



DOI: [10.71167/uaceg.2025.58S102](https://doi.org/10.71167/uaceg.2025.58S102)

Получена: 29.07.2025 г.

Приета: 05.08.2025 г.

ЦИФРОВ ДВОЙНИК НА ЗЕМЯТА: МИСИЯТА ВЪЗМОЖНА

Н. Александрова¹, Т. Славова²

Ключови думи: цифров двойник на Земята, интернет на нещата, изкуствен интелект, геопространствени технологии, устойчиво развитие

РЕЗЮМЕ

Визията за виртуалното представяне на планетата Земя, чрез модел с висока точност, детайлност и интерактивност представлява съвсем конкретна реализация на концепцията за „цифров двойник на Земята“ (Digital Twin of the Earth – DTE). Целта на създаването на този цифров модел е по-доброто разбиране и управление на сложната глобална екосистема, което от своя страна предполага бъдещ преход към по-устойчиво развитие. Потенциалът за изграждането на DTE е резултат от напредъка в областта на геопространствените технологии, който позволява възможност за работа с огромни обеми от данни, използване на сложни алгоритми за анализ и визуализация.

Различни инициативи и проекти, свързани със създаването на този цифров двойник, са в процес на разработка и прилагане. Неговото цялостно реализиране изисква преминаване през много и различни етапи, тъй като тази цел представлява многообразен и разностранен процес. В настоящия доклад са анализирани актуални проекти, работни програми, възможни приложения и перспективи за бъдещото развитие на цифровия двойник на Земята, което позволява да се формулират основните изисквания по отношение на структурата на базата данни, обема на информацията и типовете съхранявани данни, обусловени от алгоритмите, използвани за обработка, както и от характеристиките на данните.

¹ Наталия Александрова, гл. ас. д-р инж., кат. „Маркшайдерство и геодезия“, МГУ „Св. Иван Рилски“, ул. „проф. Боян Каменов“ № 1, 1700 София, e-mail: nataliya.aleksandrova@mgu.bg

² Тانيا Славова, гл. ас. д-р инж., кат. „Маркшайдерство и геодезия“, МГУ „Св. Иван Рилски“, ул. „проф. Боян Каменов“ № 1, 1700 София, e-mail: tanya.slavova@mgu.bg

1. Въведение

Цифровият двойник на Земята предоставя възможност за по-добро разбиране и управление на физическия свят в реално време. Той се дефинира като виртуален модел на нашата планета и има възможност да се интегрират данни и информация за различни обекти, услуги, процеси и продукти. Източниците на данни за неговото създаване са от съществуващия реален свят, от който може да се осигури точна и детайлна информация. Цифровият двойник на Земята представя в дигитален вид модели и данни в мрежова среда. Огромните количества набори от данни, които се събират и интегрират в единна система, се осигуряват от множество източници. Това могат да бъдат различни видове сензорни системи и устройства, спътници, специализирани инструменти за измерване и регистрация, исторически данни, научни изследвания, наблюдения, статистически и социално-икономически данни и др. Тази информация се синтезира и анализира с помощта на алгоритми за машинно обучение и компютърни системи с достатъчна мощност, за да се създаде детайлен и динамичен цифров двойник на Земята. Основополагащата глобална концепция – „Цифрова Земя“ (Digital Earth) – е предложена през 1998 г. от Ал Гор [1]. Днес тази глобална визия за интегрирано цифрово представяне на Земята се интерпретира и развива в технологична реализация като „цифров двойник на Земята“. Визията за създаване на цифрова Земя като интерактивен, триизмерен виртуален модел на планетата, който обединява геопространствени и тематични данни от различни източници, е разгледан в доклад на Ал Гор. Целта на инициативата е да помогне за преодоляване на липсата на достъп до информация за широката общественост, за подкрепа на образованието, научните изследвания, управлението на природни ресурси и справянето с предизвикателствата на глобалните климатични промени. „Цифровата Земя е неизбежният резултат от космическата ера в историята на развитието на информационното общество“. Моделът е многоизмерна, многомащабна, многовремева и многослойна информационна система. Според Международното общество за цифрова Земя (International Society for Digital Earth), Digital Earth е замислена като обща платформа за подкрепа на национално и международно сътрудничество за глобално устойчиво развитие и нова развиваща се точка на икономически растеж и социално благополучие [2]. Enders и Hosbach извършват обзорен преглед и систематизиране на концепцията за цифрови двойници в различни приложни области, като обобщават, че те представляват виртуално копие на реален обект, с възможност за взаимодействие между отделните компоненти и симулативни приложения [3]. Цифровият двойник на Земята е съвкупност от научно-приложни тематични цифрови двойници, базирани на спътникови данни с приложение извършване на прецизни симулации, прогнози на изменения в атмосферата, океаните и биосферата, достъп до данни в реално време за вземане на информирани и устойчиви решения.

2. Съществуващи инициативи и проекти

Налични са различни инициативи за създаване на цифров двойник на Земята, те са на различен етап на развитие и се разработват в зависимост от своята цел и финансиране. Тези инициативи могат да бъдат разграничени според своето ниво на обхват на: международни и местни. Някои от най-ключовите области, в които те се разработват, са свързани със следните направления: климатични промени и устойчиво развитие, градско планиране, управление на природни ресурси, модели на природни бедствия, като горски пожари, наводнения, замърсявания и др., модели за провеждане на

експерименти и анализи. Също така те имат приложение при разработване на различни политики и споразумения (напр. Парижкото споразумение).

2.1. Инициативи и проекти с локален характер

Представени са отделни изследвания, които са с определен териториален обхват, отнасят се към различни отрасли на икономиката и обществото, като всеки от тях е със свои специфични функции и значимост, но по своята същност представят решения, които са мащабируеми и могат да се свържат с концепцията за глобален цифров двойник. Проекти, разработени за градове като Сидни [4], Барселона [5], Цюрих [6] и София [7] демонстрират как цифровите двойници могат да служат за устойчиво планиране, симулации и вземане на решения. Някои разработки, като британския Virtual Energy System – мащабна инициатива за изграждане на цифрова реплика на цялата енергийна система на Великобритания [8], или пилотния морски модел в Келтско море [9], въпреки че са локални, имат методологична стойност и потенциал за глобална адаптация.

Проект, фокусиран върху град Сидни, Австралия [4], има за цел да разработи и демонстрира цифров двойник на града като средство за устойчиво градско планиране, анализ и прогнозиране. В него са включени от една страна данни за качество на въздуха, емисии на парникови газове, метеорологични данни, а от друга престъпност, обем на трафика, пътнотранспортни произшествия. Системата е напълно изградена и функционална. Изследване на връзката между технологията на цифровите двойници и политиките за устойчиво градско развитие е представено в проект, отнасящ се до цифровия двойник на Барселона [5]. Разработеният универсален инструмент, приложим в други контексти, има индиректно потенциално значение за глобални инициативи като Digital Twin Earth. Анализ на цифровия двойник на град Цюрих като активен инструмент за устойчиво градско планиране е извършен от Barresi, A. [6]. Моделът комбинира 3D градски данни, данни от сензори, предоставяни в реално време от IoT (Internet of Things – интернет на нещата), машинно обучение и технологии като ГИС (географски информационни системи) + BIM (Building Information Modelling – строително-информационно моделиране) за симулиране, анализ и визуализация на различни сценарии за развитие. Самият град Цюрих разполага с напълно функциониращ цифров двойник от 2011 г., значително разширен след 2018 г. Проектът демонстрира добри практики, приложими в други градове и поддържа цели, които са в основата на глобални инициативи. Michales, O. [8] извършва изследване, свързано с цифровите двойници в енергийния сектор на Обединеното кралство, включително създаването на мащабна инициатива за изграждане на цифрова реплика на цялата енергийна система на Великобритания – Virtual Energy System (VES).

В доклад на Спасова, Т. [10] се представя проект, чиято цел е разработка на хибриден методологичен модел за изследване и мониторинг на ефекта от градските топлинни острови в различни икономически райони на България, в контекста на бъдещото изграждане на цифров двойник на Земята. В напреднала фаза към датата на публикуване той включва данни от спътниковите мисии Sentinel 2, Sentinel 3 и Landsat 9, както и данни от термокамери, дронове и национални геопортали с отворен достъп, чрез които са изготвени тематични карти, модели и анализи. Обхватът на проекта е на национално ниво, като са използвани конкретни примери от отделни градове (София, Бургас, Варна, Пловдив и др.). Практическото му приложение, освен на национално ниво, е от значение за инициативи като Destination Earth и GreenData4All. Изграждането на цифров двойник на квартал от град София [7], с цел анализ и мониторинг на качеството на въздуха, градското планиране, енергийната ефективност, мобилността и др. се разработва от институтът GATE, като съвместна инициатива между два

университета – в България и Швеция. Платформата на GATE предоставя информация за качеството на въздуха в реално време, на произволно местоположение, като се използват методи, базирани на времеви и пространствени, вероятностни и статистически анализи. 3D моделът интегрира кадастрални данни и данни, получени от цифрова блискообхватна фотограметрия и наземно лазерно сканиране.

