

УДК 004.94:551.583

## **КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИМАТА**



***В.О. Тихоненко***

*Студент 3 курса специальности «Программная инженерия» факультета компьютерного проектирования  
vlad6867911@gmail.com*



***Е.Д. Ракицкий***

*Студент 3 курса специальности «Программная инженерия» факультета компьютерного проектирования  
egor.rakitskiy@gmail.com*



***Ю.А. Ёщик***

*Студент 3 курса специальности «Программная инженерия» факультета компьютерного проектирования  
eschikjulia@gmail.com*



***А.В. Воробей***

*Ассистент кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, магистр технических наук  
vorobey@bsuir.by*

### ***В.О. Тихоненко***

*Студент 3 курса специальности «Программная инженерия» факультета компьютерного проектирования. Область научных интересов: разработка архитектур программных платформ для моделирования сложных природных систем, клиент-серверные приложения, методы ассимиляции данных в реальном времени.*

### ***Е.Д. Ракицкий***

*Студент 3 курса специальности «Программная инженерия» факультета компьютерного проектирования. Область научных интересов: применение методов машинного обучения и нейронных сетей для построения суррогатных (клоновых) моделей в задачах прогнозирования, анализ больших данных.*

### ***Ю.А. Ёщик***

*Студент 3 курса специальности «Программная инженерия» факультета компьютерного проектирования. Область научных интересов: обеспечение физической согласованности прогнозов в самообучающихся системах, обработка потоков данных от IoT-сенсоров и спутниковых систем, интеграция физических моделей и ИИ.*

### ***А.В. Воробей***

*Окончила Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка» по специальности Биология и химия. Окончила аспирантуру БГУИР по специальности «Психология труда, инженерная психология, эргономика».*

**Аннотация.** В статье рассматривается концепция программной платформы для создания самообучающихся цифровых двойников климатических явлений. Обосновывается необходимость преодоления ограничений традиционных статичных моделей, не способных адаптироваться к текущим условиям. Сформулированы три ключевых принципа построения: ассимиляция данных в реальном времени, редукция вычислительной сложности через клоновые модели и обеспечение физической согласованности прогнозов. Представлена архитектура программного решения на базе клиент-серверной модели и методы обновления цифровых двойников. Результаты работы направлены на повышение точности прогнозирования экстремальных погодных явлений и поддержку принятия решений.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, климатическое моделирование, машинное обучение, ассимиляция данных, Big Data, клоновая модель, физическая согласованность, прогнозирование погоды.

**Введение.** Современное климатическое моделирование сталкивается с фундаментальным противоречием: физические законы, описывающие атмосферные процессы, хорошо известны, но их прямое численное решение для систем планетарного масштаба требует колоссальных вычислительных ресурсов и времени. Традиционные модели, основанные на решении систем уравнений гидротермодинамики на пространственной сетке, обеспечивают физическую строгость, но вынужденно упрощают микропроцессы и вторичные эффекты, что снижает точность прогнозов, особенно для экстремальных явлений. Дополнительно такие модели, как правило, статичны: данные и параметры фиксируются на этапе инициализации и не обновляются в процессе расчёта, что приводит к расхождению с реальным состоянием системы и ограничивает оперативность прогнозирования.

Параллельно стремительное развитие цифровизации, Интернета вещей, методов машинного обучения и анализа больших данных радикально изменило возможности наблюдения и моделирования сложных природных систем. Разворачивающиеся в реальном времени потоки разнородных данных от наземных метеостанций, спутниковых систем и других сенсоров создают предпосылки для перехода от закрытых статичных схем к динамическим моделям, способным адаптироваться к текущим условиям. В этом контексте концепция цифровых двойников, предполагающая тесно связанную физическую и виртуальную компоненты с двунаправленным обменом данными, становится естественной основой для переосмысления климатического моделирования и прогнозирования погоды [1].

Цель данной работы – представить концепцию программной платформы для создания самообучающихся цифровых двойников климатических и экстремальных погодных явлений, объединяющую физические модели, методы машинного обучения и инфраструктуру обработки больших данных. В статье формулируются ключевые принципы построения такой системы, обсуждаются сценарии её применения и описывается архитектура программного решения, ориентированного на работу с потоками данных в реальном времени и поддержку принятия решений.

