

Н. С. Головачев¹✉, П. Ю. Бугаков¹

Особенности картографической визуализации четырёхмерных моделей местности

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: tel1386@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена методам визуализации пространственно-временных данных в четырёхмерных (4D) картографических моделях, где помимо трех пространственных координат (X, Y, Z) учитывается временная составляющая (T). Рассматриваются ключевые подходы к представлению динамических процессов, включая темпоральные срезы, анимацию, сценарное моделирование и цифровые двойники. Особое внимание уделяется проблемам выбора частоты дискретизации временных данных, влияющей на детализацию и информативность визуализации процессов. Отдельно рассматриваются способы отображения временного аспекта, включая цветовое кодирование, изохроны, а также их комбинирование. В статье также отмечается проблема сложности восприятия 4D-визуализаций, связанная с когнитивной нагрузкой и возможным искажением временных масштабов. Подчеркивается важность комбинирования различных методов визуализации четырёхмерных моделей местности, разработки интерактивных инструментов навигации и применения специальных приемов для снижения когнитивной нагрузки на пользователя.

Ключевые слова: 4D картография, временная динамика, визуализация данных, цифровые двойники, пространственно-временной анализ

N. S. Golovachev¹✉, P. Yu. Bugakov¹

Features of cartographic visualization of four-dimensional terrain models

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: tel1386@mail.ru

Abstract. The article is devoted to methods of visualizing spatiotemporal data in four-dimensional (4D) cartographic models, where, in addition to the three spatial coordinates (X, Y, Z), the time component (T) is taken into account. Key approaches to the representation of dynamic processes are considered, including temporal slices, animation, scenario modeling and digital doubles. Special attention is paid to the problems of choosing the sampling frequency of time data, which affects the detail and information content of the visualization of processes. The methods of displaying the time aspect, including color coding, isochrons, and their combination, are considered separately. The article also highlights the problem of the complexity of perception of 4D visualizations related to cognitive load and possible distortion of time scales. The importance of combining various visualization methods of four-dimensional terrain models, the development of interactive navigation tools and the use of special techniques to reduce the cognitive load on the user is emphasized.

Keywords: 4D cartography, temporal dynamics, data visualization, digital twins, spatiotemporal analysis

Введение

Для картографической продукции важную роль играют такие характеристики, как понятность и наглядность представленных данных. С учетом особенностей человеческого восприятия пространства традиционные плоские (2D) карты эволюционировали в трехмерные (3D) картографические модели, позволяющие более полно и реалистично воспроизводить окружающее пространство.

В четырехмерных (4D) моделях местности кроме пространственных координат (X, Y, Z) добавляется четвертая координата – время (T), отражающая эволюцию картографируемого объекта и процессы, протекающие в нем [1]. Простейшим примером четырехмерной модели местности является последовательность карт одного и того же участка города, отображающая его состояние в разные годы. Потребность в таких моделях обосновывается тем, что многие географические процессы и объекты являются динамичными. Города растут, климат меняется, происходят природные и антропогенные изменения. Статичные карты позволяют лишь ограниченно и с большими интервалами отследить развитие этих процессов и не позволяют произвести симуляцию изменений.

Визуализация 4D-моделей играет важную роль для решения целого ряда задач. Во-первых, она может помочь анализировать тренды и динамику, например, увидеть, как год за годом меняется плотность населения региона или как распространяется урбанизация на новых территориях. Во-вторых, она может служить для наглядного мониторинга временных рядов данных, например, изменения уровня грунтовых вод по сезонам, позволит выявлять аномалии и прогнозировать будущие изменения. В-третьих, 4D-визуализация подходит для исторических реконструкций, воспроизведения событий прошлого на карте с течением времени, а также сценарного планирования – просмотр различных сценариев развития территории в будущем. Наконец, такой подход облегчает восприятие сложной пространственно-временной информации об окружающем нас пространстве.

Классификация подходов к визуализации пространственно-временных данных

Визуализация пространственно-временных данных может осуществляться с использованием различных подходов, в качестве основных можно выделить срезы по времени, анимацию, сценарии и цифровые двойники.

