET Norway's operational weather forecasts*, The 99th Annual Meeting of the American Meteorological Society, American Meteorological Society, Phoenix, 6-10 January 2019.

Oracle. *Digital Twins for IoT Applications: A Comprehensive Approach to Implementing IoT Digital Twins*, available at: <http://www.oracle.com/us/solutions/internetofthings/digital-twins-for-iot-apps-wp-3491953.pdf>.

Price, C., Maor, R., Shachaf, H. (2018) Using smartphones for monitoring atmospheric tides, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 174, pp. 1-4.

Priv'e, N., Errico, R., Tai, K.-S. (2013) Validation of the forecast skill of the Global Modeling and Assimilation Office observing system simulation experiment, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139, no. 674, pp. 1354-1363.

Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T. (2019) *Digital Twin: Values, Challenges and Enablers*, arXiv:1910.01719v1 [eess.SP].

Rigon, R., Formetta, G., Bancheri, M., Tubini, N., D'Amato, C., David, O., Massari, C. (2022) HESS Opinions: Participatory Digital Earth Twin Hydrology systems (DARTHs) for everyone: A blueprint for hydrologists, *Hydrology and Earth System Science*, vol. 26, pp. 4773-4800.

Ronda, R., Steeneveld, G., Heusinkveld, B., Attema, J., Holtslag, A. (2017) Urban finescale forecasting reveals weather conditions with unprecedented detail, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no. 12, pp. 2675-2688.

Segovia, M., Garcia-Alfaro, J. (2022) Design, Modeling and Implementation of Digital Twins, *Sensors*, vol. 22(14), p. 5396.

Siddorn, J., Blair, G., Boot, D., Buck, J., Kingdon, A., Kloker, A., Kokkinaki, A., Moncoiffe, G., Blyth, E., Fry, M., Heaven, R., Lewis, E., Marchant, B., Napier, B., Pascoe, C., Passmore, J., Pepler, S., Townsend, P., Watkins, J. (2022) An Information Management Framework for Environmental Digital Twins (IMFe), *National Oceanography Center*, 23 p., available at: <https://zenodo.org/record/7004351#.Y1A3ai-228U>.

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E.P., Qiao, Y., Murray, N., Devine, D. (2021) Digital Twin: Origin to Future, *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 36, available at: <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.

Solomatine, D., See, L., Abrahart, R. (2009) Data-Driven Modelling: Concepts, Approaches and Experiences, in: Abrahart, R.J., See, L.M., Solomatine, D.P. (eds), *Practical Hydroinformatics. Water Science and Technology Library*, Berlin, Heidelberg, Springer, vol. 68, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-540-79881-1_2.

Van Genderen, J., Goodchild, M.F., Guo, H., Yang, C., Nativi, S., Wang, L., Wang, C. (2020) *Digital Earth Challenges and Future Trends*, Manual of Digital Earth, Singapore, Springer, pp. 811-827.

Wang, X., Barker, D.M., Snyder, C., Hamill, T.M. (2008) A hybrid ETKF–3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment, *Monthly Weather Review*, vol. 136, no. 12, pp. 5116-5131.

World Climate Research Programme (2020) Report of the 41st Session of the Joint Scientific Committee, Geneva, Switzerland, WMO.

References

Bogomolov, V.Yu., Dyukarev, E.A., Stepanenko, V.M. (2020) Modelirovanie temperaturnogo i vlazhnostnogo rezhima bolotnyh i mineral'nyh pochv v modeli deyatel'nogo sloya s uchetom izmeneniya termodinamicheskikh svoystv pochvy po glubine [Modeling temperature and humidity conditions of mineral soils in the active layer model, taking into account changes in the thermodynamic properties of the soil in depth], *Sbornik trudov ENVIROMIS-2020* [Collection of proceedings ENVIROMIS-2020], CNTI, Tomsk, Russia, pp. 93-96.

Vyazilov, E.D. (2022) Cifrovoy dvojniki dlya okruzhayushchej sredy [Digital twin for environment], *Sbornik trudov ENVIROMIS-2022*, [Collection of proceedings ENVIROMIS-2022], CNTI, Tomsk, Russia, pp. 323-326.