**Принципы построения самообучающейся модели.** Создание эффективного цифрового двойника климатических и погодных явлений требует пересмотра традиционных подходов к моделированию. В отличие от статичных моделей, построенных исключительно на решении систем дифференциальных уравнений, предлагаемый подход базируется на трех фундаментальных принципах, обеспечивающих динамическую адаптацию, вычислительную эффективность и физическую достоверность прогнозов.

Первый принцип – ассимиляция данных в реальном времени – предполагает непрерывный приём и интеграцию информации от распределённой сети сенсоров (наземные метеостанции, спутниковые системы, радиолокаторы, аэрологические зонды и др.), характерной для современных климатических платформ [6-8]. В отличие от традиционных моделей, работающих в замкнутом режиме с фиксированными начальными условиями, цифровой двойник регулярно «подтягивает» своё состояние к наблюдаемой реальности, компенсируя неполноту физического описания и накопление численных ошибок. Ассимиляция включает сбор, предобработку, верификацию и интеграцию данных

в текущее состояние модели, что особенно важно при описании быстроразвивающихся экстремальных явлений – ураганов, смерчей, внезапных наводнений.

Схема обновления цифрового двойника на основе данных с IoT-сенсоров в реальном времени представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема обновления цифрового двойника

Второй принцип связан с редукцией вычислительной сложности посредством клоновых (surrogate) моделей, которые строятся на основе прогонов физической модели высокого разрешения в различных сценариях. Такой подход соответствует современным представлениям о масштабируемых предиктивных цифровых двойниках, сочетающих физические модели и методы машинного обучения. Физическая модель используется не для прямого прогноза в режиме реального времени, а для генерации представительного массива обучающих данных; на этой базе формируется быстрая surrogate-модель (например, на основе глубоких нейронных сетей), аппроксимирующая вход-выходное поведение полной модели при существенно меньших вычислительных затратах. Это обеспечивает получение оперативных прогнозов и возможность последующего дообучения модели по мере накопления новых данных. Однако при построении таких моделей возникает ряд трудностей. Традиционные методы моделирования часто основаны на проектных численных параметрах, что может приводить к большому количеству итераций проектирования. Для повышения точности модели исследователи предлагают различные стратегии: создание интеллектуальных систем на основе многомодальных датчиков, способных обновляться в реальном времени, а также применение динамического моделирования на основе данных, использующего алгоритмы глубокого обучения для обработки больших объемов информации.

Третий принцип – физическая согласованность – направлен на предотвращение появления правдоподобных, но физически некорректных прогнозов, характерных для чисто эмпирических схем. Клоновая модель должна не только минимизировать ошибку предсказания, но и соблюдать фундаментальные законы сохранения энергии, массы,

импульса и другие ограничения, что соответствует современным подходам к построению объяснимых цифровых двойников динамических систем. Современные исследования показывают, что подходы, комбинирующие физические модели и классификаторы машинного обучения, позволяют создавать интерпретируемые модели, способные не только прогнозировать, но и объяснять причины тех или иных явлений.

Различия в использовании традиционной модели анализа данных и использовании цифрового двойника показаны на рисунке 2.



Рисунок 2. Сравнение традиционных систем прогнозирования погоды с систем на основе цифровых двойников

**Концептуальная модель цифрового двойника климата.** Построение цифрового двойника для такой сложной и динамичной системы, как климат Земли, требует не только технических решений, но и четкого концептуального понимания того, что именно создается. В научной литературе и практических разработках существует терминологическая неопределенность, связанная с использованием понятий «цифровая тень» и «цифровой двойник». Разграничение этих категорий имеет принципиальное значение для корректной постановки задач и интерпретации получаемых результатов.

С быстрым развитием области цифровых двойников все больше ученых посвящают себя теоретическим и практическим исследованиям в этой сфере. Концептуальная близость между цифровыми тенями и цифровыми двойниками стимулировала обширные исследовательские усилия, однако важно подчеркнуть, что эти понятия имеют разную природу и играют различные роли во взаимодействии физического и виртуального миров.