Анализирани са и някои обзорни доклади [3, 11 – 20], които показват, че съществува активно академично и инженерно усилие за изграждане на рамки, архитектури и стандарти, необходими за изграждането на бъдещ глобален цифров двойник. Докладите обхващат различни сектори – от възобновяеми енергийни източници до речни басейни и градски логистични мрежи – и дефинират компоненти като интернет на нещата, изкуствен интелект, облачни изчисления, модели в реално време и мултисензорно наблюдение, които са от съществено значение за изграждане на цифрови двойници. При тях индиректно или пряко [16] се заявява връзката с глобалните инициативи.

Регионално изследване, фокусирано върху Източен Памир, планински регион, разположен в части от Китай, Таджикистан и Афганистан е представено от Feroz, A. et al. [11]. Проектът има за цел картиране на ледници, покрити с наноси, посредством прилагането на машинно обучение върху данни от множество спътникови източници: SDGSAT-1, Sentinel-2, ASTER GDEM, ITS_LIVE и др. Завършен към момента на публикуване на доклада, една от целите му е да се създаде автоматизирана методология, която може да се прилага и в други планински райони със сходни условия. Corrado, C. et al. [12] разглеждат два конкретни примера – един случай на приложение в САЩ (за устойчиви центрове за данни) и един в Европа (университетски кампус в Крит, Гърция). Представената методологична разработка включва рамка, базирана на метрика, предназначена за използване в цифрови двойници, която има за цел устойчиво управление на умни сгради и градове. В доклада е представено как съществуващи устойчиви практики могат да бъдат интегрирани в цифрови двойници. Също така се предлага обща рамка, която може да се използва както за планиране, така и за мониторинг и управление на сгради и градски структури. Тя има за цел подпомагане на създаването на стандарти и методологии, валидиране както за физическата, така и за дигиталната страна на обектите. Предложената рамка е приложима в мащабируеми и адаптивни системи. Подобни примери имат косвено значение на изграждането на глобален цифров двойник на Земята, тъй като разработените решения могат да бъдат модулно интегрирани в по-големи системи като Destination Earth или други инициативи за градски компоненти на глобален цифров двойник. Мащабен систематичен преглед и анализ на дефинициите и компонентите на цифровите двойници, свързан със сградите, е описан от Abdelrahman et al. [13]. Изследването включва изчерпателна типология и дефиниция на цифрови двойници, валидна за приложението им в градски и архитектурни контексти, а приложението към глобалния контекст е имплицитно заложено. Обзорен научен доклад, в който се извършва анализ на настоящото състояние, скорошни постижения и бъдещи насоки на цифровите двойници в инженерните области е представен от Iranshahi, K. et al. [14]. Извършен е систематичен анализ и оценка на развитието на цифровите двойници в седем сектора – производство, здравеопазване, авиация, строителство, умни градове, транспорт и логистика и земеделие. Индиректна, но значима е връзката с изграждането на цифров двойник на Земята. Докладът представя унифицирана дефиниция и структура, приложима за глобални системи, като демонстрира кое функционира ефективно и кои са препятствията в различните сектори. Идентифицира се необходимостта от стандартизация, сигурност и интеграция на данни – критични елементи за глобален цифров двойник. Анализ на състоянието на изследванията за цифровите двойници в контекста на възобновяемите енергийни системи –

включително соларна, вятърна, геотермална, хидроенергия и биомаса – е извършен от Semeraro, C. et al. [15]. Използвани са данни от международната научна литература, включително реални казуси като цифрови двойници на китайска хидроелектроцентрала, слънчеви сгради в САЩ, сондажи в геотермална енергия в Източна Африка. Въпреки че не се споменава пряко Destination Earth, докладът описва структура и архитектура на цифров двойник, която може да се мащабира; подчертава се ролята на изкуствения интелект, интернет на нещата, облачните изчисления и симулациите в реално време, които са ключови компоненти в един глобален цифров двойник; дефинира се стандартизиран многослоен модел, подходящ за интеграция на множество други модели. Фокусът в [16] е върху регионалните вериги за доставка на храни. Представява глобален тематичен преглед, базиран на литература от Европа, Азия, Северна Америка и др. Изследването има значение за изграждането на цифров двойник на Земята – значимо, но индиректно: Представената методологична рамка и изводи са напълно приложими към по-широки териториални мащаби, включително глобални, дефинират се комбинации от технологии, архитектури и етапи, необходими за изграждане на глобален цифров двойник на Земята в аграрния и логистичен сектор, също така се подчертава важноста на локалните системи като градивни елементи на глобалния модел. Систематичен преглед и анализ на научни публикации за градски цифрови двойници с библиометричен и съдържателен анализ на подбрани статии, публикувани в базите данни Web of Science и Scopus, е извършен от Masoumi, H. et al. [20]. Изследователският анализ е фокусиран върху типове данни и източници, казуси, приложени технологии и методи, степен на завършеност и локални приложения. В доклад [20] са обобщени множество казуси от различни държави, вкл. Великобритания, Китай, Германия, Испания и др. Проучването е базирано на систематичен преглед и анализ на 41 научни публикации, фокусирани върху градски цифрови двойници. Извършен е изследователски анализ на зрелостта на концепцията City Digital Twin на международно ниво, но с градски (локални) приложения. В доклада не се заявява пряко, че City Digital Twins ще доведат до изграждане на глобален цифров двойник на Земята, но подразбиращо е предположението, че развитието и интеграцията на градските цифрови двойници с технологии като изкуствен интелект, големи данни и интернет на нещата са важна стъпка към по-мащабни, евентуално глобални цифрови модели. Технологиите с ключово значение са: BIM, ГИС, интернет на нещата, изкуствен интелект и облачни изчисления. Авторите подчертават, че градските цифрови двойници имат потенциал да допринесат за устойчиво развитие, по-добро управление на ресурси, околна среда и социални услуги – ключови компоненти и на глобалния цифров двойник на Земята.

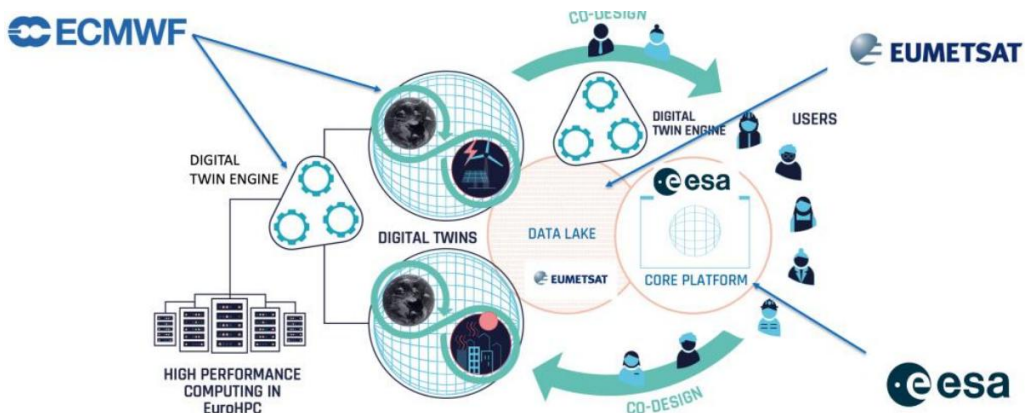
Общото между всички разгледани примери е, че те демонстрират или предполагат модулен подход – множество малки или секторно ориентирани цифрови двойници, които могат да се интегрират в единен, глобален цифров модел на Земята. Това позволява адаптивност, повишава пространствената и времевата резолюция и подпомага устойчивото управление на ресурси.

2.2. Регионални и глобални инициативи

Разгледани са регионални и глобални инициативи от Европа, Китай, Австралия, Африка, които са с международно участие, разработват се в сътрудничество и имат значимо глобално въздействие, като напр. 4D DTE Hydrology datacube, Destination Earth, Digital Earth Africa и др.