Gordov, E.P., Okladnikov, I.G., Titov, A.G., Voropaj, N.N., Ryazanova, A.A., Lykosov, V.N. (2018) Razvitie informacionno-vychislitel'noj infrastruktury dlya sovremennoj klimatologii [Development of Information-computational Infrastructure for Modern Climatology], *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 11, pp. 20-30.

Gordov, E.P., Gordova, Yu.E., Okladnikov, I.G., Ryazanova, A.A., Titov, A.G. (2022) Veb-GIS platforma «Klimat» dlya issledovaniya klimaticheskikh processov i otklikov na nih: potencial i perspektivy [Climate web GIS platform for research of climate processes and responses to them: Potential and prospects], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 35, no. 02, pp. 132-135, doi: 10.15372/AOO20220208.

Danilov-Danil'yan, V.I. (2019) Ekologiya, gidrologiya, cifrovizaciya, cifrovye dvojniki i azbuchnye istiny metodologii modelirovaniya [Ecology, hydrology, digitalization, digital twins and elementary truths of modeling methodology], *Nauchnye problemy ozdorovleniya rossijskikh rek i puti ih resheniya* [Scientific problems of the improvement of Russian rivers and ways to solve them], *Sbornik nauchnyh trudov* [Collection of scientific papers], Studio F1, Moscow, Russia, pp. 497-450.

Dyukarev, E.A. (2020) Modelirovanie sezonnogo hoda uglerodnogo obmena v bolotnyh ekosistemah [Modeling the seasonal course of carbon exchange in bog ecosystems], *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyj analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*, vol. 1, no. 5, pp. 56-61.

Kanev, A.I., Yakubov, A.R., Chumachenko, S.I., Terekhov, V.I. (2022) Sozdanie prototipa cifrovogo dvojnika lokal'nogo uchastka lesa, kak elementa sistemy klimaticheskogo monitoringa [Creation of a prototype of a digital twin of a local forest area as an element of a climate monitoring system], *Sbornik dokladov*

ENVIROMIS-2022 [Collection of proceedings ENVIROMIS-2022], CNTI, Tomsk, Russia, pp. 424-425.

Kiryushin, V.I., Ivanov, A.I., Kozubenko, I. S., Savin, I.Yu. (2018) Cifrovoe zemledelie [Digital farming], *Vestnik rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki*, no. 5, pp. 3-5.

Ariesen-Verschuur, N., Verdouw, C., Tekinerdogan, B. (2022) Digital Twins in greenhouse horticulture: A review, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 199, 107183.

Australian Government Bureau of Meteorology (2020) *A Land of Storms, Floods and Bushfires: Seamless and Integrated Forecasting*, Australian Government: Canberra, Australian, 2020.

Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W. (2021) A digital twin of Earth for the green transition, *Nature Climate Change*, vol. 11, pp. 80-83, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>.

Bauer, P., Thorpe, A., Brunet, G. (2015) The quiet revolution of numerical weather prediction, *Nature*, vol. 525, no. 7567, p. 47.

Benjamin, S.G., Weygandt, S.S., Brown, J.M., Hu, M., Alexander, C.R., Smirnova, T.G., Olson, J.B., James, E.P., Dowell, D.C., Grell, G.A. et al. (2016) A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The rapid refresh, *Monthly Weather Review*, vol. 144, no. 4, pp. 1669-1694.

Buonocore, L., Yates, J., Valentini, R. (2022) A Proposal for a Forest Digital Twin Framework and Its Perspectives, *Forests*, vol. 13, no. 4, p. 498, available at: <https://doi.org/10.3390/f13040498>.

Dyukarev, E., Godovnikov, E., Karpov, D., Kurakov, S., Lapshina, E., Filippov, I., Filippova, N., Zarov, E. (2019) Net Ecosystem Exchange, Gross Primary Production And Ecosystem Respiration In Ridge-Hollow Complex At Mukhrino Bog, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 12, no. 2, pp. 227-244, doi:10.24057/2071-9388-2018-77.

