

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 1 / 2025, Vol. 12, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2025.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/10SATS125.pdf>

DOI: 10.15862/10SATS125 (<https://doi.org/10.15862/10SATS125>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

УДК 625.12:004.94

О трехшаговом методе создания системы цифрового информационного и параметрического моделирования объектов транспортной инфраструктуры и мониторинга

Семочкин А.В., Шепитько Т.В., Зайцев А.А.

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Семочкин Александр Владимирович,
e-mail: alexandervsemochkin@yandex.ru

Аннотация. Целью настоящего исследования является определение технологических особенностей использования цифрового информационного моделирования для интеграции и описания данных мониторинга в пространственно-атрибутивной привязке. В статье рассматриваются особенности создания программного модуля параметрического моделирования данных мониторинга в системе цифрового информационного моделирования. Изучаются особенности декомпозиции исходных данных моделирования для формирования шага и амплитуд графиков в системе пространственной модели. Описываются отдельные методы использования дисперсии данных для анализа их на достоверность и соответствие критериям. Рассматриваются методы визуального программирования для автоматизированного моделирования областей графиков с применением сетей поверхности и гауссовой кривизны. В статье анализируются существующие подходы по оценке текущего состояния объекта строительства в рамках

технологии 4D, с применением средств и математических аппаратов для создания сплайнов численного моделирования в пространственной системе. В частности, уделяется внимание способам получения графиков в пространственной системе на основе данных в векторно-атрибутивной связке элементов цифрового информационного моделирования с внешними таблицами. В работе предлагается систематизация отдельных технологий моделирования, основанной на трехшаговом методе цифрового информационного моделирования данных мониторинга.

Ключевые слова: цифровое информационное моделирование; параметрическое моделирование; наборы данных; мониторинг; дисперсия данных; коллокация; декомпозиция элементов; геометрическое моделирование; математическое моделирование; онтология

On the three-step method for creating a digital information and parametric modeling system of transport infrastructure objects and monitoring

Alexander V. Semochkin, Taisiya V. Shepitko, Andrey A. Zaitsev

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: Alexander V. Semochkin, e-mail: alexandervsemochkin@yandex.ru

Abstract. The aim of this study is to determine the technological features of using digital information modeling for the integration and description of monitoring data in spatial-attributive linkage. The article examines the features of creating a software module for parametric modeling of monitoring data within a digital information modeling system. The specifics of decomposing the initial modeling data for the formation of step and amplitude graphs in the spatial model system are studied. Individual methods for using data dispersion to analyze their reliability and compliance with criteria are described. Methods of visual programming for automated modeling of graph areas using surface meshes and Gaussian curvature are considered. The article analyzes existing approaches to assessing the current state of a

construction object within the framework of 4D technology, using tools and mathematical apparatus for creating splines of numerical modeling in a spatial system. In particular, attention is paid to methods for obtaining graphs in a spatial system based on data in the vector-attribute association of digital information modeling elements with external tables. The paper proposes a systematization of individual modeling technologies based on a three-step method of digital information modeling of monitoring data.

Keywords: digital information modeling; parametric modeling; data sets; monitoring; data dispersion; collocation; decomposition of elements; geometric modeling; mathematical modeling; ontology

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

В настоящей статье описывается процесс структурирования данных цифрового информационного моделирования (далее — ЦИМ) и результатов мониторинга объекта транспортной инфраструктуры. Данные цифрового информационного моделирования, сопряженные с материалами, полученными в процессе проведения инструментальных измерений, предлагается рассмотреть в единой пространственной системе. В частности, к пространственной модели относятся объекты и элементы их составляющие, имеющие координатное описание и граничное представление. К атрибутам в ракурсе информационного моделирования относятся данные, относящиеся к элементам, и позволяющим структурировать их в соответствии с типом и функциональным назначением.

Основной задачей является определение логико-математического аппарата и методов параметрического моделирования, включающих в себя декомпозицию материалов моделирования для уточнения пространственного размещения объектов и позволяющих определить необходимый конечный набор элементов с последующим моделированием данных мониторинга в системе векторно-атрибутивного описания. Ранее в работах авторов проводилось пробное моделирование данных, получаемых с датчиков термометрии и сопутствующей информации о транспортных объектах. При этом вопросам изучения динамики воздействия строительного-монтажных работ и иных техносферных факторов уделялось внимание в работах сотрудников Института пути строительства и сооружений [1].

Технология параметрического моделирования в зарубежной практике ассоциируется с рационализацией геометрии [2] элементов цифровой информационной модели для установления необходимых параметрических связей, позволяющих повышать эффективность создания и ведения цифровых информационных моделей в разрезе строительства и эксплуатации. Технология информационного параметрического моделирования позволяет работать с данными в определенных диапазонах или значениях, принадлежащих наборам данных. Исследования областей применения технологии информационного моделирования на объектах железнодорожной инфраструктуры направлены на изучение способов интеграции смежных данных, позволяющих производить дополнительную категоризацию и группирование элементов жизненного цикла [3].