Destination Earth (**DestinE**) е водеща глобална инициатива, финансирана от Европейския съюз, която стартира през 2022 г. и има за цел да изгради цифров двойник

на земната система до 2030 г. Инициативата е предвидена да подпомага устойчивото развитие в посока на подобряване на климатичните политики, управлението на природните ресурси, енергия и земно покритие, като се създават различни тематични цифрови двойници. Интерактивната цифрова информационна система на DestinE е разработена и в посока подпомагане на вземането на информирани решения. Destination Earth към момента е оперативна и се използва в реални приложения [21]. През различните фази на проекта Destination Earth ще се разработват няколко цифрови двойника, като приоритетни цели за първата фаза на изпълнение (която е активна от 2024 г.) са избрани: адаптацията към климатичните промени и управлението на риска от природни бедствия при екстремни метеорологични условия. DestinE създава възможности за съвместното разработване на информационната система в различни сектори (управление на възобновяеми ресурси, вода, храна, енергия, здравеопазване) съвместно с експерти и крайни потребители. Destination Earth е технологичната реализация на идеята, заложена в Digital Earth с приоритет върху високо прецизни симулации, AI, суперкомпютри (HPC – High-Performance Computing) и оперативна политика. Инициативата се изпълнява съвместно от три оторизирани структури (фиг. 1): ECMWF (Европейски център за средносрочна прогноза за времето), ESA (Европейска космическа агенция) и EUMETSAT (Европейска организация за разработване на метеорологични спътници). На фиг. 1 са представяни основните компоненти на инициативата Destination Earth – включително цифровите двойници (Digital Twins), ядрото на платформата (Core platform), контейнер на набора от данни (Data Lake), потребителите (users) и съвместния процес на проектиране (co-design) [22].



Фиг. 1. Архитектура на Destination Earth (DestinE) (Credits: ECMWF)

Друга значима инициатива е „Цифрова Земя Африка“ (Digital Earth Africa, DE Africa), насочена към предоставяне на геопространствени данни и подпомагане на устойчивото развитие за африканския континент [10]. Приложима за адаптация към социалните, екологичните и икономическите промени на континента, както и в посока към развитие на екосистемата за иновации във всички сектори. Digital Earth Africa извършва обработка на свободно достъпни данни и създава завършени информационни продукти за подпомагане на процесите по вземане на информирани решения. Инициативата работи в тясно сътрудничество с общности като AfriGEO, GEO (Group on Earth Observations), CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research), FAO (Food and Agriculture Organization) и др. Данни за текущото състояние и реализираните резултати се публикуват в редовни годишни доклади [23], като в тях се

предоставя информация за управлението, продукти и услуги, потребители, институции, държави и партньори, постижения, стратегически планове и инструменти на инициативата. DE Africa е оперативна услуга за целия континент с приложения, реализирани към 2024 г., свързани с наблюдение на брегови зони (Coastal Erosion Monitoring), годишни карти на земното покритие (Land Cover Data), земеделски практики и управление на риска от недостиг на вода (Vegetation Alert Tool). Анализ на спътникови данни за 30-годишен период, свързан с растително земно покритие в Джибути, е представен от Wardle, J. и Phillips, Z. [19] чрез платформата Digital Earth Africa Open Data Cube (DEA ODC). Въпреки че проектът е регионален, той е изпълнен в рамките на Digital Earth Africa, част от глобалната визия за цифров двойник на Земята, поддържана от ООН, ESA, CSIRO и други партньори. Докладът потвърждава как локален мониторинг може да бъде мащабиран в глобални модели за климатичен риск и продоволствена сигурност.

През последните две десетилетия Австралия се утвърди като водеща в разработването и приложението на концепцията Digital Earth, въпреки че не разполага със значителни собствени космически ресурси, а едва през последните години страната създаде своя космическа агенция. През 2017 г. стартира инициативата Digital Earth Australia, която е изградена на основата на предходната система Data Cube на Geoscience Australia и подкрепена от CSIRO, NCI и NCRIS. Системата Data Cube е в основата на националния проект за спътниково картографиране Digital Earth Australia. В рамките на инициативата се развиват редица геопространствени проекти и инициативи, включително National Map, Queensland Globe, Geoscape, Australian Geoscience Data Cube, Digital Earth Australia и други [2]. В същия документ се разглежда изграждането на Digital Earth в Китай, като се обръща внимание и на различни предизвикателства, свързани с осигуряването на прозрачност и достъп до индивидуални и публични данни. Изградени и завършени са платформи и системи, които обхващат всички ключови индустрии с технологична инфраструктура в глобален мащаб. Digital Earth China е тясно свързана с международни инициативи като GEO, като по този начин се допринася към глобалната визия за Digital Earth и Earth Twins. Инициативата е разработена на национално ниво, с глобална връзка и влияние, като се разглеждат локални реализации – като например регионален проект Digital Fujian, дигитални градове като Digital Hong Kong и Digital Macao. Основният акцент в Digital Earth China [2] е върху използването на дигитални технологии, пространствени данни и информационна инфраструктура (5G, IPv6 и др.) за изграждане на интегриран модел на Digital Earth (интегрирано използване на Big Earth Data – големи обеми данни за Земята), като модел за икономическо, научно и социално развитие.

Напредъкът в спътниковите технологии за наблюдение на Земята е от ключово значение и при разработването и прилагането на методи при Digital Twin Earth в областта на хидрологията [24]. 4D DTE Hydrology datacube обединява данни от наблюдение на Земята с висока разделителна способност и подобро моделиране на почвената влага, валежите, изпарението и речния отток. Представеният 4D модел – цифров двойник на водния цикъл на сушата – е напълно функциониращ регионален прототип с възможности за симулации, предсказване и анализ на хидрологичните процеси с висока пространствена и времева разделителна способност. Цифровият двойник обхваща като основен тестови район – река По в северна Италия (Po River Basin) и Средиземноморския регион. Планирано е разширяване на инициативата в посока на цяла Европа, извършени са и допълнителни тестове на басейни в Испания и Австралия. Платформата DTE Hydrology, която е напълно разработена за Южна Италия (Medicane Apollo) и над целия Средиземноморски басейн, е свободно достъпна на: <https://explorer.dte-hydro.adamplatform.eu/>. Brocca, L. et al. [24] представят анализ на

актуални данни за валидиране в Средиземноморския басейн, а изградената система се използва за прогнозиране и управление на водни ресурси, наводнения и свлачища, управление на напоителните процеси в прецизното земеделие. Сценарият what-if се прилага за селскостопанското, гражданското и промишленото водоползване в басейна на река По. Детайлен анализ на ролята на дистанционните методи в изграждането на цифрови двойници на речни басейни е извършен в [18] – териториално ограничени, но съществени компоненти за бъдещата глобална визия за цифров двойник на Земята. В изследването е извършена оценка на приложимостта, предимствата и предизвикателствата, свързани с използването на сателитни и въздушни данни. Чрез дистанционно наблюдение могат да се извличат 7 ключови хидрологични променливи: валежи, температура на повърхността, изпарение, водни нива, речен отток, почвена влага и растителност. В изследването се разглеждат ключови технологии, включващи сателитни платформи като TRMM, GPM, MODIS, Landsat, Sentinel, както и алгоритми за машинно обучение и интеграция на данни от множество източници. Тематиката и решенията са приложими глобално, но докладът не представя конкретен глобален проект, а обобщава съществуващите и потенциалните приложения на цифрови двойници в рамките на отделни речни басейни. Включени са примери от Китай, Централна Азия, Южна Америка, Африка и Европа. Представява регионален подход с глобален потенциал, който може да бъде част от изграждането на глобален цифров двойник на Земята, но сам по себе си не е глобален проект. Докладът има значение за изграждането на глобален цифров двойник, защото представя ключови наблюдаеми променливи и методи за тяхната дигитализация; разглежда инструментариума, необходим за цифрово представяне на сложни физически процеси; предлага решения на технически пречки като ниска резолюция, забавяне в данните и липса на калибриране.

Анализ в глобален мащаб на приложението на цифровите двойници за съхраняване на културното наследство е извършен в [25]. Разглеждат се казуси от множество държави и култури, включително обекти от списъка на ЮНЕСКО, музеи, археологически обекти и дигитални архиви. Разгледаните технологии включват: LiDAR, фотограметрия; IoT сензори за измерване на влага, температура, вибрации и замърсяване; изкуствен интелект и машинно обучение за анализ и симулации на реставрации; виртуална и добавена реалност за виртуален туризъм и образование; блокчейн за защита на цифровите архиви и дигитална репатриация; разпределени бази от данни и облачни платформи. Разгледаните казуси са обекти като: Нотр Дам, Помпей, Палмира, Теракотената армия, Акрополът в Атина и др. Включени са музеи, университети и институции, прилагащи цифрови двойници за исторически обекти и ритуали. Сред приложенията са мониторинг на обекти в реално време; прогнозна поддръжка и анализ на разрушения; възстановяване чрез симулации (преди реална интервенция); създаване на виртуални музеи и интерактивни изложби; записване на нематериално наследство: език, танци, музика, обичаи; политики за достъп, етика, авторски права и културна представителност. Предложена е визия за „глобални културни двойници“. Pasupuleti, M. [26] разглежда приложението на цифровите двойници в съхраняването на световното културно и природно наследство на ЮНЕСКО, като обединява технологии, казуси и визии, които са от ключово значение за изграждането на глобален цифров двойник на Земята по отношение на неговия културно-исторически компонент. Разглеждат се обекти на световното културното наследство, като пещерите Ajanta и Ellora (Индия), Акрополът (Гърция), Петра (Йордания). Технологията на цифровите двойници може да трансформира опазването на културното наследство, като създава цифрови двойници с висока точност на исторически паметници, артефакти и археологически обекти. Същевременно се разширява общественият достъп до обектите на културното наследство чрез виртуален

туризъм, разширена реалност (AR) и цифрови музеи. Популяризира се културата сред обществеността, като същевременно се гарантира историческата точност и автентичност.

