

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.94>

## СУЩНОСТЬ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МНОГОМЕРНОЙ КАРТОГРАФИИ

Научная статья

Бугаков П.Ю.<sup>1,\*</sup>, Кацко С.Ю.<sup>2</sup>, Бугакова Т.Ю.<sup>3</sup>, Головачев Н.С.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-7386-5484;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-4368-097X;<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-7365-9349;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (peter-bugakov[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Развитие аппаратных и программных средств способствовало появлению трехмерной картографии. В настоящее время появилась возможность создания и использования четырехмерных и даже много мерных карт. Однако расширение мерности картографических произведений привело к необходимости более детального рассмотрения их сущности, описания характеристик и разработки новых методик их создания и использования. В статье описываются особенности четырехмерных карт, обозначаются некоторые актуальные проблемы, связанные с временной генерализацией и дискретностью картографируемых процессов. Выявленные проблемы все еще требуют научного решения. Также в статье описывается сущность нового направления – многомерной картографии. Авторами приводится классификация картографических произведений по критерию мерности, кратко формулируются характерные особенности многомерных карт. Отдельное внимание уделяется современным тенденциям применения и развития многомерной картографии.

**Ключевые слова:** классификация картографических произведений, мерность картографических произведений, время, цифровые двойники.

## ESSENCE AND TENDENCIES OF MULTIDIMENSIONAL CARTOGRAPHY DEVELOPMENT

Research article

Bugakov P.Y.<sup>1,\*</sup>, Katsko S.Y.<sup>2</sup>, Bugakova T.Y.<sup>3</sup>, Golovachev N.S.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-7386-5484;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-4368-097X;<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-7365-9349;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

\* Corresponding author (peter-bugakov[at]yandex.ru)

**Abstract**

The development of hardware and software contributed to the emergence of three-dimensional cartography. Nowadays, it is possible to create and use four-dimensional and even multidimensional maps. However, the expansion of the dimensionality of cartographic works has led to the necessity of a more detailed consideration of their essence, description of their characteristics and development of new methods of their creation and use. The article describes the features of four-dimensional maps, identifies some actual problems related to temporal generalization and discreteness of mapped processes. The identified problems still require scientific solutions. The paper also describes the essence of a new direction – multidimensional cartography. The authors classify cartographic works according to the criterion of dimensionality, briefly formulate the characteristic features of multidimensional maps. Special attention is paid to modern tendencies in the application and development of multidimensional cartography.

**Keywords:** classification of cartographic works, dimensionality of cartographic works, time, digital doubles.

**Введение**

Развитие аппаратных и программных средств, применяемых в современной картографии и геоинформатике, позволило снять ограничение мерности карт тремя пространственными координатами. Отдельным измерением в системе координат карты может выступать время, когда требуется отобразить динамику человеческой активности, изменения уровня загрязнения атмосферы или любых других показателей, критических для выбранной тематики создаваемого картографического произведения. Однако в научных работах (например, в [7], [11]) все чаще рассматривается возможность включения в четырехмерную ХУНТ систему координат некоторых количественных характеристик картографируемых объектов (например, уровня детализации) или самой карты (масштаба). Увеличение количества координат приводит к выделению нового вида карт – многомерной карты (5D, 6D и т.д.). Рассмотрение многомерных карт как нового вида картографических произведений приводит к появлению неоднозначностей существующей классификации. Так, например, многомерная карта, в набор измерений которой входит количественная характеристика, относящаяся непосредственно к картографируемому объекту, может быть определена как тематическая карта с меньшей размерностью. В то же время тематической карте может быть дано определение многомерной карты. В связи с этим расширение четырехмерной ХУНТ системы координат картографических произведений за счет введения новых количественных характеристик требует проведения научных исследований и теоретического обоснования.

### Четырехмерные картографические произведения

В настоящее время одним из критериев при классификации картографических произведений выступает количество измерений, при этом выделяют 5 видов карт: 2D, 2.5D, 3D, 3.5D и 4D [4], [6], [10], [12]. До недавнего времени мерность карты определялась только системой пространственных координат (плоской – XY или трехмерной – XYZ). В последнее время мерность картографических произведений дополняется четвертой координатой – временем [1], [7], [9], [12]. Такая четырехмерная система координат (обозначим ее «XYZT») учитывает нейрофизиологические и когнитивные особенности человеческого восприятия пространственной информации и динамики окружающего мира.