Цифровая тень представляет собой цифровое изображение состояния конкретного физического объекта в определенный момент времени. По мнению Бергса, цифровые тени можно рассматривать как предшественника цифровых двойников [5]. Они в первую очередь ориентированы на сбор и анализ исторических данных, событий и моделей поведения для получения ценной информации и поддержки принятия решений. Цифровая тень не обладает обратной связью с физическим объектом – это одностороннее отображение, фиксирующее состояние объекта «как есть» в прошлом или настоящем, но не влияющее на его будущее поведение. Информационный поток в этом случае направлен исключительно от физического объекта к его виртуальному представлению.

Цифровой двойник, в отличие от цифровой тени, представляет собой полностью интегрированную и автоматизированную систему с двунаправленным потоком данных

между физическим объектом и его цифровым аналогом. Согласно определению Крицингера, это цифровое представление физического объекта, обеспечивающее автоматизированный обмен данными в обоих направлениях. Цифровой двойник способен не только воспринимать текущее состояние физического объекта, но и диагностировать его, прогнозировать будущие состояния и, в предельном случае, регулировать поведение физического объекта посредством взаимодействия и оптимизации решений. Барричелли рассматривает цифровой двойник как живую, интеллектуальную и развивающуюся модель, служащую виртуальным аналогом физического объекта или процесса. Благодаря самообучению на основе соответствующих цифровых моделей, цифровой двойник способен к автономной интеллектуальной эволюции.

Применительно к климатическим системам это разграничение приобретает особый смысл. Большинство существующих сегодня климатических моделей, включая те, что используются в международных проектах, по своей сути являются цифровыми теньями. Они оперируют историческими данными, строят ретроспективные анализы и делают прогнозы на будущее, но не имеют механизма непрерывной двунаправленной связи с реальной климатической системой в реальном времени. Данные, поступающие от метеорологических станций и спутников, используются для верификации и калибровки, но не для активной коррекции текущего состояния модели в процессе ее работы.

**Сценарии моделирования.** Цифровые двойники климатических систем, в зависимости от целей и временного горизонта, могут реализовывать различные сценарии моделирования. Эти сценарии охватывают как ретроспективный анализ, так и прогнозирование будущих изменений, а также исследование конкретных экстремальных явлений.

Многолетние модели предназначены для анализа долгосрочных климатических трендов и охватывают значительные временные промежутки. В рамках современных международных инициатив создаются модели, охватывающие недавнее прошлое (с 1990 года) и возможные будущие изменения климата до 2050 года. Моделирование прошлых событий используется для оценки качества модели перед применением прогноза на будущее, а также для количественной оценки того, как характеристики климата и погоды изменятся в течение следующих десятилетий. Такой подход позволяет верифицировать модели на известных данных и повышать достоверность долгосрочных прогнозов.

Сюжетные модели (storylines) представляют собой специализированный класс моделей, нацеленных на реконструкцию развития недавних экстремальных явлений. Волны жары, катастрофические наводнения, засухи, ураганы – эти события исследуются в различных климатических условиях для понимания механизмов их возникновения и развития. Сюжетные модели позволяют детально проанализировать конкретное событие, выявить ключевые факторы, способствовавшие его возникновению, и оценить, как аналогичное явление могло бы развиваться при иных начальных условиях или в изменяющемся климате. Такой подход особенно ценен для задач адаптации и планирования мер гражданской защиты.

Протоколы моделирования играют ключевую роль в обеспечении сопоставимости и надежности результатов, получаемых различными исследовательскими группами. Основой для большинства современных климатических исследований служит проект сравнения связанных моделей (CMIP – Coupled Model Intercomparison Project), который стандартизирует сценарии, входные данные и форматы выходных результатов [6]. Особое значение для данного исследования имеет проект сравнения моделей высокого разрешения (HighResMIP – High Resolution Model Intercomparison Project), нацеленный на разработку и оценку моделей с повышенным пространственным разрешением [7].

В рамках европейской инициативы Destination Earth (DestinE) эти протоколы дополнительно адаптируются для моделирования в масштабе километров, что существенно дополняет существующие климатические прогнозы [8]. Километровое разрешение

позволяет явным образом описывать процессы, которые ранее необходимо было параметризовать: конвекцию, образование облаков, взаимодействие с локальными особенностями рельефа. Важным элементом протоколов является проведение моделирования с повторяющимся воздействием 1990 года без изменения внешних воздействий с течением времени. Такие эксперименты позволяют количественно оценить дрейф модели (собственную внутреннюю изменчивость, не связанную с изменением внешних факторов) и смоделированную межгодовую изменчивость, а также предоставляют необходимый контекст для интерпретации исторических и сценарных моделирований.

