

УДК 630*228+528.9:528.8

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-98-105

Разработка концепции создания объектов древесной растительности для цифрового двойника местности с использованием геопространственных знаний и данных дистанционного зондирования

А. О. Лебзак¹✉, Е. В. Лебзак¹, В. П. Ступин²

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

e-mail: a.o.lebzak@mail.ru

Аннотация. Перспективное направление развития геоинформационных технологий – создание цифровых двойников местности (ДТТ), которые находят свое применение в самых различных сферах. Цель исследования заключается в разработке концепции создания объектов древесной растительности для цифрового двойника местности с использованием геопространственных знаний и данных дистанционного зондирования. В статье изучен опыт разработки и применения цифровых двойников, в том числе в сфере лесного хозяйства, выявлены единые принципы создания цифровых двойников. В ходе исследования сделан вывод о том, что особый интерес технология цифровых двойников представляет для лесного хозяйства из-за возможности воссоздания в виртуальном пространстве полного жизненного цикла объектов. Лесные массивы, являясь сложно организованной системой, существуют под влиянием множества факторов, как негативно, так и позитивно воздействующих на их существование и рост. Эти факторы оказывают влияние в разной степени, поэтому решение вопроса о влиянии каждого из них требует привлечения экспертов в области ботаники и лесоводства. Определить степень воздействия каждого из факторов оптимально при помощи метода экспертных оценок. Функционирующий цифровой двойник способен формировать геопространственные знания о местности и наполнять базу геопространственных знаний, аналитические данные, полученные при помощи цифрового двойника, могут оптимизировать процессы, связанные с охраной, восстановлением и управлением лесами.

Ключевые слова: цифровые двойники местности, геопространственные знания, лесное хозяйство

Для цитирования:

Лебзак А. О., Лебзак Е. В., Ступин В. П. Разработка концепции создания объектов древесной растительности для цифрового двойника местности с использованием геопространственных знаний и данных дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 6. – С. 98–105. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-98-105

Введение

Развитие геоинформационных технологий в настоящее время направлено на максимальную наглядность, информативность и подробность создаваемой продукции, а также расширение сфер ее применения. Одним из наиболее перспективных направлений явля-

ется создание цифровых двойников местности, которые представляют собой цифровые объекты, служащие аналогами физических объектов [1, 2]. Цифровые двойники местности (ДТТ) могут быть использованы в самых различных сферах [3]. Так, например, они нашли активное применение в процессе формирования умных городов, в строительстве,

сельском хозяйстве и т. д. [2, 3]. Востребованность цифровых двойников местности можно объяснить тем, что они не только точно и подробно отображают территорию, но и позволяют моделировать и прогнозировать различные ситуации, возникающие под влиянием самых различных факторов. Именно эти возможности цифровых двойников представляют особый интерес для лесного хозяйства, так как они могут значительно упростить такие процессы, как расчет запасов древесины и его долгосрочное прогнозирование, определение необходимых лесохозяйственных мероприятий, выявление незаконных рубок и т. п. [4].

Разработка, создание и внедрение полноценно функционирующего цифрового двойника местности – достаточно сложный, затратный и длительный процесс [2, 3], требующий привлечения специалистов из различных областей, в том числе и узких, экспертные знания которых будут необходимы при определении факторов и их влияния на динамические процессы, происходящие с объектами местности, для создания описывающих их алгоритмов [4, 5].

Кроме того, для каждого из объектов необходимо разработать алгоритмы для некоего множества различных процессов, поэтому требуется разработка общих теоретических основ формирования прогнозных данных для объектов цифровых двойников местности.

Цель исследования заключается в разработке концепции создания объектов древесной растительности для цифрового двойника местности с использованием геопространственных знаний и данных дистанционного зондирования.

Достижение цели потребовало решения ряда задач, состоящих в определении источников, необходимых для создания цифровых двойников местности, изучении имеющегося опыта разработки и применения цифровых двойников, в том числе в сфере лесного хозяйства, выявлении общих принципов создания цифровых двойников, определении основных факторов, влияющих на процессы роста деревьев и изменение запасов древесины, а также способа учета воздействия этих факторов в алгоритме прогнозирования.