Четырехмерное картографирование объединяет в себе методы и технологии представления геопространственных данных с учетом временных параметров. Для построения четырехмерных карт может использоваться ряд теоретических подходов и методов.

1. Геометрические методы – предполагают создание трехмерных графических моделей объектов на основе сбора геопространственных данных и их последующую визуализацию в четвертом измерении – времени. Основные геометрические методы четырехмерной картографии включают в себя многомерные отображения, пространственное моделирование, анимационную визуализацию и другие.

2. Статистические методы – позволяют обрабатывать геопространственные данные, полученные из различных источников, и обнаруживать скрытые взаимосвязи между объектами. Среди наиболее распространенных методов можно выделить факторный анализ, снижение размерности, классификацию данных и другие.

3. Кинематические методы – используются для анализа движения объектов в пространстве в течение определенного времени. Они позволяют визуализировать динамику различных процессов, происходящих в геоинформационной системе. Например, кинематические методы можно использовать для визуализации процесса изменения рельефа в течение нескольких лет.

4. Моделирование временных процессов – используется для прогнозирования изменений исследуемых параметров в будущем. Этот метод позволяет объединять исторические данные и данные о существующих изменениях для разработки модели для прогнозирования будущих изменений.

Методы четырехмерной картографии позволяют создавать интерактивные карты, которые могут не только отображать динамику изменений пространственных объектов во времени по заданному сценарию, но и предоставлять пользователю возможность управлять ей – запускать, останавливать, изменять скорость [2], [3]. Важно отметить, что ускорение процессов имеет ограничения и его использование должно быть проанализировано с учетом специфики данных и задачи исследования. Метод управления временной шкалой делает процесс наблюдения за изменениями гораздо более эффективным и может быть полезен для многих областей, включая географию, картографию, экологию, экономику и другие науки, которые занимаются изучением пространственно-временных данных. В частности, данный метод может быть использован для изучения изменений в рамках эпидемиологических моделей, для анализа распределения населения в течение времени, для визуализации изменений ландшафта и т.д.

Стоит отметить, что для четырехмерного картографирования становится актуальной проблема временной генерализации, которая заключается в обобщении динамики процессов. Вместе с этим поднимаются вопросы, связанные с временной дискретизацией процесса картографирования и визуализации объектов и явлений. Временная дискретность картографирования объектов, процессов и явлений определяется на основе анализа превышения порога количественных изменений за определенный период времени. При этом дискретность визуализации представляет собой возможность отображать разновременные геопространственные данные в условном масштабе времени. Совокупность этих двух аспектов можно назвать основным условием дискретности геопространственных данных: геопространственные данные являются дискретными в пространстве и времени как при их возникновении, так и при их использовании, причем величина дискрета должна зависеть от цели моделирования процессов и явлений. Пространственная дискретность определяется масштабом представления и точностью, временная дискретность определяется требованиями к достоверности и современности [5]. Разработка и внедрение методик и технологий временной генерализации позволит уменьшить информационную загруженность картографического произведения за счет выделения главных, наиболее устойчивых во времени объектов и явлений с помощью изменения скорости демонстрации [5].

### Сущность многомерной картографии

Комбинирование пространственных координат, времени и других количественных параметров, рассматриваемых в качестве отдельных измерений, приводит к появлению картографических произведений различной мерности, что дает возможность выстроить классификацию, показанную в таблице 1.