**Обработка данных и обновление модели.** Эффективность цифрового двойника климата в значительной степени зависит от того, насколько логично и без разрывов выстроена работа с данными – от момента их получения до пересчёта параметров моделей. В крупных международных проектах по моделированию климата (CMIP, HighResMIP, инициатива Destination Earth) для этого задействуется разветвлённая наблюдательная инфраструктура: сеть наземных метеостанций, спутниковые измерения, радиолокационные комплексы, океанические платформы и другие источники [6-8].

В разрабатываемой платформе данные из этих каналов, приходящие с разной частотой и в разнородных форматах, сначала проходят единый цикл предварительной обработки, включающий фильтрацию шумов, поиск аномальных значений, восстановление пропусков и приведение к общим шкалам и форматам. Затем они объединяются в целостное описание текущего состояния климатической системы с учётом различий по пространству и времени и возможных расхождений между источниками. Для более тонкой очистки, реконструкции недостающей информации и выделения неочевидных закономерностей применяются методы машинного обучения и глубокие нейронные сети, что укладывается в современные практики работы с крупномасштабными климатическими данными [6-10].

Для поддержания актуальности цифрового двойника недостаточно однократной калибровки; требуется регулярное обновление структуры и параметров модели на основе новых данных и результатов численных экспериментов. В работе рассматриваются три группы методов: корректировка по фактическим данным, скользящее обучение и имитация обучающих наборов на основе физических моделей. В первом случае модель, предварительно настроенная по физическим соображениям, уточняется по реальным измерениям, что повышает точность, но ограничено наблюдаемостью внутренних параметров. При скользящем обучении (online/continual learning) цифровой двойник периодически дообучается на новых данных, что позволяет учитывать старение аппаратуры и изменение фоновых условий, но требует выбора рациональной частоты обновления. Подход имитации обучающих данных, реализованный в работе Kapteyn и соавторов, основан на комбинации физических моделей и вероятностных графовых структур: формируется интерпретатор (например, оптимальное дерево решений), а цифровой двойник обновляется по результатам синтетических сценариев, сгенерированных физической моделью. Перспективные методы, предложенные Triguera и коллегами, дополняют эту схему использованием библиотек физически мотивированных функций и разрежённого байесовского обучения для автоматического выявления новых возмущающих членов и их параметров в динамике системы. Совместное применение этих подходов позволяет удерживать цифровой двойник в актуальном состоянии даже при неполноте исходной информации и высокой неопределённости климатических процессов.

**Архитектура программного решения.** Для реализации описанных принципов и процессов необходима соответствующая программная архитектура, способная обеспечить обработку больших потоков данных, выполнение ресурсоемких вычислений и предоставление результатов пользователям в удобной форме. Визуальное представление архитектуры программного решения цифрового двойника климата представлена на рисунке 4.