Методы и материалы

В исследовании применялись методы сравнения, сопоставления, теоретического анализа, методы экспертных оценок, формализации и моделирования. Была изучена отечественная и зарубежная литература, касающаяся современных разработок в сфере создания и использования цифровых двойников местности, а также геопространственных знаний.

Основой для создания любого цифрового двойника местности служат данные дистанционного зондирования, полевых исследований, а также разнообразные датчики, служащие для сбора данных и т. п. [6, 7]. При этом, очевидно, что для разных видов объектов местности эти источники могут быть различными.

Для создания цифрового двойника местности требуются также экспертные знания о территории, что делает его объектом, однако функционирующий цифровой двойник способен на основе анализа формировать новые знания, что делает его субъектом. Таким образом, можно выдвинуть гипотезу о том, что цифровой двойник местности является одновременно и объектом, и субъектом геопространственных знаний.

Рассмотрим отечественный и зарубежный опыт создания и использования цифровых двойников местности в различных сферах.

Европейский мобильный оператор Vodafone разработал на базе программного обеспечения Esri ArcGIS цифровой двойник территории Великобритании, охватывающий порядка 245 тысяч км² и включающий более 40 миллионов объектов местности. Он предназначен для моделирования распространения сигнала от вышек связи, что позволяет контролировать зоны и качество покрытия сигналом, а также планировать мероприятия по техническому обслуживанию оборудования, его обновлению и расширению зон покрытия. Цифровой двойник имеет два режима отображения пространственных объектов – фотореалистичная цифровая модель (рис. 1) и режим цифрового двойника (рис. 2), используемый для визуализации распространения сигнала [8].



Рис. 1. Фотореалистичная цифровая модель Лондона Vodafone

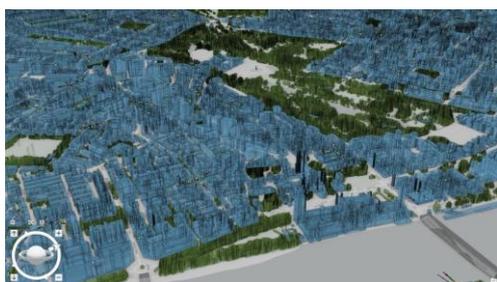


Рис. 2. Изображение пространственных объектов Лондона в режим цифрового двойника Vodafone

В сфере лесного хозяйства цифровые двойники также разрабатываются и используются. Так, во Франции был создан цифровой двойник, предназначенный для инвентаризации лесов, позволяющий в считанные часы нанести на карту более 300 га древостоя [9].

Китайскими учеными разработан цифровой двойник (рис. 3), предназначенный для создания прогнозных изображений данных дистанционного зондирования лесного хозяйства с использованием ретроспективных данных Landsat 7 [10].

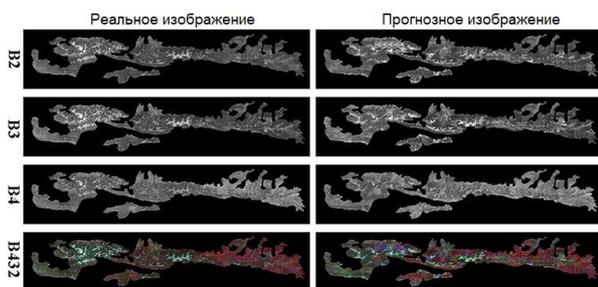


Рис. 3. Прогнозные космические снимки объектов лесного хозяйства, созданные цифровым двойником с использованием ретроспективных данных Landsat 7

Кроме того, командой ученых из Западной Европы в 2022 г. были опубликованы разработки, касающиеся создания цифровых двойников всех деревьев, находящихся как на землях лесного фонда, так и за их пределами, на национальном уровне с помощью нейросетей. Глубокое обучение (deep learning) позволило определить и визуализировать местоположение, площадь кроны и высоту для каждого отдельного дерева по аэрофотоснимкам на территории всей Дании (рис. 4) [11].