Срезы по времени или темпоральные срезы предполагают представление 4D-данных в виде набора отдельных статичных карт или моделей, каждая из которых соответствует определенному моменту времени. Проще говоря, делается «срез» по временной оси, например, карта состояния местности на 2000 г., 2010 г., 2020 г. и т. д. Сопоставляя такие карты-срезы, можно проследить за изменениями, происходящими на определенной территории [2]. Преимущество подхода в том, что каждая карта сохраняет полные детали пространства для заданного времени, и пользователь может внимательно изучить любой отдельный момент. Кроме того, статичные карты-срезы могут быть легко напечатаны. Од-

нако при работе с множеством срезов пользователь вынужден запоминать или держать перед глазами несколько карт одновременно, что затрудняет восприятие непрерывных процессов [3].

Важным аспектом создания и использования временных срезов в 4D-картографии является выбор оптимальной частоты дискретизации временных данных. Подобно тому, как в компьютерной технике запись звука осуществляется с заданной частотой дискретизации (чем ниже частота, тем меньше данных фиксируется и ниже качество воспроизведения сигнала, и наоборот), при визуализации пространственно-временных данных приходится находить баланс между временной детализацией процессов и объемом информации [4].

Если выбрать слишком высокую частоту дискретизации (например, создавать карты-срезы каждый день или даже час), это позволит максимально подробно отразить все изменения. Однако в результате возрастает количество данных, увеличивается нагрузка на системы хранения и обработки информации, а пользователю становится сложнее воспринять общую тенденцию, поскольку детализация может скрыть значимые долгосрочные тренды под слоем краткосрочных изменений. Кроме того, слишком мелкие временные интервалы могут генерировать избыточные данные, которые практически не добавляют информативности, а лишь усложняют интерпретацию. С другой стороны, слишком низкая частота дискретизации, например, создание карт-срезов с интервалом в 5 или 10 лет, значительно сокращает количество данных и упрощает восприятие общих трендов и изменений на макроуровне (рис. 1). Однако это может привести к потере важных кратковременных событий или аномалий, которые могут иметь существенное значение для анализа.

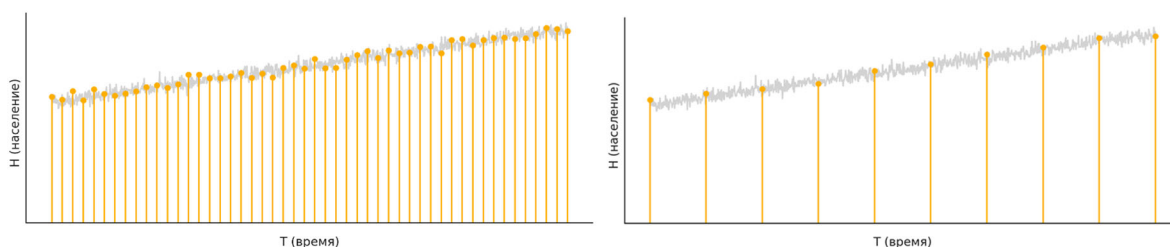


Рис. 1. Пример высокой и низкой частоты дискретизации процесса изменения численности населения

Выбор частоты дискретизации временных срезов должен основываться на характере изучаемого процесса и задачах анализа. Для медленно развивающихся процессов, например, роста города, изменения рельефа, уместны крупные интервалы времени (годы, десятилетия). Для динамичных процессов, таких как транспортные потоки, погодные условия, эпидемиологические ситуации, целесообразно использовать меньшие интервалы (часы, дни, недели). Правильный выбор частоты дискретизации обеспечит баланс между объемом данных и их информативностью.

Анимационный подход отображает изменения во времени в одном и том же окне карты за счет последовательной смены кадров или непрерывного изменения символов. Здесь время выступает как четвертое измерение, отображаемое подобно фильму [5]. Классический пример – воспроизведение на карте маршрута движения или анимация изменения области осадков в сервисе Яндекс «Погода» (рис. 2).