Earth BioGenome Project (EBP) [27] е глобален проект, който допринася за по-доброто разбиране на биологичното разнообразие на планетата и създаване на генетичен цифров двойник на биосферата. Проектът Earth Biogenome има за цел да разработи висококачествени референтни геноми за всички 1,8 милиона известни биологични видове до 2030 г., разработва се в три фази. Целта е да се подобри опазването на биоразнообразието, екологичният мониторинг и биологичните изследвания. Проектът стартира през 2018 г. с начален пилотен период от две години (2018 – 2020), последван от Фаза I (2020 – 2023), по време на която е предвидено секвениране (подредждане) на геномите на 9400 вида, но към днешна дата този етап все още не е приключен. Геномите на останалите около 1,7 милиона вида е предвидено да бъдат секвенирани по време на Фаза II (2024 – 2027) и Фаза III (2028 – 2030).

Глобалната реакция при кризисни ситуации, като пандемията COVID-19, природни бедствия, хуманитарни кризи и др., за различни региони са анализирани в доклад на Olabi, W. et al. [28]. Представените примери са за градове, региони и инфраструктури, моделирани чрез цифрови двойници. Създаването на глобални дигитални симулации за предвиждане и координация са от решаващо значение за готовността при бедствия. Авторите разглеждат настоящите предизвикателства, етичните въпроси и правят препоръки за бъдещо приложение.

Освен изградената и оперативна платформа, действаща при кризисни ситуации – Extreme Weather-Induced Digital Twin, която е част от инициативата Destination Earth за управлението на риска от природни бедствия при екстремни метеорологични условия, се разработват и други, които действат самостоятелно или като част в рамките на по-мощни приложения, напр. модела INFERNO.

Предсказване на горски пожари в световен мащаб е разгледано в доклад на Zhong et al. [29]. Авторите предлагат изграждането на опростен (reduced-order) цифров двойник, предназначен за глобално предсказване на горски пожари, който да предоставя по-достъпни и навременни прогнози, спрямо модели, за които се изисква часове работа на суперкомпютри. Този иновативен подход за прогнозиране на горски пожари чрез цифров двойник е изграден върху физическия модел JULES-INFERNO. INFERNO [30] е специален модул, включен към JULES, който симулира възникването и разпространението на горски пожари, използвайки фактори като температура, влажност, валежи, почвена влага и влияние на човешки и природни фактори. Валидиран чрез глобални данни, моделът показва висока корелация и надхвърля традиционните индекси в предсказуемостта на пожарите. INFERNO се използва за анализ и сравнение на глобалната динамика за пожари, като инициативата е индиректно свързана с концепцията за глобален цифров двойник на Земята.

В доклад на Liu, W. et al. [31] е систематизирано историческото развитие на цифровите двойници в аерокосмическия сектор, основните технологии (3D моделиране, симулации, AI/ML, edge computing, AR/VR), реалните приложения: за обучение на астронавти, управление на функционалното състояние на космически кораби, поддръжка на станции и т.н.; включени са и предизвикателства като: латентност на предаване, точност на моделите, защита на данни и интерфейси. Проектът разглежда прилагането на цифрови двойници в глобален контекст (т.е. в космически мисии, включително дълбокия космос и колаборации с институции като ESA, NASA и SpaceX), но не е единен централен глобален проект. Вместо това, той обединява множество реални инициативи и технологични разработки в единна рамка. Докладът не само има тясна връзка с идеята за глобален цифров двойник на Земята, но дори разширява обхвата към цифрови двойници на екосистемата около Земята (вкл. космическа среда, орбитални

обекти, мисии до Марс и отвъд), анализ на космически данни и мониторинг на околоземната среда, което допълва и надгражда наземните цифрови двойници.

3. Настоящи предизвикателства и бъдещи перспективи за развитие

Цифровият двойник на Земята вече не е визия от бъдещето – той е в процес на реализация чрез сътрудничество, приложение на наука и технологии. Както настоящите, така и бъдещите предизвикателства по изграждането на цифровия двойник на планетата са свързани с по-добри начини за интегриране на разнородни качествени данни в единна платформа, разработване на надеждна координирана правна рамка и регулации, осигуряване на подходящи технологични решения, които да съответстват на нововъзникващите изисквания за развитие и прилагане на цифрови двойници. Съществуват редица разработки, свързани с изграждането на цифров двойник на Земята, в които се разглеждат технологии като: IoT, 5G, изкуствен интелект, облачни изчисления и необходимост от двупосочна комуникация в реално време. В изследване на Maimour, M. et al. [17] се поставят пряко нерешени ключови въпроси за бъдещи изследвания като: непълна интеграция, слабо внимание към мрежовите аспекти и необходимост от модулност и колаборация. Този ключов обзорен източник представя примери и анализи, които пряко акцентират върху концепцията за цифров двойник на Земята, определена като стратегическа цел до 2030 г. в рамките на инициативата Destination Earth на ESA.

3.1. Технологична обработка и управление на големи набори от данни

Технологичната обработка и управление на големи набори от данни (Big Data) е от съществено значение за изграждането и поддържането на цифровите двойници на Земята. Необходимостта от изграждане на концепция за основополагащите идеи, изчислителната инфраструктура, обработката на големи данни, приложението на облачни платформи и технологии е от практическо значение за изграждането на глобалните цифрови модели.

Big Data предоставя основата за моделиране, симулации и визуализация, свързани с много големи, сложни и разнообразни набори от данни, постъпващи от различни източници и в различни формати. Те надхвърлят възможностите на традиционния софтуер за събиране, обработка и използване на информация. Основните характеристики на Big Data са: обем, разнообразие (различни типове и формати данни – структурирани, неструктурирани и частично структурирани), скорост (бързина на събиране и обновяване) и достоверност (точност и надеждност на данните). Процесът на тяхната начална обработка включва: събиране (от сензори, IoT, системи и т.н.), филтриране, почистване (премахване на невалидни или противоречиви данни) и анализ (чрез AI, машинно обучение, статистически и прогнозен анализ) [32]. По този начин, в резултат на обработката ще се предоставят висококачествени модели и надеждни прогнози за реализацията на цифровите двойници.

Докладът на Bauer, P. et al. [33] представя концептуална рамка за трансформация на изчислителната инфраструктура (софтуерна и хардуерна архитектура) за прогноза, симулация и вземане на решения, свързани с прогнозирането на климатични промени. Авторите препоръчват управлението на цифровия двойник да се извършва с по-гъвкави работни процеси, интегриране на машинно обучение, нови изчислителни технологии,

комбинирани CPU-GPU системи. Отделните модули на разработката се извършват от водещи институции, като ECMWF, ETH Zürich, CSCS, DOE, NCAR и други.

Guo, H. et al. [2] разглеждат значението на Big Earth Data, като се застъпва идеята за преход от моделно-ориентирана към такава, дефинирана от данни парадигма. Преминването към стандарт, базиран на данни, изисква иновативни подходи като облачни изчисления, автоматизирана обработка, интелигентен анализ и методи за генериране на знания от глобалните информационни потоци. Основно се застъпва идеята, че науката преминава от моделно-ориентирана към данни-движена парадигма. Big Earth Data са ключов ресурс за бъдещето на науките за Земята. Глобалната мрежа от системи за наблюдение на Земята (Global Earth Observation System of Systems, GEOSS), инициентирана от GEO, също прилага принципите на използване на облачни изчислителни технологии с цел обединяване на наблюдения и симулации на глобално ниво.

Предоставяне на онлайн пространствен анализ и прилагане възможностите на облачните изчисления се осигурява от платформи като ArcGIS Online, Google Earth и Google Maps [34]. Google Cloud Services и ArcGIS 10 (ESRI), поддържащи облачна архитектура, са примери как от крайни клиентски устройства данните се прехвърлят към сървъри, в които се извършва достъп, управление и анализи на пространствени данни в реално време.