Изучив опыт создания цифровых двойников местности [8, 9–11], был сделан вывод о том, что несмотря на то, что все они создавались на разные территории и для различных целей, основные принципы их разработки практически идентичны:

- сбор геопространственных данных;
- 3D-визуализация геопространственных данных;
- интеграция в модель различных дополнительных данных, в том числе поступающих в режиме реального времени;
- настройка параметров воздействия на физические процессы цифрового двойника;
- внедрение искусственного интеллекта.



Рис. 4. Кроны деревьев, окрашенные в соответствии с их прогнозной высотой

Из анализа существующих цифровых двойников было выявлено, что они отражают полный жизненный цикл объектов, воссоздавая его в виртуальном пространстве, что особенно важно для лесного хозяйства [12]. Моделирование жизненного цикла лесонасаждений позволит прогнозировать запасы древесины и потенциальную прибыль на годы вперед, при этом аналитические данные, полученные на основе анализа цифрового двойника, могут оптимизировать процессы, связанные с охраной, восстановлением и управлением лесами.

Лесные массивы, являясь сложно организованной системой [4], существует под воздействием множества факторов, как негативно, так и позитивно влияющих на его рост. Причем эти факторы могут быть как постоянными (физико-географические и климатические условия), так и периодическими (засухи, наводнения, химическое загрязнение и т. п.). Все факторы, как негативные, так и позитивные, как постоянные, так и периодические, можно разделить на природные и антропогенные. На процессы роста деревьев все они оказывают влияние в разной степени, поэтому для решения вопроса о влиянии каждого из них необходимо привлечение экспертов в области ботаники и лесоводства. Определить степень воздействия каждого из факторов оптимально при помощи метода экспертных оценок [4, 5, 13].

Результаты

В ходе исследования была разработана концепция создания объектов древесной растительности для цифрового двойника местности.

Первый этап заключается в применении данных дистанционного зондирования для определения пространственного положения каждого отдельного дерева (рис. 5), его породы и отдельных таксационных характеристик (рис. 6). Полная автоматизация процесса цифровизации деревьев в среде ГИС достигается путем постепенного перехода от ручного обучения к машинному и в дальнейшем к применению нейросети. Применение ручного обучения на начальных этапах работы оправдано накоплением базы дешифровочных признаков.

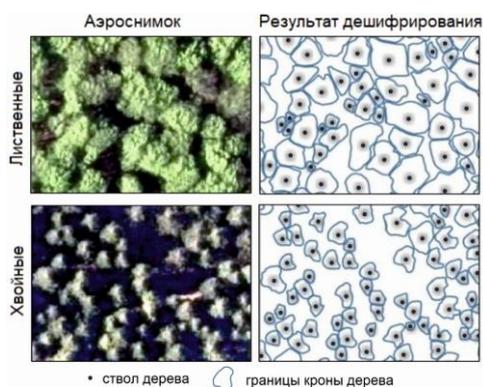


Рис. 5. Определение пространственного положения деревьев



Рис. 6. Определение высоты дерева по длине его тени

Второй этап состоит в построении трехмерной модели деревьев. На небольших территориях рекомендуется применение результатов лазерного сканирования – облака точек (рис. 7), позволяющего отобразить особенности каждого дерева. На больших площадях оптимально создание шаблонов каждой породы деревьев и их масштабирование в зависимости от таксационных характеристик деревьев.