Таблица 1 - Классификация картографических произведений по критерию мерности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.94.1>

Вид карты	Мерность карты	Состав системы измерений			
		Плановые координаты	Высотная координата	Время	Другие колич. параметры
Двухмерные статические	2D	+	-	-	-

Вид карты	Мерность карты	Состав системы измерений			
Псевдотрехмерные	2.5D	+	Визуальная имитация	-	-
Двухмерные динамические	3D	+	-	+	-
Псевдотрехмерные динамические	3.5D	+	Визуальная имитация	+	-
Трехмерные статические	3D	+	+	-	-
Четырехмерные	4D	+	+	+	-
Многомерные	nD	+	+	+	Один или несколько параметров

Исходя из приведенной классификации и с учетом базовых определений картографии, многомерные карты могут быть определены как особый вид картографических произведений, наглядно представляющий картографируемую территорию в объёмном виде в рамках определенного временного отрезка и интервале значений каждой количественной характеристики, выбранной в качестве дополнительного измерения. Тогда многомерную картографию можно определить как раздел цифровой картографии, охватывающий теорию и практику создания и использования многомерных карт. Под многомерным картографированием будем понимать технологический процесс создания и использования многомерных карт.

#### Современные тенденции применения и развития многомерной картографии

В последние годы технологии трех- и четырехмерного моделирования стали рассматриваться в аспекте цифровых двойников, появление и бурное развитие которых обусловлено прогрессом в области технологий сбора и интеллектуальной обработки больших данных. Цифровой двойник в общем случае представляет собой систему, состоящую из цифровой модели объекта (или процесса), а также двусторонних информационных связей с ним. Под цифровым двойником понимают цифровую копию геопространства, которая с определенной точностью воспроизводит его внешний вид, повторяет внутреннее устройство и принципы функционирования. При этом отметим, что сходство цифрового двойника с оригиналом во многом реализуется средствами трех- и четырехмерного геоинформационного картографирования.

Технология цифровых двойников обладает значительным потенциалом для поддержки широкого спектра национальных проектов как в России, так и в других странах. Наиболее важные задачи, решаемые с использованием цифровых двойников, представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Задачи, решаемые с использованием цифровых двойников

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.94.2>

Решаемая задача	Пример применения цифровых двойников
Управление городом	Моделирование различных сценариев городского развития, мониторинг и оптимизация производительности существующих городских систем, таких как сети энерго- и водоснабжения.
Развитие инфраструктуры	1) Планирование, проектирование и строительство новых инфраструктурных объектов (мосты, дороги и аэропорты), а также выявление потенциальных проблем еще до начала строительства. 2) Мониторинг и обслуживание существующей инфраструктуры, например, выявление структурных дефектов или прогнозирование отказов оборудования.
Мобильность и цепочка поставок	Повышение производительности транспортных систем путем оптимизации логистических цепочек.
Защита и безопасность	Моделирование и анализ военных операций, а также прогнозирование отказов оборудования или выявления уязвимостей в сетях связи

Решаемая задача	Пример применения цифровых двойников
Управление в чрезвычайных ситуациях	Моделирование сценариев чрезвычайных ситуаций с целью обеспечения эффективного реагирования и реализации плана эвакуации населения в случае возникновения реальной угрозы.

Один из примеров использования цифрового двойника можно наблюдать в Великобритании. В телекоммуникационной компании Vodafone с использованием современных ГИС технологий был создан цифровой двойник геопространства на территорию 245 тыс. квадратных километров [8]. Он содержит различные уровни иммерсивной трехмерной детализации, что дает возможность визуализировать невидимые радиосигналы сотовой связи.

Цифровой двойник Vodafone позволяет моделировать распространение сигнала по зонам покрытия, обеспечивает информационную поддержку при обслуживании и модернизации сети с целью увеличения зоны покрытия. Цифровой двойник позволяет компании оставаться в курсе планов по строительству новых и модернизации существующих объектов городской инфраструктуры. Это помогает обеспечить высокий уровень сигнала Vodafone везде, где растет спрос.

Цифровой двойник стал инструментом планирования. Имея подробную информацию о топографии, вышках сотовой связи и оборудовании на каждой вышке, инженеры могут выполнять предварительное планирование работ на отдельных вышках или целых участках сети. Они могут оценить, как новая вышка может заполнить пробел в покрытии, или смоделировать, как добавление или удаление компонента сети может повлиять на уровень сигнала. Приведенные примеры подтверждают научную и практическую значимость многомерной картографии для динамичного, наглядного описания объективной реальности с различных точек зрения, а также для виртуализации, воспроизведения, исследования и прогнозирования геофеноменов.