Огромният обем от данни (до 1 петабайт данни на ден), свързан с развитието на технологията на цифровите двойници, изисква да се въведе нов по-ефективен подход, подобен на процеса на поточно предаване на данни. Системата Digital Twin Engine позволява на потребителите да взаимодействат в реално време със симулационния изход. По този начин се създава непрекъснат работен процес между моделите на цифровите двойници и приложенията на потребителите. Като част от системата е разработване на рамка за непрекъснато наблюдение и оценка на симулациите и количествено определяне на несигурността чрез използване на наблюдения и машинно обучение [35].

Технологичната обработка и управлението на големи данни не е само техническо предизвикателство, но представлява и стратегически приоритет за международната научна общност. Реализирането на пълния потенциал на Digital Earth като мощен инструмент за вземане на решения в реално време е възможен чрез интегрирането на ключови технологии като IoT, Big Data, AI и облачни платформи. Същевременно тази разработка трябва да отговаря на трите рамки на ООН, включително целите за устойчиво развитие, климатичните промени и намаляването на риска от бедствия.

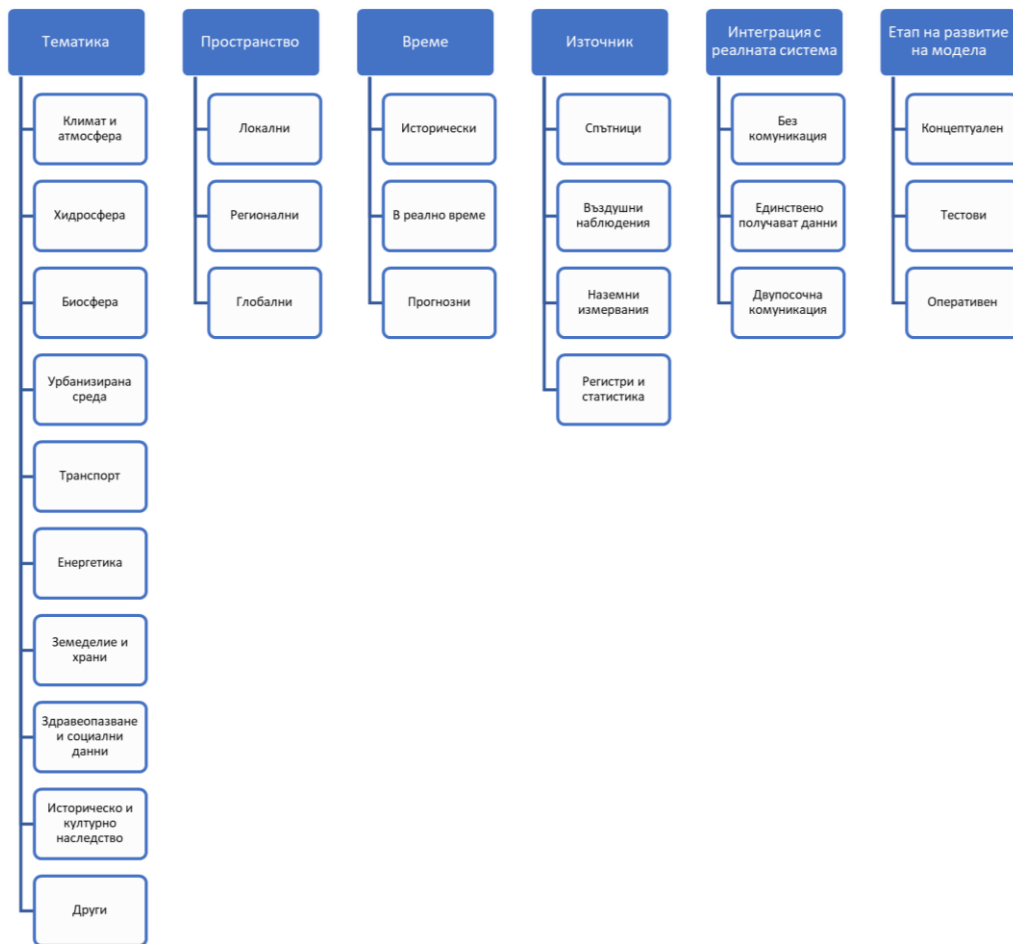
3.2. Класификация, стандартизация и качество на данните

Класификацията, стандартизацията и качеството на данните са аспекти от съществено значение за изграждането и функционирането на цифровия двойник на Земята. Те осигуряват основата за достоверно моделиране, симулация и вземане на информирани и устойчиви решения, представени в what-if сценарии. Високоэффективната интеграция и анализ на данни в цифровия двойник изискват достоверни, съвместими по стандарт и структура данни, които да позволяват автоматизирано и цялостно моделиране [2]. В доклад на Тодорова [36] е идентифициран стандартът “CityGML” като ключов инструмент за интеграция на геопропространствени данни, подпомагащ градското планиране и управление.

Международните инициативи GEOSS и GEO обединяват глобални системи за наблюдение на Земята, като Copernicus, NOAA, CEOS, NASA, с цел изграждане на общи стандарти и платформи за обмен на геопропространствени данни [2]. Оперативната

съвместимост на стандартите, прилагана чрез международната инициатива GCI (Global City Indicators) за оценка и мониторинг на градското развитие, устойчивост и качество на живот, осигурява не само данни, но и инструменти за тяхното използване.

Изследователският и иновационен център RhySearch предлага класификацията на цифровите двойници в зависимост от тяхното взаимодействие с реалната система да е в три категории: (1) самостоятелно функциониращи; (2) еднопосочно свързани с реалната система; (3) с двупосочна комуникация с реалната система [37].



Фиг. 2. Класификационна схема на цифровите двойници

Ефективното изграждане на DTE изисква осигуряване на висококачествени, хомогенни и систематизирани данни, подлежащи на автоматична обработка и интерпретация. Това предполага наличие на ясно дефинирани таксономии, метаданни и методи за класификация, особено при комбинирането на множество източници като спътници, сензорни мрежи, социални медии и наземни наблюдения [2]. Анализът на различни източници позволява диференциране на данните по различни показатели, свързани с тяхната роля в изграждането на DTE. Примерна класификационна структура е представени на фиг. 2. Различните критерии на класификация са систематизирани по следите показатели: тематиката на областта, в която се разработват; пространствен и

времеви обхват; източници на данни за тяхното изграждане; характера на тяхното взаимодействие с реалната система; етап на развитие на цифровия двойник. Схемата отразява актуални категории в научната литература, напр. Tao et al. [38], но би могла да се допълва, за да се използва класификацията като таксономичен инструмент в научни и приложни контексти.

Според [39], именно достъпът до висококачествени и стандартизирани геонаучни данни е основа за създаването на интегрирани цифрови представяния на Земята, включително под формата на цифров двойник. Създаването на съвместими класификационни системи, които да позволяват интеграцията на различни типове геонаучна информация – геоложка, геофизична, геохимична и други е ключов фактор, който се разглежда в [52]. В подкрепа на това, в [40] се дефинира, че мултисензорните и многомодалните източници на данни трябва да бъдат обединени в хомогенна информационна структура. Това се постига чрез централизирани компоненти като data lakes, където данните се почистват, синхронизират и трансформират, за да отговарят на единни стандарти преди да бъдат използвани в цифровия модел на Земята. Пример за това е интегрираната облачна платформа 4D DTE Hydrology datacube, базирана на спътникови и хидрологични данни, която поддържа анализи и “what-if” симулации. Платформата включва спътникови данни за управление на водни рискове и ресурси от Sentinel, MODIS, CryoSat-2 и др. и хидрологични модели като CONTINUUM, GLEAM, S3M.

Стандартизацията се разглежда като ключов механизъм за осигуряване на оперативна съвместимост между различни компоненти на цифровия двойник. Инициативи като Open Geospatial Consortium (OGC) и ISO (International Standards Organization) разработват отворени стандарти и спомагат за съвместимостта на данните между системи и институции [2]. Въпреки това липсата на единно разбиране за понятието „цифров двойник“ е едно от основните предизвикателства пред стандартизацията. Според [13], терминологията е фрагментирана, а таксономичният подход не е унифициран, което затруднява разработването на стандартизирани и съпоставими системи. В [40] се предлага цифровият двойник на Земята да бъде дефиниран като „интероперабилен, мащабируем, разширяем и високо точен виртуален модел на земните системи“.

Качеството на данните се посочва като централен елемент във всички разгледани източници, анализирани в контекста на изграждането на цифров двойник. В [40] се отбелязва необходимостта от автоматизирана оценка на стойността на входните данни в реално време, същевременно в [39] се насочва вниманието към проследимост, валидиране и надеждност на източниците, изключително важни при вземане на решения в обществен интерес. В [2] се добавя необходимостта от инфраструктура за проверимост и прозрачност – включително чрез отворени данни и стандарти, които улесняват участието на различни заинтересовани страни и ефективната интеграция на цифрови платформи.