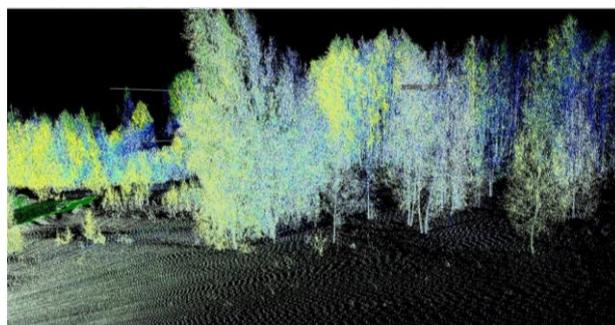


Рис. 7. Облако точек лесного массива

На третьем этапе разрабатывается алгоритм, имитирующий жизненный цикл деревьев. На основе экспертных знаний о приросте высоты и толщины деревьев данной породы на единицу времени, а также поправочного коэффициента внешних факторов, формируется алгоритм, позволяющий в цифровом двойнике моделировать запасы древесины при разных условиях на различные временные промежутки. Поправочный коэффициент вычисляется по итогам расчета степени воздействия каждого из факторов при по-

мощи метода экспертных оценок. Коэффициент определяется для каждой группы деревьев одной породы, расположенных в единых природных и климатических условиях, а также в равной степени подвергшихся антропогенному воздействию. Группировка деревьев выполняется при помощи инструментов пространственного анализа.

Четвертый этап – настройка автоматизированного мониторинга состояния объектов и внесения изменений в цифровой двойник путем анализ космических снимков, данных с датчиков и т. п., а также настройка пользовательского интерфейса для эффективного восприятия аналитики, формируемой цифровым двойником.

Помимо этого, для повышения эффективности функционирования цифрового двойника необходимо внедрение искусственного интеллекта, который позволит на основе аналитических и прогнозных данных, смоделированных цифровым двойником местности, формировать геопространственные знания и влиять на процессы лесопользования, лесовосстановления, лесоохраны и т. п.

Предложенная концепция представляет собой описание основных этапов работ по созданию объектов древесной растительности для цифрового двойника местности. Каждый из этапов включает в себя множество процессов, требующих разработки технологии.

Заключение

Цифровые двойники местности – одно из перспективнейших направлений в современной геоинформатике, которое в целом определяет вектор развития этого направления науки. Разработки цифровых двойников активно ведутся во многих странах мира, однако они в основном направлены на создание цифровых двойников умных городов, зданий

и производств. Наибольшего успеха в создании цифровых двойников леса добились китайские и европейские ученые, однако теоретическая и методическая база в настоящее время крайне мала.

В результате проведенного исследования была разработана концепция создания объектов древесной растительности для цифрового двойника местности, описывающая основные этапы и входящие в них процессы.

В ходе работ были определены источники, необходимые для создания цифровых двойников местности – данные дистанционного зондирования и данные от различных датчиков, в том числе передающих информацию в режиме реального времени. Изучен отечественный и зарубежный опыт разработки и применения цифровых двойников, в том числе в сфере лесного хозяйства, на основании которого выявлены общие принципы создания цифровых двойников.

Одной из основных ценностей цифровых двойников для лесного хозяйства является возможность моделирования полного жизненного цикла объектов, которая позволит прогнозировать запасы древесины на годы вперед, оптимизировать процессы, связанные с охраной, восстановлением и управлением лесами. Были определены основные факторы, влияющие на рост деревьев, и способ учета воздействия этих факторов при прогнозировании.

Основными направлениями дальнейших исследований в данной области является формирование алгоритма, позволяющего в цифровом двойнике моделировать запасы древесины при разных условиях на различные временные промежутки, а также разработка технологий автоматизации непрерывного обновления цифрового двойника местности, внедрение инструментов воздействия цифрового двойника на физические процессы и искусственного интеллекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпик А. П., Лисицкий Д. В. Исследование мировых трендов и обоснование направлений развития сферы геодезии и картографии РФ до 2030 года // Геопрофи. – 2021. – № 1. – С. 4–11.
2. Лисицкий Д. В., Осипов А. Г., Савиных В. Н. Цифровой двойник территории и методы геокогнитивного моделирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 8 т. (Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. Т. 1. – С. 206–212. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-206-212.