Dyukarev, E.A. (2017) Partitioning of net ecosystem exchange using chamber measurements data from bare soil and vegetated sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 239, pp. 236-248, doi:10.1016/j.agrformet.2017.03.011.

EC (2021) *EU Strategy on Adaptation to Climate Change. COM/2021/82 Final*, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=COM:2021:82:FIN> (accessed on 1 December 2022).

Errico, R.M., Yang, R., Priv'e, N.C., Tai, K.-S., Todling, R., Sienkiewicz, M. E., Guo, J. (2013) Development and validation of observing system simulation experiments at NASA's Global Modeling and Assimilation Office, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139, no. 674, pp. 1162-1178.

ESA Digital Twin Earth Challenge (2020) Available at: <https://copernicus-masters.com/prize/esa-challenge/> (accessed on 1 January 2021).

European Commission (2020) *A Transparent & Accessible Ocean: Towards a Digital Twin of the Ocean*, Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research_and_innovation/green_deal/gdc_stakeholder_engagement_topic_09-3_digital_ocean.pdf (accessed on 2 January 2020).

European Commission-DG CNECT (2020), *Destination Earth (DestinE)*, Available at: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/destination-earth-destine> (accessed on 2 January 2021).

Grieves, M. (2014) *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*, White Paper, Melbourne, FL, USA, Florida Institute of Technology, pp. 1-7.

Guo, H., Nativi, S., Liang, D., Craglia, M., Wang, L., Schade, S., Corban, C., He, G., Pesaresi, M., Li, J. et al. (2020) Big Earth Data science: An information framework for a sustainable planet, *International Journal of Digital Earth*, vol. 13, pp. 743-767.

Habib, M.K., Ayankoso, S.A., Nagata, F. (2021) Data-Driven Modeling: Concept, Techniques, Challenges and a Case Study, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Takamatsu, Japan, pp. 1000-1007, doi:10.1109/ICMA52036.2021.9512658.

Hartmann, D., Van der Auweraer, H. (2020) *Digital Twins*, 2001.09747v1 [cs.CY].

Henriksen, H.J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I.K., Kragh, S.J., Bøgh, E., Stisen, S. (2023) A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital), *Water*, vol. 15, p. 25, available at: <https://doi.org/10.3390/w15010025>.

Hoffman, R.N., Atlas, R. (2016) Future observing system simulation experiments, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, no. 9, pp. 1601-1616.

James, E.P., Benjamin, S.G. (2017) Observation system experiments with the hourly updating rapid refresh model using GSI hybrid ensemble-variational data assimilation, *Monthly Weather Review*, vol. 145, no. 8, pp. 2897-2918.

Lazo, J.K., Lawson, M., Larsen, P.H., Waldman, D.M. (2011) US economic sensitivity to weather variability, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 92, no. 6, pp. 709-720.

Malik, A.A., Brem, A. (2020) *Man, machine and work in a digital twin setup: a case study*, pre-print, arXiv, 2006.08760 [cs.CY].

MentorMate (2020) The Future of Farming: 7 Ways A Digital Twin Can Be Applied to Agriculture. available at: <https://medium.com/@MentorMate/the-future-of-farming-7-ways-a-digital-twin-can-be-applied-to-agriculture-595a1750c453> (accessed on 12 October 2020).

Mukhtar, H., Wunderlich, R.F., Lin, Y.-P. (2022) Digital Twins of the Soil Microbiome for Climate Mitigation, *Environments*, vol. 9, no. 34, available at: <https://doi.org/10.3390/environments9030034>.

Nasirahmadi, A., Hensel, O. (2022) Toward the Next Generation of Digitalization in Agriculture Based on Digital Twin Paradigm, *Sensors*, vol. 22, p. 498, available at: <https://doi.org/10.3390/s22020498>).

Nativi, S., Delipetrev, B., Craglia, M. (2020) *Destination Earth: Survey on Digital Twins Technologies and Activities, in the Green Deal Area*, Luxembourg, European Commission.