Порталът на GEOSS (<https://www.geoport.org>) поддържа достъп до глобални данни от различни сектори – правителствен, организации и частен сектор, in situ и атмосферни данни. Open Topography осигурява отворен достъп до топографски данни, интегриращ инструменти за визуализация и анализи. ECMWF адаптира IFS (Integrated Forecasting System) системата за създаване на атмосферния цифров двойник. В рамките на DestinE се интегрират входни данни в реално време, модели с висока резолюция, а за симулациите се използват EuroHPC суперкомпютри като LUMI и Leonardo [41].

Според Viswanath Nandigam [42] ключов аспект за успешното използване на възможностите на AI и ML в науките за Земята са предварително подготвените структурирани данни и тяхната съвместимост с алгоритмите в областта на изкуствения интелект. Реализацията му ще подпомогне преодоляването на сложни предизвикателства и осигуряването на прецизна и надеждна информация.

Съгласно [40] реализацията на концепцията за „всеобхватно възприятие“ (ubiquitous perception) зависи от използването на структурно стандартизирани формати и отворени интерфейси, при което DTE ще осъществява в реално време адекватно интегриране на информацията в платформи и съответно стратегическо вземане на решения. Една от ключовите цели на Destination Earth (DestinE) [21] е да осигури стандартизирани интерфейси за свързване на локализиращи и специализирани инструменти – включително такива, използвани от общини и местни власти. По този начин градове като Мюнхен, Цюрих и Хайделберг използват и прилагат цифрови двойници за управление на инфраструктура, околна среда и устойчиво развитие. По този начин се демонстрира практическият потенциал на политическите и технологичните подходи, когато са координирани чрез общи стандарти и съвместими интерфейси.

Основополагащи за изграждане, управление и функциониране на цифровите двойници на Земята са осигуряването на качеството и стандартизацията на данните, технологичната инфраструктура, която да гарантира оперативна съвместимост, прозрачност и равнопоставен достъп до информация, наличието на правни механизми и политики за защита на данни и поверителност.

3.3. Интеграция с наземни сензорни мрежи и системи за наблюдение

При изграждането на глобални и регионални модели на цифрови двойници, освен данните от спътниковите наблюдения, също така основна необходимост е и интегрирането на данни от различни видове сензори и системи за наблюдение. По този начин се допринася за валидиране, адаптация и опресняване на моделите. Наземните сензорни системи играят критична роля в екосистемата на цифровите двойници, осигурявайки точни, високочестотни и локализиращи измервания, които не могат да бъдат получени само чрез дистанционно наблюдение. Данните, получавани от спътникови наблюдения, се интегрират с in-situ измервания, напр. от метеорологични станции, IoT и сензорни мрежи, хидрологични сензори, сензори за налягане, замърсяване, шум и др., а също данни от GPS и GNSS приемници. Към тези данни също така могат да се добавят данни от дронове, социални и икономически бази данни. Необходими са достоверни наблюдения, чрез които да се извършва валидиране, адаптация и обновяване на информацията на моделите на цифровите двойници. В [21] се разглежда темата за интеграция със сензорни мрежи и системи за наблюдение в контекста на изграждането на цифров двойник на Земята, като ключов компонент за подкрепа на климатичните услуги. Интеграцията със сензорни мрежи не представлява единствено технически аспект, а е основна за мисията на DestinE – да се създаде оперативна връзка между физическия свят и въздействията върху обществото. Така цифровият двойник на Земята може да служи като инструмент за прогнозно моделиране, адаптация към климатични рискове и устойчиво планиране. Включването на смарт сензори, потоци от големи данни и комуникационни мрежи е от решаващо значение за тази визия. Според [43] наземните измервания са незаменими за калибриране и валидиране на спътниковите продукти, както и за допълване на липсващи данни – особено в региони с ограничено сателитно покритие или при параметри, които не могат да се наблюдават дистанционно, като почвена влага, химичен състав или биологични индикатори. Поради това се изисква интеграция между наземни станции, екологични обсерватории и глобални сензорни мрежи. Отбелязват се и някои предизвикателства, свързани с географското неравномерно разпределение на наземните съоръжения и ограничения капацитет в някои държави и региони, което изисква международна координация. Подобна перспектива предлага и [34], където, въпреки че основният фокус е поставен върху спътниковите данни, се признава необходимостта от комбиниране на

дистанционни и in-situ наблюдения. Наземните станции – включително метеорологични, геофизични и екологични – осигуряват верификация и допълнение при моделиране на параметри като влажност на почвата, биоразнообразие и състав на атмосферата. Внедряването на тези данни в изчислителни среди за “Big Earth Data” е условие за получаване на надеждни научни изводи и за създаване на ефективни цифрови двойници на околната среда. В [2] се акцентира върху ролята на IoT устройства, ГНСС станции и метеорологични сензори като основа за събиране на данни в реално време. Интеграцията между такива наземни системи и други източници позволява прецизни симулации и приложения в различни области – от управление на бедствия до градско планиране. Разгледани са и предизвикателства, свързани с инфраструктурна поддръжка и стандартизация на потоците от данни в глобален мащаб, като същевременно се подчертава значението на такива мрежи за изграждането на т.нар. „интелигентна Земя“. В [40] се разглеждат наземните сензори като основен компонент в концепцията за „всеобхватно възприятие“ и описва използването на метеорологични, биологични, геоложки и океанографски сензори. Те осигуряват основния слой (ниво събиране на сурови данни) от сензорната архитектура и се интегрират чрез IoT и безжични мрежи за поддържане на синхрон между реалния свят и цифровия модел. Тези данни се използват за калибриране на симулации, верификация на модели и откриване на аномалии в поведението на природните системи – ключови елементи за динамично управление на ресурсите и за устойчиво развитие. Наземните сензорни мрежи са в основата на анализа в [17], където се определят като решаващи за изграждането на цифрови двойници на природни среди. Те осигуряват измервания в реално време за параметри като температура, влажност, налягане, движение на почвата и химичен състав. Разглежда се необходимостта от надеждни и енергийно ефективни комуникационни мрежи за предаване на данните и се обсъждат предизвикателства като енергийна ефективност, устойчивост на атмосферни условия и капацитет за обработка.

3.4. Политики, управление и правна рамка

Изграждането на прецизен, оперативен и устойчив модел на планетата е обвързано с наличието на надеждна правна и политическа рамка, поддържана от инициативи като: GreenData4All, Open Data Directive и Digital Europe Programme. Тяхна цел е да се улесни преходът към цифрово и устойчиво управление на данните. Инициативата GreenData4All е предвидена за осъществяването на екологичната и цифровата трансформация на Европа чрез актуализиране на правилата на ЕС. Тя поставя основите за отворен достъп до геопространствени данни, стандартизация на метаданни и взаимосвързаност на цифрови екосистеми в ЕС, ключова за проекта DestinE. Европейската комисия стартира инициативата GreenData4All през 2021 г., като се поставя за цел да се актуализират: INSPIRE директивата (2007/2/EC) и Директивата за достъп до екологична информация (Directive 2003/4/EC) [44]. Директивата Open Data Directive (2019/1024) задължава институциите от публичния сектор да осигуряват свободен достъп до данни с висока обществена и икономическа стойност. Програмата Digital Europe Programme предоставя финансиране за разработки на цифрови инфраструктури, включително цифрови двойници на Земята (DTE) и платформата DestinE [45].

Управлението на DestinE се извършва от три основни структури, всяка от които изпълнява следните функции:

1. Digital Twin Earth отговаря за изграждането на отделни тематични цифрови модели като поддържа инфраструктурата за високопроизводителни изчисления и обработка на данни, включително интерактивни симулации „какво-ако“ (what-if).

Интерактивните функции на цифровия двойник е предвидено да осигуряват на потребителите персонализиран достъп до прогнозна информация [35].

2. Data Lake – управлява се от EUMETSAT, отговаря за съхранение и управление на инфраструктурата на спътникови и други видове данни. Data Lake свързва резултатите от DestinE с други външни източници [46]. Документацията и достъпът до платформата <https://platform.destine.eu/> са предоставени на [47].

3. Core Service Platform – платформа за основни услуги на DestinE, отговорна за достъпа и взаимодействието с цифровите двойници и техните данни, разработена от ЕКА.

Техническата и правната реализация на платформата DestinE изисква данните и продуктите да са системно поддържани, достъпни в реално време и да отговарят на международните стандарти за отворен достъп и прозрачност, като се прилагат FAIR принципите – Findability, Accessibility, Interoperability и Reuse. За ефективната интеграция на данните се изисква те да са достъпни чрез програмируеми интерфейси API, Open Data Hub или други стандартизирани методи за обмен на информация [45].