3. Цифровой двойник [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.esri.com/ru-ru/digital-twin/overview#%D1%8D%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F-%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F-the-nature-conservancy>.
4. Лебзак Е. В., Янкелевич С. С. Геопространственные знания в пространственном развитии территорий на примере лесохозяйственной отрасли // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 3. – С. 123–133. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-123-133.
5. Янкелевич С. С. Теоретико-методологические аспекты тематической картографии на основе геопространственных знаний // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2022. – Т. 66, № 4. – С. 51–58. – DOI 10.30533/0536-101X-2022-66-4-51-58.
6. Касатиков Н. Н., Брехов О.М., Желаннов С. А., Цибин А. В., Гомозов О. А., Кузьмин Г. В., Фадеева А. Д. Формирование цифровых двойников в урбанизированных территориях с использованием методов городских вычислений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : Материалы 19-й Международной конференции (15–19 ноября 2021 г.). – М. : ИКИ РАН, 2021. – С. 30. – DOI 10.21046/19DZZconf-2021a.
7. Feng H., Chen D., Lv H. Sensible and secure IoT communication for digital twins, cyber twins, web twins // Internet of Things and Cyber-Physical Systems. – 2021. – Vol. 1. – P. 34–44. – DOI 10.1016/j.iotcps.2021.12.003.
8. Мобильный оператор Vodafone создает цифровой двойник в масштабе страны с помощью ГИС-технологии Esri [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.esri-cis.com/ru-ru/newsroom/2023/2023-01-11-digital-twin-telecom-vodafone>.
9. Grignard L. The Benefits of Visual Intelligence Solutions in Agriculture and Forestry // GIM International. –2020.
10. Jiang X., Jiang M., Gou Y., Li Q., Zhou Q. Forestry Digital Twin With Machine Learning in Landsat 7 Data // Frontiers in Plant Science. – 2022. – No 13. – P. 916900. – DOI 10.3389/fpls.2022.916900.
11. Li S., Brandt M., Fensholt R., Kariryaa A., Igel Ch., Gieseke F., Nord-Larsen T., Oehmke S., Carlsen A., Junttila S., Tong X., d'Aspremont A., Ciais Ph. Digital twinning of all forest and non-forest trees at national level via deep learning // Nature Portfolio. – 2022. – DOI 10.21203/rs.3.rs-1661442/v1.
12. Kritzinger W., Karner M., Traar G. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 11, No 51. – P. 1016-1022. – DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
13. Янкелевич С. С. Современная концепция и методология картографирования // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 3. – С. 118–125. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-118-125.

Об авторах

Анастасия Олеговна Лебзак – кандидат технических наук, ассистент кафедры картографии и геоинформатики.

Евгений Викторович Лебзак – кандидат технических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики.

Владимир Павлович Ступин – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии.

Получено 31.10.2024

© А. О. Лебзак, Е. В. Лебзак, В. П. Ступин, 2024

Development of the concept of creating woody vegetation objects for a digital terrain twin using geospatial knowledge and RSD

A. O. Lebzak¹, E. V. Lebzak¹, V. P. Stupin²

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

e-mail: a.o.lebzak@mail.ru

Abstract. A promising direction for the development of geoinformation technologies is the creation of digital terrain twins (DTTs), which find application in various fields. A DTT is an exact digital copy created based on remote sensing data, data from various sensors, and geospatial knowledge. This digital copy can be used to predict and simulate different scenarios for the terrain, and it can influence physical objects that it represents. The purpose of this study is to develop a concept for creating woody vegetation features for DTT using geospatial data and remote sensing data. The article examines the experiences with the development and use of digital twins, including in forestry, and identifies general principles for creating digital twins. In the course of our research, we concluded that the technology of digital twin holds particular interest for forestry due to its ability to recreate the entire life cycle of objects in virtual space. Forests are complex systems influenced by numerous factors, which can either negatively or positively impact their existence and growth. These factors differ in their impact and require the expertise of botanists and foresters to solve the issue of their influence. It is best to determine the level of each factor's influence using the method of expert assessment. A functional digital twin can provide geospatial data about an area and serve as the basis for geospatial data collection. Analytical data collected through digital twins can optimize processes related to forest protection, restoration and management.