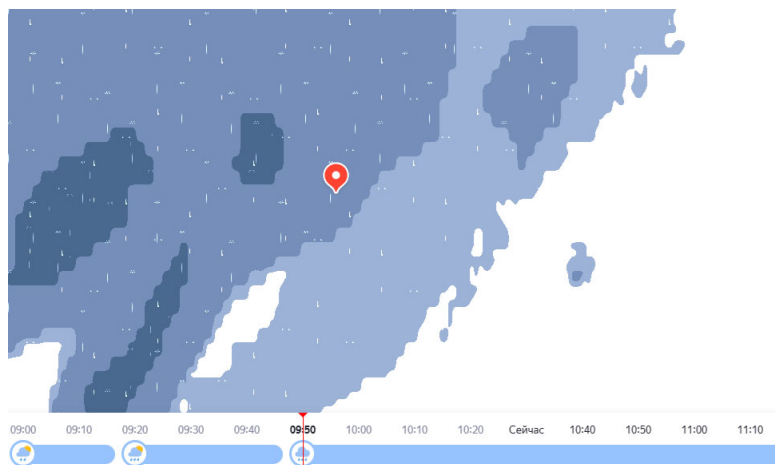


Рис. 2. Пример отображения осадков с анимацией по времени

Анимации можно разделить на автоматические, где все элементы проигрываются с заданной скоростью и интерактивные, где пользователь может управлять временем с помощью ползунка или кнопок «вперед/назад». Преимущество анимации – целостное восприятие динамики, она хорошо передает непрерывность процесса, темпы изменений, последовательность событий. Динамическая карта часто более наглядна, но у нее есть недостатки. Если происходит одновременное изменение множества объектов, то возникает информационная перегрузка – наблюдателю трудно уследить за всеми изменениями на карте. Кроме того, слишком быстрый или медленный темп анимации может исказить восприятие реального времени, а просмотр анимации затрудняет детальное сравнение произвольных, не следующих друг за другом моментов, в отличие от разложенных рядом статичных срезов.

Визуализация сценариев – это подход, при котором 4D-модель используется для демонстрации нескольких альтернативных развития событий. В отличие от простого отображения фактических данных во времени, сценарный подход подразумевает моделирование «что, если». Например, можно смоделировать рост населения по двум сценариям: при текущих темпах и при демографическом взрыве, и представить две разные четырехмерные карты развития городской застройки на последующее десятилетие. С технической стороны, работа со сценариями добавляет еще одно измерение к визуализации – фактически, помимо оси времени, появляется ось вариантов (ветвлений) развития. Это усложняет подачу информации, поэтому ключевым моментом является обеспечение ясности в раз-

личении сценариев, например, при помощи разных цветов, меток или отдельных окон для каждого сценария.

Отдельно стоит выделить цифровые двойники, они относятся к детализированным цифровым моделям отдельных, реально существующих объектов или целых территории, которые обновляются в реальном времени и воспроизводят поведение оригинала [6]. В контексте 4D-визуализации виртуальные двойники предоставляют интерактивную трехмерную среду, в которой время либо синхронизировано с реальным (отображая актуальное состояние объекта), либо может ускоряться/замедляться для анализа процессов. Например, «умный город» подразумевает наличие цифрового двойника, где визуализируются здания, дороги, иная инфраструктура с учетом данных, которые поступают с датчиков, фиксирующих объем трафика, освещенность, потребление энергии и других параметров реальных объектов в режиме, близком к реальному времени. Другой пример – строительный проект, в рамках которого создается 3D-модель здания и добавляется ось времени для воспроизведения процесса строительства. Такой подход уже успешно реализован в BIM-технологиях (рис. 3).