### Заключение

Для развития многомерной картографии и реализации новых видов многомерных картографических произведений требуется выполнить комплекс научных исследований, направленных на разработку методологических основ их составления и использования. В первую очередь необходимо провести следующие научные изыскания:

- уточнить сущность многомерной картографии в целом и многомерных карт в частности, определить их место в общей классификации картографических произведений;
- разработать концепцию и сформулировать основные принципы картографической визуализации динамических многомерных моделей местности, которые позволят обеспечить соблюдение общих требований, предъявляемым к картографическим произведениям;
- исследовать параметры многомерного картографирования и определить их влияние на характеристики получаемых картографических произведений;
- сформулировать систему критериев оценки качества и эксплуатационных характеристик многомерных картографических произведений;
- раскрыть особенности, выявить достоинства и недостатки многомерных картографических произведений, сформулировать рекомендации для повышения эффективности их использования при решении задач картографии;
- решить проблему интеграции характеристик, используемых в настоящее время двух- и трехмерных карт, и новых характеристик, отражающих многомерность и динамику.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Колесников А.А. Методические основы создания картографических анимаций с применением современных технологий геоинформационного картографирования / А.А. Колесников // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Международные научный конгресс: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. — Новосибирск : СГГА, 2012. — Т. 2. — С. 89–92.
2. Лисицкий Д.В. Методика подготовки картографических материалов для использования в мультимедийных приложениях, ориентированных на отображение динамики исторических событий / Д.В. Лисицкий, М.Н. Колоткин, Е.В. Комиссарова [и др.] // ГЕО-Сибирь-2011. VII Международный научный конгресс : сб. материалов в 6 т. — Новосибирск: СГГА, 2011. — Т. 1, ч. 1. — С. 37–40.
3. Лисицкий Д.В. Мультимедийное направление в картографии / Д.В. Лисицкий, А.А. Колесников, Е.В. Комиссарова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2014. — № 3. — С. 41–46. — EDN SGXCVT.