Keywords: geospatial digital twin, geospatial knowledge, forestry

REFERENCE

1. Karpik, A. P., & Lisickij, D. V. (2021). Research of global trends and justification of the directions of development of the sphere of geodesy and cartography of the Russian Federation until 2030. *Geoprofi [Geoprofi]*, 1, 4–11 [in Russian].
2. Lisickij, D. V., Osipov, A. G., & Savinyh, V. N. (2022). The digital twin of the territory and methods of geo-cognitive modeling. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir' : XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 8. Geodezija, geoinformatika, kartografija, markshejderija [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia: XVIII International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, geoinformatics, cartography, surveying]* (pp. 206–212). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
3. Digital twin. (n. d.). Retrieved from <https://www.esri.com/ru-ru/digital-twin/overview#%D1%8D%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F-%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8-%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F-the-nature-conservancy> (accessed October 23, 2024) [in Russian].
4. Lebzak, E. V., & Yankelevich, S. S. (2022). Geospatial knowledge in the spatial development of territories on the example of the forestry industry. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(27), 123–133 [in Russian].
5. Yankelevich, S. S. (2022). Theoretical and methodological aspects of thematic cartography based on geospatial knowledge. *Izv. vuzov. Geodezija i ajerofotos'emka [News of universities. Geodesy and aerial photography]*, 43(66), 51–58 [in Russian].
6. Kasatkov, N. N., Brehov, O.M., Zhelannov, S. A., Cibir, A. V., Gomozov, O. A., Kuz'min, G. V., & Fadeeva A. D. (2021). Formation of digital twins in urbanized territories using urban computing

methods. In *Materialy 19th Mezhdunarodnoi konferentsii: Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Proceedings of 19th International Conference: Modern problems of remote sensing of the Earth from space]* (pp. 30). Moscow: IKI RAS Publ. [in Russian].

7. Feng, H., Chen, D., & Lv, H. (2021). Sensible and secure IoT communication for digital twins, cyber twins, web twins. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 1. P. 34–44. DOI 10.1016/j.iotcps.2021.12.003.

8. Vodafone mobile operator creates a digital double on a national scale using Esri GIS technology. (n. d.). Retrieved from <https://www.esri-cis.com/ru-ru/newsroom/2023/2023-01-11-digital-twin-telecom-vodafone> (accessed October 17, 2024) [in Russian].

9. Grignard L. The Benefits of Visual Intelligence Solutions in Agriculture and Forestry // GIM International. –2020.

10. Jiang, X., Jiang, M., Gou, Y., Li, Q., & Zhou, Q. (2022). Forestry Digital Twin With Machine Learning in Landsat 7 Data. *Frontiers in Plant Science*, 13. P. 916900. DOI 10.3389/fpls.2022.916900.

11. Li, S., Brandt, M., Fensholt, R., Kariryaa, A., Igel, Ch., Gieseke, F., Nord-Larsen, T., Oehmke, S., Carlsen, A., Junttila, S., Tong, X., d'Aspremont, A., & Ciais, Ph. (2022). Digital twinning of all forest and non-forest trees at national level via deep learning. *Nature Portfolio*. DOI 10.21203/rs.3.rs-1661442/v1.

12. Kritzinger, W, Karner, M, & Traar, G. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11). P. 1016–1022. – DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

13. Yankelevich, S. S. (2024). Modern mapping concept and methodology. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(29), 118–125 [in Russian].

Author details

Anastasiya O. Lebzak – Ph. D., Assistant, Department of Cartography and Geoinformatics.

Evgenii V. Lebzak – Ph. D., Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics.

Vladimir P. Stupin – D. Sc., Professor, Department of Surveying and Geodesy.

Received 31.10.2024

© A. O. Lebzak, E. V. Lebzak, V. P. Stupin, 2024