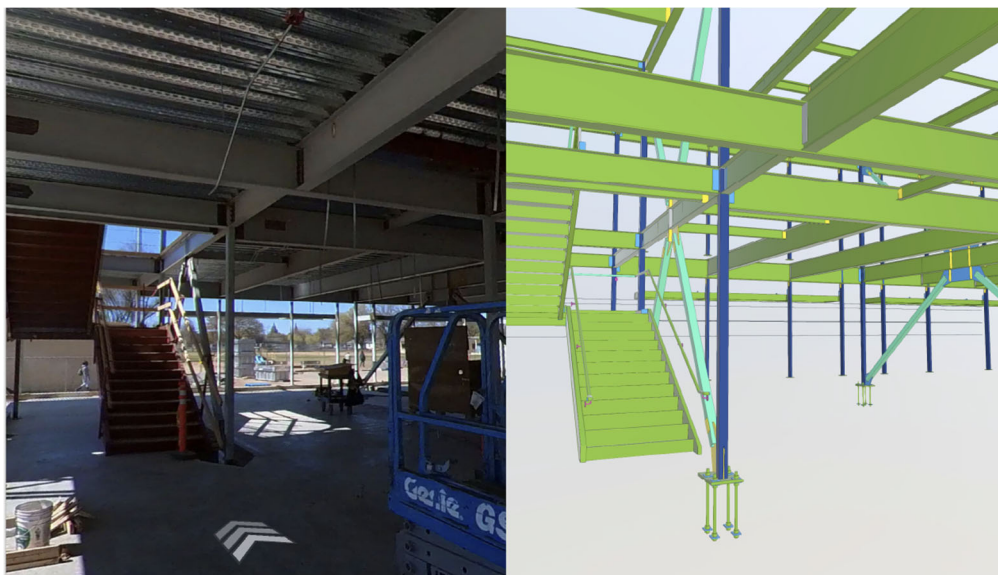


Рис. 3. Пример работы цифрового двойника здания при строительстве

Способы визуализации временного аспекта

Одним из основных приемов визуализации временного аспекта на четырехмерных картах является применение цвета. В статичном изображении это может выглядеть как окраска объектов или траекторий по градиенту, показывающему изменение времени. На данный момент такой способ актуален для отображения возраста зданий в городской застройке (рис. 4).

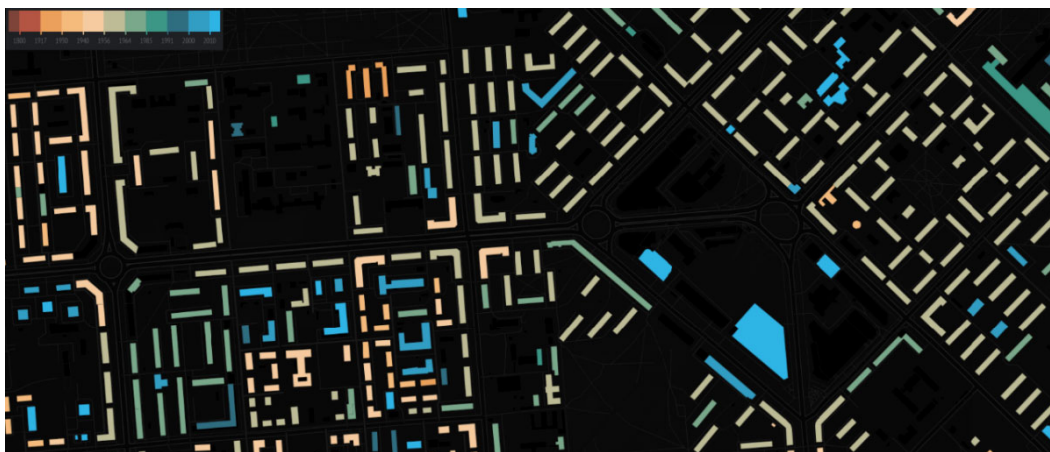


Рис. 4. Пример окраски зданий по времени появления

Метод удобен тем, что добавляет дополнительный визуальный признак, не перегружая саму карту избыточными графическими элементами. Однако его эффективное использование требует учета восприятия цвета человеком, пользователи должны легко различать оттенки и понимать хронологию, для чего зачастую применяют пошаговые легенды или интерактивные подсказки [7, 8].