Инициативата DestinE, използва и разширява услугите на Copernicus, като предоставя данни, валидира модели и разширява приложението им в широк обхват от области на приложение. Включват се шест основни услуги, които са:

- мониторинг на атмосферата (CAMS, Copernicus Atmosphere Monitoring Service),
- мониторинг на морската среда (CMEMS, Copernicus Marine Environment Monitoring Service),
- мониторинг на земно покритие (CLMS, Copernicus Land Monitoring Service),
- климат (C3S – Copernicus Climate Change Service),
- управление при извънредни ситуации (CEMS, Copernicus Emergency Management Service),
- сигурност (CSS, Copernicus Security Service).

От съществуващите основни услуги на програмата Copernicus, напълно оперативни и интегрирани в DestinE са: CAMS, CMEMS, CEMS.

В исторически план тези услуги са реализирани чрез поредица от проекти, иницирани от Европейската комисия и реализирани от Седма рамкова програма на ЕС (FP7). Те са: MyOcean (океан), Geoland2 (земя), MACC и MACC II (атмосфера), SAFER (реагиране при извънредни ситуации) и G-MOSAIC (сигурност). ЕС иницира програмата CORINE през 1985 г., за да предостави описание на състоянието на околната среда в Европа. Тази програма е първата голяма инициатива за събиране на пространствени данни и от 1990 г. се извършват стандартизирани актуализации (2000, 2006, 2012 и 2018 г.) на земното покритие, свързани с екологичните политики и интегрирането на цифрови модели [3]. Програмата CORINE е с покритие ЕС и не поддържа потоци от данни в реално време, което е основно изискване на DestinE и DTE.

Анализ на ключовата роля на Earth Observation (EO) за измерване, мониторинг и реализиране на целите за устойчиво развитие на ООН е извършен от Anderson, K. et al. Глобални инициативи като GEO, GEOSS, GEOGLAM, GEOGLOWS и EO4SDG допринасят с отворени данни, международно сътрудничество и използване на Big Data [43].

Инициативи като Digital Earth Australia подкрепят основните принципи на Digital Earth, които са съответно систематизирани по следните показатели: отворени данни; използване на пространствени данни за постигане на целите за устойчиво развитие на ООН; визуализация за вземане на решения и достъп до технологии. Digital Earth

Australia допринася и за международното използване на Open Data Cube (ODC) чрез код, документация и обучения, като се използват спътникови данни с висока точност за регистриране на физически промени в средата. Необходимостта да се осигурява равнопоставен достъп и устойчиво управление, както и въпроси, свързани със собствеността върху данните, технологичната зависимост и етичната отговорност са разгледани в [2].

3.5. Източници на данни за цифровите двойници от спътникови и въздушни наблюдения

Цифровите двойници на Земята разчитат на потоци от данни с високо качество от разнообразни източници. Многомерното и адаптивно възприемане на сложните земни процеси може да се постигне чрез взаимосвързана система за наблюдение от спътниковите, въздушните и наземните платформи. Спътниковите и въздушните платформи са сред най-ключовите източници на данни за наблюдение на климатични, урбанистични и природни процеси [24, 48]. Изборът на подходящ тип данни зависи от обхвата на двойника – глобален, регионален или локален. Например, при изграждането на цифров двойник, свързан с адаптацията към климатичните промени, се използват разнообразни източници на данни, включително от земни метеорологични станции, сензори за наблюдение на морски и океански системи, спътникова информация, както и радарни, лидарни и статистически метеорологични данни.

Спътниковите сензори предоставят дългосрочни, последователни данни, както и данни с глобален обхват за осигуряване на разнообразни параметри в области като земеползване, атмосферен състав, биосфера и водни ресурси [43]. Програми като Copernicus и Landsat предлагат отворен достъп до хетерогенни данни, използвани за климатични симулации, проследяване на напредъка съответно за Целите за устойчиво развитие (ЦУР) и управление на ресурси [2, 34]. Концепцията Big Earth Data свързва големите обеми спътникова информация с високо-производителни изчисления (HPC), необходими за симулации в реално време. Това е фундаментално за инициативата на Европейската комисия за изграждане на цифрови двойници – DestinE, захранвани от спътникови и *in situ* данни [34]. В [2] се акцентира върху ролята на спътниковите наблюдения като фундаментален компонент на екосистемата Digital Earth, която е в основата на цифровото моделиране на Земята. Спътниковите данни, въпреки техния широк обхват и надеждност, са обвързани с ограничения по отношение на резолюцията и чувствителност към метеорологични условия, което е предпоставка за допълване чрез въздушни и наземни измервания. От друга страна новите спътникови мисии и тези, които се разработват, като SWOT, HydroGNSS, Meteosat-3, предоставят нови възможности, които ще подобрят наблюдението на почвена влага, валежи и речен отток в реално време [24]. Оценката на влиянието на отделните мисии се извършва чрез RSIF – Remote Sensing Impact Factor, базиран на метаанализ на данни от Web of Science [49].

Подценяван, но съществен компонент са въздушните платформи и въпреки че често се споменават бегло в литературата, въздушните наблюдения (дронове, самолетни мисии) осигуряват междинната връзка между спътниковите и наземни измервания. Концепцията “air-to-ground monitoring” подчертава тяхната роля в създаването на цялостен процес за събиране на данни. По отношение на изграждането на цифровия двойник на Земята въздушните наблюдения биха допринесли за повишаване на мащаба на получаваните данни [40]. Примери за ефективното им използване са проектът за мониторинг на градски топлинни острови в България, туристическият комплекс „Котва“ в Слънчев бряг (NUTS2 – BG34), при който са използвани изображения от БЛС с 1 m пространствена разделителна способност, като се използва хибридна система за верификация. Локализираните са топлинни аномалии, свързани със соларни инсталации и

асфалтови настилки, които задържат топлина дори през нощта. Тези данни допринасят с висока пространствена точност и локално ниво за анализ, което е от особено значение при симулации, ориентирани към урбанизирана среда [10]. Геодезическите методи за картографиране, мониторинг и планиране, включително използването на GNSS, LiDAR и фотограмметрия, са поставени в основата на всеки етап от създаването на цифров градски двойник [36]. Поставя се изискването за координация при интегриране на 3D данни и стандарти, като CityGML и BIM.

Предизвикателствата при избора на сензорни платформи за създаване на цифрови двойници, особено по отношение на осигуряване на баланс между пространствена, времева и спектрална резолюция, се разглеждат в [48]. Спътниковите изображения от мисии като Landsat и Sentinel, които въпреки че са с глобално покритие, имат ограничена пространствена резолюция, което затруднява точната идентификация на растителност в по-малки изследвани райони. От друга страна, безпилотните летателни апарати предоставят изображения с висока детайлност, но са неефективни за дългосрочни изследвания, тъй като изискват често повторно заснемане и обработка на големи обеми данни. Акцентира се върху необходимостта за по-нататъшно усъвършенстване на методите за събиране и моделиране на данни, за да се повиши точността и приложимостта на цифровите двойници в сферите на урбанизъм и екология.

4. Заключение

Успешното изграждане и прилагане на Цифровия двойник на Земята изисква координирани усилия и интеграция между научната общност, технологичните иновации и политическите структури. Ключовите аспекти при неговото изграждане и развитие са свързани със съвместимост, интегриране и управление на данни, сътрудничество на междусекторно и международно ниво, разширяване на обхвата на тематичните цифрови двойници. Някои други съществени фактори са осигуряване на ефективна регулаторна и правна рамка, изграждане на платформи с интуитивен потребителски интерфейс и взаимодействие в реално време и, не на последно място, интегриране на цифровите двойници в политиките за устойчиво развитие. Развитието на ресурси за обучение и повишаване на експертността в областта ще са предпоставка за ангажиране на гражданите в процесите по събиране и предоставяне на реални данни чрез ново поколение взаимосвързани сензори. Изискванията по отношение на изграждането на големи бази данни, подходящи за създаване на цифров двойник на Земята, са ясно дефинирани, а така също са формулирани и алгоритмите за тяхното създаване и използване. Основа за научен и приложен анализ е предложената класификационна схема и систематизация според степента на взаимодействие с реалната система, пространствен и времеви обхват, тематичен фокус и източници на данни. За изграждането на надеждни и динамични цифрови двойници е необходима по-пълноценна интеграция на данни от наземно, въздушно и космическо заснемане, особено в урбанизиран и труднодостъпни райони. Това ще допринесе за осигуряване на многомерно и адаптивно изследване на земни ресурси и процеси с различен пространствен и времеви обхват. Цифровият двойник на Земята днес не е научна фантастика, а необходим инструмент за бъдещо устойчиво развитие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gore, A. The Digital Earth: Understanding our planet in the 21st century. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1999, 65 (5).