Набор данных является собирательным понятием, подразумевающим объединение данных в группы на определенных условиях или критериях. Условия позволяют устанавливать связи между элементами инфраструктуры

и данными смежных процессов. В частности, исследованием формализованного описания объектов транспортной инфраструктуры в контексте инженерных задач занимались в рамках развития систем автоматизированного проектирования на основе графового онтологического моделирования [4]. Апробировано на ряде объектов в том числе грантовой работе с исследованиями на тему применения цифрового информационного моделирования в задачах пространственного описания данных мониторинга объектов транспортной инфраструктуры на участках вечной мерзлоты.

В исследовании отмечена задача онтологии в определении иерархии элементов и установлении сопряженных уровней иерархии. Работа направлена на повышение эффективности работы данными описания текущего состояния, используя подход 4D-визуализации материалов цифрового информационного моделирования и смежных данных [5]. Результат использования онтологии в процессном описании позволяет определить перечень и состав данных. При этом, дальнейшая работа по позиционированию элементов в пространственной модели предполагает достаточную их рационализацию или декомпозицию. Координатное описание элементов модели через декомпозицию является важной составляющей позиционирования данных ЦИМ в пространственной модели, основанной на геоинформационной системе [6].

Ранее вопрос декомпозиции данных цифрового информационного моделирования и библиотечных элементов для работы с ними в геоинформационной системе рассматривался в контексте технологии перехода между различными координатными системами [7]. В текущей практике моделирования используются так называемые точки вставки, позволяющие разместить модель в координатной системе и в соответствии с плановым положением [8]. В рамках исследования моделирование трехмерных представлений данных существенно расширено на основе декомпозиции элементов на векторные составляющие, которые позволяют при расстановке и перемещении элементов фиксировать их планово-высотное положение. Ход работы по интеграции данных мониторинга состоит из трех технологических этапов (шагов) и приведен в данной работе ниже.

Формализованное описание технологических процессов и элементов с применением онтологии

Formalised description of technological processes and elements using ontology

Первый шаг включает в себя создание онтологической модели формализованного описания объектов моделирования для определения состава и выстраивания связей между элементами. В частности, в рамках

результатов работ, описываемых в статье, делается попытка установления приоритетных связей между элементами и отдельными данными мониторинга (рис. 1).

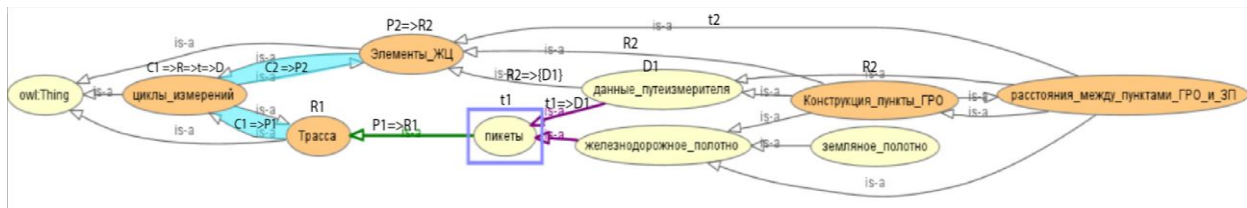


Рисунок 1. Графы взаимосвязей между элементами и данными параметрического моделирования в программном комплексе Protege (разработано авторами)

Figure 1. Graphs of relationships between elements and parametric modelling data in the Protege software package (developed by the authors)

В рамках онтологического моделирования получена первичная схема преобразования множества данных на функциональные группы и отдельные данные мониторинга объекта транспортной инфраструктуры. Образованные блоки графа можно поделить на две укрупненные группы элементов «С». К первой группе относятся элементы железнодорожного пути (рис. 1, элементы С1), ко второй — элементы жизненного цикла прилегающих зданий и сооружений в границе и за пределами полосы отвода (рис. 2, элементы С2). Структура модели, при этом, должна учитывать данные измерений и расположение элементов относительно объекта анализа. К объекту анализа в рамках данного исследования относится железнодорожный путь, таким образом, иные данные должны быть подчинены связевой конструкции, в основе которой лежит линейный объект. За основу пространственного выражения данных С об элементах (рис. 1) взято множество параметров t , последовательное преобразование которых обеспечивается процессами параметрического моделирования P . Преобразование элементов в множества t проводится через первичную декомпозицию ($P1$) и дальнейшее преобразование данных, где $P2$, $P4$ применяют метод коллокации, а $P3$ математическую дисперсию (рис. 2). В результате шага 1 получаем схему технологического процесса, основанного на предполагаемых способах перехода от относительно гомогенного состояния модели к гетерогенному, степень декомпозиции данных которой является достаточной для моделирования данных мониторинга.