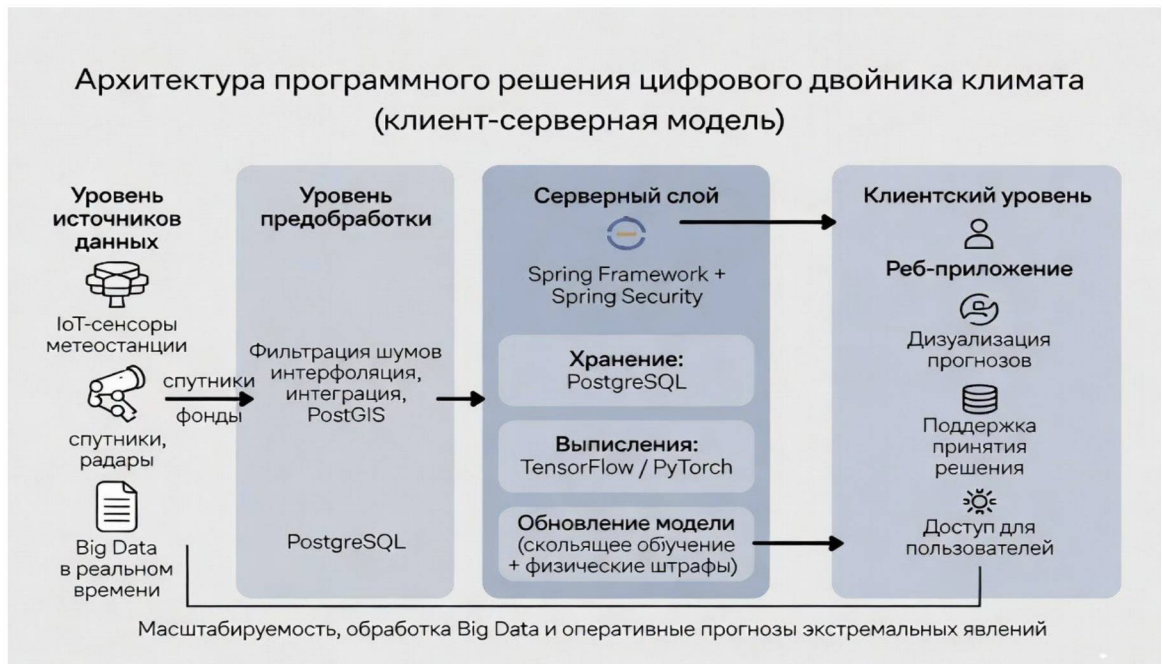


Рисунок 4. Архитектура программного решения цифрового двойника климата

В качестве базового подхода целесообразно рассмотреть клиент-серверную архитектуру. Особенности такой модели заключаются в том, что пользователь отправляет запрос на сервер, где он обрабатывается, после чего результат возвращается клиенту. Сервер при этом способен одновременно обслуживать множество пользователей, что критически важно для систем мониторинга и прогнозирования, где к данным могут обращаться как исследователи, так и лица, принимающие решения. Для реализации пользовательского доступа оптимальным представляется выбор веб-приложения. Главное преимущество такого решения – масштабируемость и доступность: возможность одновременной работы большого числа сотрудников различных ведомств и организаций. Веб-приложение не требует установки на локальные устройства, что снижает требования к вычислительным ресурсам пользователей и обеспечивает доступ с любой точки при наличии интернет-соединения.

В качестве программной платформы для серверной части предлагается рассмотреть экосистему Spring. Spring Security может быть использован для построения систем аутентификации и авторизации, разграничения прав доступа к данным и моделям различного уровня чувствительности. Для хранения и обработки данных целесообразно выбрать PostgreSQL, занимающий лидирующие позиции среди открытых реляционных СУБД и обладающий развитыми средствами работы с пространственными данными (расширение PostGIS), что особенно важно для геопривязанной климатической информации. Для реализации вычислительно интенсивных компонентов, связанных с машинным обучением и обработкой больших данных, архитектура предполагает интеграцию с фреймворками глубокого обучения (TensorFlow, PyTorch) и инструментами для работы с большими распределенными данными.

Практическая реализация описанных подходов может опираться на существующие открытые разработки. В качестве примера можно привести репозиторий *polytope-examples* в рамках инициативы *Destination Earth*, где представлены примеры реализации структур данных для цифровых двойников климатической направленности [11]. Эти примеры демонстрируют подходы к организации эффективного доступа к большим массивам геопространственных данных, их индексации и выборке для последующего использования в моделях. Предлагаемая архитектура обеспечивает необходимую масштабируемость,

гибкость и производительность для реализации всех этапов работы цифрового двойника – от приема данных с сенсоров до визуализации прогнозов и поддержки принятия решений.

**Заключение.** В работе представлена концепция программной платформы для создания самообучающихся цифровых двойников климатических и экстремальных погодных явлений, опирающаяся на развитие общего подхода к цифровым двойникам [1-5] и современные климатические инициативы CMIP, HighResMIP и Destination Earth [6-8]. Предложено перейти от статичных климатических моделей, основанных исключительно на решении систем дифференциальных уравнений, к динамическим системам, способным адаптироваться к текущим условиям за счёт ассимиляции данных в реальном времени и интеграции методов машинного обучения [6-9].