4. Aouad G. Special issue on 'From 3D to nD modelling' / G. Aouad, S. Lee, S. Wu // *Journal of Information Technology in Construction*. — 2005. — Vol. 10. — 15 p.
5. Hájek P. Principles of cartographic design for 3D maps — focused on urban areas / P. Hájek, K. Jedlička, V. Čada // *Proceedings of 6th International Conference on Cartography and GIS*. — Albena, 2016. — P. 297–307.
6. Liang J. Generating orthorectified multi-perspective 2.5 maps to facilitate Web GIS-based visualization and exploitation of massive 3D city models / J. Liang, J. Gong, J. Liu [et al.] // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. — 2016. — Vol. 5, Iss. 11. — 212 p. — DOI: 10.3390/ijgi5110212.
7. Van Oosterom P. Stoter 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions / Peter van Oosterom, E. Jantien // *GIScience*. — 2010. — P. 310–324.
8. Piper M. Vodafone Creates Country-Scale Digital Twins to Engineer Better Networks / M. Piper, P. Ryan. — URL: <https://clck.ru/3FGBbE> (accessed: 12.09.2023).
9. Resch B. Towards 4D Cartography — Four-dimensional dynamic maps for understanding spatio-temporal correlations in lightning events / B. Resch, F. Hillen, A. Reimer [et al.] // *The Cartographic Journal*. — 2013. — Vol. 50. — № 3. — P. 266–275. — DOI: 10.1179/1743277413Y.0000000062.
10. Turner K. What's the difference among 2d, 2.5d, 3d and 4d? / K. Turner // *Applied Geoscience forum, GIS World Article*. — 1997. — Vol. 29.
11. Van Oosterom P. Principles of 5D modeling, full integration of 3D space, time and scale / P. Van Oosterom, J. Stoler // *Geospatial World Forum*. — Amsterdam, 2012.
12. Yano K. Virtual Kyoto as 4D GIS / K. Yano, T. Nakaya, Y. Isoda [et al.] // *Virtual Geographic Environment*. — Beijing, Science Press, 2009. — P. 69–86.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kolesnikov A.A. Metodicheskie osnovy sozdaniya kartograficheskikh animacij s primeneniem sovremennykh tehnologij geoinformacionnogo kartografirovaniya [Methodological Foundations for Creating Cartographic Animations Using Modern Geoinformation Mapping Technologies] / A.A. Kolesnikov // *Interjekspo GEO-Sibir'-2012. VIII Mezhdunarodnye nauchnyj kongress: Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija "Geodezija, geoinformatika, kartografija, markshejderija"* [Interexpo GEO-Siberia-2012. VIII International Scientific Congress: International Scientific Conference "Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying"] : Collection of Materials in 3 Volumes]. — Novosibirsk: SGGA, 2012. — Vol. 2. — P. 89–92. [in Russian]
2. Lisitskiy D.V. Metodika podgotovki kartograficheskikh materialov dlja ispol'zovaniya v mul'timedijnykh prilozhenijah, orientirovannykh na otobrazhenie dinamiki istoricheskikh sobytij [Methodology for Preparing Cartographic Materials for Use in Multimedia Applications Aimed at Displaying the Dynamics of Historical Events] / D.V. Lisitskiy, M.N. Kolotkin, E.V. Komissarova [et al.] // *GEO-Sibir'-2011. VII Mezhdunarodnye nauchnyj kongress [GEO-Siberia-2011. VII International Scientific Congress]* : Collection of Materials in 6 Volumes. — Novosibirsk: SGGA, 2011. — Vol. 1, part 1. — P. 37–40. [in Russian]
3. Lisitskiy D.V. Mul'timedijnoe napravlenie v kartografii [Multimedia Direction in Cartography] / D.V. Lisitskiy, A.A. Kolesnikov, E.V. Komissarova [et al.] // *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Geodezija i ajerofotos'emka* [Bulletin of Higher Education Institutions. Geodesy and Aerial Photography]. — 2014. — № 3. — P. 41–46. — EDN SGXCVT. [in Russian]
4. Aouad G. Special issue on 'From 3D to nD modelling' / G. Aouad, S. Lee, S. Wu // *Journal of Information Technology in Construction*. — 2005. — Vol. 10. — 15 p.
5. Hájek P. Principles of cartographic design for 3D maps — focused on urban areas / P. Hájek, K. Jedlička, V. Čada // *Proceedings of 6th International Conference on Cartography and GIS*. — Albena, 2016. — P. 297–307.
6. Liang J. Generating orthorectified multi-perspective 2.5 maps to facilitate Web GIS-based visualization and exploitation of massive 3D city models / J. Liang, J. Gong, J. Liu [et al.] // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. — 2016. — Vol. 5, Iss. 11. — 212 p. — DOI: 10.3390/ijgi5110212.
7. Van Oosterom P. Stoter 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions / Peter van Oosterom, E. Jantien // *GIScience*. — 2010. — P. 310–324.
8. Piper M. Vodafone Creates Country-Scale Digital Twins to Engineer Better Networks / M. Piper, P. Ryan. — URL: <https://clck.ru/3FGBbE> (accessed: 12.09.2023).
9. Resch B. Towards 4D Cartography — Four-dimensional dynamic maps for understanding spatio-temporal correlations in lightning events / B. Resch, F. Hillen, A. Reimer [et al.] // *The Cartographic Journal*. — 2013. — Vol. 50. — № 3. — P. 266–275. — DOI: 10.1179/1743277413Y.0000000062.
10. Turner K. What's the difference among 2d, 2.5d, 3d and 4d? / K. Turner // *Applied Geoscience forum, GIS World Article*. — 1997. — Vol. 29.
11. Van Oosterom P. Principles of 5D modeling, full integration of 3D space, time and scale / P. Van Oosterom, J. Stoler // *Geospatial World Forum*. — Amsterdam, 2012.
12. Yano K. Virtual Kyoto as 4D GIS / K. Yano, T. Nakaya, Y. Isoda [et al.] // *Virtual Geographic Environment*. — Beijing, Science Press, 2009. — P. 69–86.