2. Guo, H. et al. Manual of Digital Earth. 2019, ISBN 978-981-32-9914-6.
3. Enders, M., Hofsbach, N. Dimensions of Digital Twin Applications – A Literature Review. // Proceedings of the Twenty-fifth Americas Conference on Information Systems (AMCIS), 2019.
4. Sohaila, A. et al. Beyond Data, Towards Sustainability: A Sydney Case Study on Urban Digital Twins. // Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 2025.
5. Diaz-Sarachaga, J. May urban digital twins spur the New Urban Agenda? The Spanish case study. // Sustainable Cities and Society, 2024, 114 (105788).
6. Barresi, A. Urban Digital Twin e pianificazione urbana per la città sostenibile. // Journal of Technology for Architecture & Environment, 2023, 25: 78 – 83.
7. <https://gradat.bg/content/institut-gate-szdava-cifrov-dvoynik-na-sofiya>, poseten na 03.07.2025.
8. Michalec, O. Models vs infrastructures? On the role of digital twins' hype in anticipating the governance of the UK energy industry. // Environmental Science and Policy, 2025, 168 (104041).
9. Durden, J. Environmental management using a digital twin. // Environmental Science and Policy, 2025, 164 (104018).
10. Spasova, T. Assessment of Heat Islands in different economic regions of Bulgaria for the needs of Digital Twins. // Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments VIII, 2023, 1273500.
11. Feroz, A. et al. Debris-covered glaciers mapping based on machine learning and multi-source satellite images over Eastern Pamir. // Big Earth Data, 2025, 9 (2).
12. Corrado, C. et al. Combining Green Metrics and Digital Twins for Sustainability Planning and Governance of Smart Buildings and Cities. // Sustainability, 2022, 14 (12988).
13. Abdelrahman, M. et al. What is a Digital Twin anyway? Deriving the definition for the built environment from over 15,000 scientific publications. // Building and Environment, 2025, 274 (112748).
14. Iranshahi, K. et al. Digital twins: Recent advances and future directions in engineering fields. // Intelligent Systems with Applications, 2025, 26 (200516).
15. Semeraro, C. et al. Harnessing the future: Exploring digital twin applications and implications in renewable energy. // Energy Nexus, 2025, 18 (100415).
16. Monteiro, J., Barata, J. Digital twin-enabled regional food supply chain: A review and research agenda. // Journal of Industrial Information Integration, 2025, 45 (100851).
17. Maimour, M. et al. Survey on digital twins for natural environments: A communication network perspective. // Internet of Things, 2024, 25 (101070).
18. Wu, X. Remote Sensing Technology in the Construction of Digital Twin Basins: Applications and Prospects. // Water, 2023, 15 (2040).
19. Wardle, J., Phillips, Z. Examining Spatiotemporal Photosynthetic Vegetation Trends in Djibouti Using Fractional Cover Metrics in the Digital Africa Open Data Cube. // Remote Sensing, 2024, 16 (1241).
20. Masoumi, H. et al. City Digital Twins: their maturity level and differentiation from 3D city models, // Big Earth Data, 2023, 7 (1): 1 – 36.
21. Hoffmann, J. et al. Destination Earth – A digital twin in support of climate services. // Climate Services, 2023, 30 (100394).
22. https://destine.ecmwf.int/wp-content/uploads/2024/08/DE_370b_M5-3-1_202402_User-Perspectives_report_v2.1public.pdf, poseten na 11.07.2025.
23. <https://digitalearthafrika.org/wp-content/uploads/DE-Annual-Report-2024-English.pdf/>, poseten na 28.06.2025.

24. Brocca, L. et al. A Digital Twin of the terrestrial water cycle: a glimpse into the future through high-resolution Earth observations. // *Frontiers Science*, 2024, 1 (1190191).
25. Pasupuleti, M. Preserving Cultural Heritage with Digital Twin Technology. // *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations*, 2025, 5 (3).
26. Pasupuleti, M. Digital Twin Technology: Transforming Cultural Heritage Preservation. // *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations*, 2025, 5 (3).
27. Gupta, P. Earth Biogenome Project: present status and future plans. // *Trends in Genetics*, 2022, 38 (8).
28. Olabiyi, W. et al. Transforming Crisis Response: How Digital Twins and Machine Learning Are Reshaping Media Communication in Global Emergencies. 2025.
29. Zhong, C. et al. Reduced-order digital twin and latent data assimilation for global wildfire prediction. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2023, 23: 1755 – 1768.
30. Mangeon, S. et al. INFERNO: a fire and emissions scheme for the Met Office's Unified Model. // *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 2016, 9, 2685 – 2700.
31. Liu, W. et al. Digital Twin of Space Environment: Development, Challenges, Applications, and Future Outlook. // *Remote Sens.*, 2024, 16.
32. <https://blog.neterra.cloud/bg/kakvo-e-govemi-danni-big-data/>, poseten na 02.07.2025.
33. Bauer, P. et al. The digital revolution of Earth-system science. // *Nature computational science*, 2021, 1, 104 – 113.
34. Guo, H. et al. Big Earth Data from space: a new engine for Earth science. // *Science Bulletin*, 2016, 61 (7), 505 – 513.
35. https://stories.ecmwf.int/explainer-digitaltwins/index.html?utm_source, poseten na 03.07.2025.
36. Todorova, A. Sazdavane na digitalni dvojnici na gradove, bazirani na suvremenni inovativni geoprostranstveni tehnologiji. // *Geodesiya, kartografija, zemeustroystvo*, 2025, 1 – 2.
37. <https://www.rhysearch.ch/en/news/publications/whitepaper/digitale-zwillinge-classification-and-examples.html>, poseten na 08.07.2025.
38. Tao, F. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. // *Engineering*, 2019, 5 (4), 653 – 661.
39. Hinsby, K. et al. Mapping and understanding Earth: Open access to digital geoscience data and knowledge supports societal needs and UN sustainable development goals. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 130 (103835).
40. Wang, Y. et al. Digital twin of earth: A novel information framework for managing a sustainable earth. // *The Innovation Geoscience*, 2024, 2 (4): 100092.
41. Geenen, T. et al. Digital twins, the journey of an operational weather system into the heart of Destination Earth. // *Procedia Computer Science*, 2024, 240, 99 – 108.
42. https://www.sdsc.edu/news/2024/PR20240829_opentopography.html, poseten na 08.07.2025.
43. Anderson, K. et al. Earth observation in service of the 2030 Agenda for Sustainable Development. // *Geo-spatial Information Science*, 2017, 20 (2), 77 – 96.
44. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13170-GreenData4All-updated-rules-on-geospatial-environmental-data-and-access-to-environmental-information_en/, poseten na 02.07.2025.
45. <https://www.go-fair.org/fair-principles/>, poseten na 03.07.2025.
46. <https://destine.ecmwf.int>, poseten na 03.07.2025.
47. <https://destine-data-lake-docs.data.destination-earth.eu/en/latest/index.html>, poseten na 10.07.2025.
48. Zhao, D. et al. Applying Digital Twins to Research the Relationship Between Urban Expansion and Vegetation Coverage: A Case Study of Natural Preserve. // *Front. Plant Sci.*, 2022, 13 (840471).

A DIGITAL TWIN OF THE EARTH: MISSION POSSIBLE

N. Aleksandrova¹, T. Slavova²

Keywords: *Digital Twins of the Earth, IoT, AI, geospatial technologies, sustainable development*

ABSTRACT

The vision for virtual representation of the planet Earth through a highly accurate, detailed, and interactive model is a very real realization of the concept of a “digital twin of the Earth” (DTE). The purpose of creating this digital model is to better understand and manage the complex global ecosystem, which in turn implies a future shift towards more sustainable future. The potential for building a DTE is a result of advances in geospatial technologies, which enable the processing of huge amounts of data and using complex algorithms for analysis and visualization.

Various initiatives and projects related to the creation of this digital twin are currently being developed and implemented. Its full implementation requires going through many different stages, as this goal represents a diverse multifaceted process. This paper analyzes current projects, work programs, possible applications, and perspectives for future development of the digital twin of the Earth, which allows the formulation of basic requirements regarding the structure of the database, the volume of information and the types of data stored, determined by algorithms used for processing, as well as the characteristics of the data.

¹ Nataliya Aleksandrova, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Surveying and Geodesy”, UMG, Sofia 1700, e-mail: nataliya.aleksandrova@mgu.bg

² Tanya Slavova, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Surveying and Geodesy”, UMG, Sofia 1700, e-mail: tanya.slavova@mgu.bg