Сформулированы три ключевых принципа построения самообучающегося цифрового двойника: непрерывная ассимиляция разнородных наблюдений, редукция вычислительной сложности посредством surrogate-моделей, обученных на прогонных данных полнофизических моделей, и обеспечение физической согласованности прогнозов через включение физических ограничений в процедуру обучения [6-10]. Эти принципы согласуются с современными представлениями о предиктивных цифровых двойниках и позволяют сбалансировать точность описания процессов, вычислительную эффективность и оперативность обновления прогнозов. Описана программная архитектура платформы цифрового двойника климата, основанная на клиент–серверной модели, веб-интерфейсе, использовании реляционной СУБД с поддержкой пространственных данных и интеграции с фреймворками глубинного обучения, а также возможности опоры на открытые разработки, такие как polytope-examples в рамках инициативы Destination Earth. Такая архитектура обеспечивает масштабируемую обработку потоков климатических данных и доступ к результатам моделирования для широкого круга пользователей, включая исследователей и лиц, принимающих решения. Практическая значимость предложенного подхода заключается в потенциальном улучшении краткосрочного и среднесрочного прогнозирования экстремальных погодных явлений и создании инструментов поддержки решений в условиях усиливающейся климатической изменчивости [6-8].

Самообучающиеся цифровые двойники позволяют формировать специализированные численные сценарии развития опасных метеорологических и гидрологических событий на горизонтах от нескольких часов до нескольких дней, что создаёт основу для своевременного планирования мер адаптации и снижения рисков для населения и экономики [6-10].

#### **Список литературы**

- [1] Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. Presented at: Product Lifecycle Management (PLM) Course; 2002; University of Michigan, Detroit, USA.
- [2] Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018;51(11):1016-1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [3] Zhuang C., Liu J., Xiong H. Connotation, architecture and trends of product digital twin. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2017;23(4):753-768.
- [4] Barricelli B.R., Casiraghi E., Fogli D. A survey on digital twin: definitions, characteristics, applications, and design implications. IEEE Access. 2019;7:167653-167671. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.
- [5] Bergs T., Gierlings S., Brockmann T. The concept of digital twin and digital shadow in manufacturing. Procedia CIRP. 2021;101:81-84. DOI: 10.1016/j.procir.2021.02.010.
- [6] CMIP – Coupled Model Intercomparison Project. Available at: <https://wcrp-cmip.org/cmip-overview/> (accessed 05.03.2026).
- [7] HighResMIP – High Resolution Model Intercomparison Project. Available at: <https://www.highresmip.org/> (accessed 05.03.2026).
- [8] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Destination Earth: Climate Change Adaptation Digital Twin. Available at: <https://destine.ecmwf.int/climate-change-adaptation-digital-twin-climate-dt/> (accessed 15.02.2026).

[9] Kapteyn M.G., Pretorius J.V.R., Willcox K.E. A probabilistic graphical model foundation for enabling predictive digital twins at scale. *Nature Computational Science*. 2021;1(5):337-347. DOI: 10.1038/s43588-021-00069-0.

[10] Tripura T., Chakraborty S. Sparse Bayesian learning for identifying digital twins of dynamical systems with symbolic recovery of governing physics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023;185:109776. DOI: 10.1016/j.ymssp.2023.110858.

[11] Destination Earth. Polytope Examples. Available at: <https://github.com/destination-earth-digital-twins/polytope-examples> (accessed 26.02.2026).

## **CONCEPT OF DIGITAL TWINS AND THEIR APPLICATION TO CLIMATE MODELING**

***V.O. Tikhonenko***

*Third-year student majoring in Software Engineering at the Faculty of Computer Aided Design*

***E.D. Rakitsky***

*Third-year student majoring in Software Engineering, Faculty of Computer Aided Design*

***Yu. A. Yeschik***

*Third-year student majoring in Software Engineering, Faculty of Computer Design*

***A.V. Vorobey***

*Assistant of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics at BSUIR, Master of Technical Sciences*

**Abstract.** The article presents a concept of a software platform for building self-learning digital twins of climate phenomena. It substantiates the need to overcome the limitations of traditional static models that cannot adapt to current conditions. Three key design principles are formulated: real-time data assimilation, reduction of computational complexity through surrogate models, and enforcement of physical consistency in forecasts. The architecture of the software solution based on a client-server model and methods for updating digital twins are described. The results are aimed at improving the accuracy of forecasts of extreme weather events and supporting decision-making.

**Keywords:** digital twin, climate modeling, machine learning, data assimilation, Big Data, surrogate model, physical consistency, weather forecasting.