Nativi, S., Mazzetti, P., Craglia, M. (2021) Digital Ecosystems for Developing Digital Twins of the Earth: The Destination Earth Case, *Remote Sensing*, vol. 13, p. 2119, available at: <https://doi.org/10.3390/rs13112119>).

Nipen, T., Seierstad, I., Lussana, C., Kristiansen, J. (2019) *Private observations improve MET Norway's operational weather forecasts*, The 99th Annual Meeting of the American Meteorological Society, American Meteorological Society, Phoenix, 6-10 January 2019.

Oracle. *Digital Twins for IoT Applications: A Comprehensive Approach to Implementing IoT Digital Twins*, available at: <http://www.oracle.com/us/solutions/internetofthings/digital-twins-for-iot-apps-wp-3491953.pdf>.

Price, C., Maor, R., Shachaf, H. (2018) Using smartphones for monitoring atmospheric tides, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 174, pp. 1-4.

Priv'e, N., Errico, R., Tai, K.-S. (2013) Validation of the forecast skill of the Global Modeling and Assimilation Office observing system simulation experiment, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139, no. 674, pp. 1354-1363.

Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T. (2019) *Digital Twin: Values, Challenges and Enablers*, arXiv:1910.01719v1 [eess.SP].

Rigon, R., Formetta, G., Bancheri, M., Tubini, N., D'Amato, C., David, O., Massari, C. (2022) HESS Opinions: Participatory Digital Earth Twin Hydrology systems (DARTHS) for everyone: A blueprint for hydrologists, *Hydrology and Earth System Science*, vol. 26, pp. 4773-4800.

Ronda, R., Steeneveld, G., Heusinkveld, B., Attema, J., Holtslag, A. (2017) Urban finescale forecasting reveals weather conditions with unprecedented detail, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no. 12, pp. 2675-2688.

Segovia, M., Garcia-Alfaro, J. (2022) Design, Modeling and Implementation of Digital Twins, *Sensors*, vol. 22(14), p. 5396.

Siddorn, J., Blair, G., Boot, D., Buck, J., Kingdon, A., Kloker, A., Kokkinaki, A., Moncoiffe, G., Blyth, E., Fry, M., Heaven, R., Lewis, E., Marchant, B., Napier, B., Pascoe, C., Passmore, J., Pepler, S., Townsend, P., Watkins, J. (2022) An

Information Management Framework for Environmental Digital Twins (IMFe), *National Oceanography Center*, 23 p., available at: <https://zenodo.org/record/7004351#.Y1A3ai-228U>.

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E.P., Qiao, Y., Murray, N., Devine, D. (2021) Digital Twin: Origin to Future, *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 36, available at: <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.

Solomatine, D., See, L., Abrahart, R. (2009) Data-Driven Modelling: Concepts, Approaches and Experiences, in: Abrahart, R.J., See, L.M., Solomatine, D.P. (eds), *Practical Hydroinformatics. Water Science and Technology Library*, Berlin, Heidelberg, Springer, vol. 68, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-540-79881-1_2.

Van Genderen, J., Goodchild, M.F., Guo, H., Yang, C., Nativi, S., Wang, L., Wang, C. (2020) *Digital Earth Challenges and Future Trends*, Manual of Digital Earth, Singapore, Springer, pp. 811-827.

Wang, X., Barker, D.M., Snyder, C., Hamill, T.M. (2008) A hybrid ETKF–3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment, *Monthly Weather Review*, vol. 136, no. 12, pp. 5116-5131.

World Climate Research Programme (2020) Report of the 41st Session of the Joint Scientific Committee, Geneva, Switzerland, WMO.

Поступила в редакцию: 11.03.2023.

Доработана после рецензирования: 15.05.2023.

Принята к публикации: 20.05.2023.

Для цитирования / For citation:

Гордов, Е.П. (2023) Цифровые двойники систем и процессов как инструмент современной климатологии, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 3, с. 269-297, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-269-297.

Gordov, E.P. (2023) Digital twins of systems and processes as an instrument of modern climatology, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 3, pp. 269-297, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-269-297.