Второй способ заключается в использовании изохрон – линий равных значений времени. На изохронных картах линии соединяют точки, достижимые за одинаковое время от заданного центра, например, изохроны транспортной доступности показывают, как далеко можно уехать за 1 час, 2 часа и т. д. В более общем смысле, изолинии могут отображать границы распространения явления по времени. Такие изолинии на статичной карте дадут представление о динамике, по их концентрическим формам и расстояниям между ними можно судить о скорости и направлении распространения процесса. Изолинии во времени эффективны для плавных, непрерывных процессов и помогают выявить пространственно-временные градиенты направления наиболее быстрого развития явления.

Перечисленные методы не являются взаимоисключающими, напротив, в современных системах визуализации 4D-данных можно комбинировать несколько способов.

Проблемы восприятия пространственно-временной информации

Основной проблемой отображения 4D информации можно считать сжатие длительных процессов до короткой анимации или растяжение быстрого изменения для более глубокого анализа протекающих процессов. Подобные изменения могут вызвать риск неверного восприятия скорости и масштаба времени.

Попытка показать слишком много, например, длительную анимацию с множеством одновременно движущихся объектов, либо статичную карту, на которой наложены несколько десятков траекторий движения, может привести к тому, что пользователь потеряется в деталях. Четвертое измерение существенно увеличивает объем воспринимаемых данных, помимо положения объектов, их

свойств, нужно отслеживать еще и их изменения. Без должного подбора данных и способов их визуализации четырехмерная карта может стать трудночитаемой.

Когнитивные ограничения и память человека тоже могут стать препятствием, даже если информация на 4D-визуализации не кажется зрительно перегруженной, существует проблема удержания изменений в памяти. При просмотре анимации человек должен помнить, как выглядела карта несколькими шагами ранее, чтобы сравнить и понять разницу. Когнитивная нагрузка возрастает по мере усложнения данных. Для решения данной проблемы необходима разработка новых картографических методов визуализации, учитывающих человеческие особенности восприятия и осмысления пространственно-временной информации.

Заключение

Четырехмерная картографическая визуализация, интегрирующая пространственные и временные данные, открывает новые возможности для анализа динамических процессов, трансформируя традиционные подходы к работе с геоинформацией.

Ключевые методы, такие как темпоральные срезы, анимация, сценарное моделирование и цифровые двойники, демонстрируют разнообразие подходов к представлению пространственно-временных данных.

Несмотря на потенциал, 4D-визуализация сталкивается с проблемами восприятия информации. К ним относятся когнитивная перегрузка при одновременном отслеживании множества динамических элементов, искажение временных масштабов в анимациях и сложности сравнения разрозненных моментов времени. Для минимизации этих проблем необходимы:

- оптимизация дискретизации данных с учетом целей анализа;
- интерактивные инструменты фильтрации временных данных;
- комбинация методов отображения;
- визуальная иерархия, акцентирующая внимание на ключевых изменениях в изучаемом процессе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сущность и тенденции развития многомерной картографии / П. Ю. Бугаков, С. Ю. Кацко, Т. Ю. Бугакова, Н. С. Головачев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 12(150).
2. 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.
3. 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.

4. Boyandin I., Bertini E., Lalanne D. A Qualitative Study on the Exploration of Temporal Changes in Flow Maps with Animation and Small-Multiples // Computer Graphics Forum. – 2012. – Vol. 31, № 3. – P. 1005–1014.
5. 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.
6. Kitchin R., Dawkins O. Digital twins and deep maps // Transactions of the Institute of British Geographers. – 2024.
7. Resch B., Wohlfahrt R., Wosniok C. Web-based 4D Visualization of Marine Geo-Data Using WebGL // Cartography and Geographic Information Science. – 2014. – Vol. 41, № 3. – P. 236–249.
8. Resch B., Hillen F., Reimer A., Spitzer W. Towards 4D Cartography – Four-Dimensional Dynamic Maps for Understanding Spatio-Temporal Correlations in Lightning Events // The Cartographic Journal. – 2013. – Vol. 50, № 3. – P. 266–275.

© Н. С. Головачев, П. Ю. Бугаков, 2025