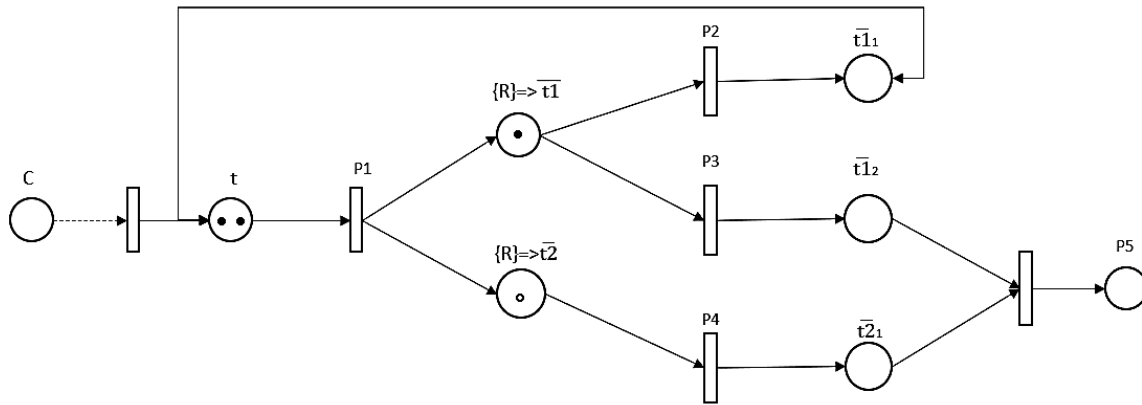


Рисунок 2. Введение в результат моделирования через схему сети Петри (разработан авторами)

Figure 2. Integration of the modeling results via a Petri net diagram (developed by the authors)

Определение логико-математического аппарата для осуществления переходов и обработки данных в рамках технологических процессов

Definition of the logical and mathematical apparatus for carrying out transitions and data processing within technological processes

Второй шаг основывается на построенной выше схеме описания и предполагает определение основных блоков логико-математического аппарата, использование которого позволяет учесть при декомпозиции элементов необходимый их состав и связанность. Логико-математический аппарат ранее исследовался в контексте математического моделирования элементов зданий и сооружений на основе способов их построения и уровней сопряженной иерархии между ними [9]. Таким образом учитывается логика построения элемента на основе его функции и свойств, а также связи образующие его зависимость в контексте системы или объекта. Предлагается общая связевая конструкция установления связей и моделирования данных мониторинга $\{C\} \Rightarrow \{R\} \Rightarrow \{t\} \Rightarrow \{D\}$, где C является множеством элементов, R — трехмерными областями представления элементов, t и D — местами размещения R и данными мониторинга, соответственно. Построение связей в рамках онтологической конструкции можно представить как:

$$C \Rightarrow P \Rightarrow \forall zt \equiv r_n(t) + (D + d_i),$$

где:

P — процесс определения множеств данных и их пространственных параметров в системе параметрического моделирования;

V_{zt} — коллокация данных мониторинга, основанная на высотных отметках Z и параметрах t , определяющих распределение значений в пространственной модели;

$r_n(t)$ — декомпозиция элементов трассы на пикеты с интервалом 10 м;

$(D + d_i)$ — преобразование данных мониторинга в комплексные числа, мнимые значения которых позволяют моделировать данные в пространственной системе.

Добавим в логическую конструкцию выше смысловую нагрузку распределения или дисперсии данных (δ) в контексте моделирования мониторинга. Уравнение вариантов распределения значений (δ) и их суммарное множество имеет следующее отношение:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum d}{n}},$$

где

δ — дисперсия или среднее квадратов отклонений;

$\sum d$ — сумма средних квадратов отклонений циклов измерений в каждой точке t ;

n — количество циклов измерений.

Расчет суммы значений d выводится через высотные координаты Z и их среднее арифметическое (m):

$$d\left(\left(\frac{\sum z}{n}\right)^2 - z^2\right).$$

Таким образом, получаем корреляцию дисперсии с допустимой степенью отступлений.

$$\delta(z) = \sqrt{\frac{\sum d\left(\left(\frac{\sum z}{n}\right)^2 - z^2\right)}{n}}$$
 — уравнение для получения квадратного

корня дисперсии, где отметка Z имеет зависимость от t , определяющий случай на кривой трассы, где находится моделируемый элемент. Таким образом, точное размещение координаты Z в координатах XU определяется методом декомпозиции цифровой информационной модели на составляющие. Для методов коллокации и дисперсии данных мониторинга на основе декомпозиции характерно использование нормальных значений для выражения степени отступления и проведения оценки на соблюдение допустимого диапазона значений. В частности, при моделировании данных путеизмерителя возможно использование степени отступлений по уровню согласно таблице 1. Нормальные значения на

графике будут иметь наибольшую степень аппроксимации с целевым состоянием близким к прямой. При этом в виду рассмотрения в работе значений циклов измерений, полученных в различные периоды, можно предположить, что результат моделирования должен учитывать степень отступления на кривой нормальных параметров для установления связи со значениями разницы между периодами.

Таблица 1 / Table 1

Степени отступлений по уровню, перекосам и просадкам¹

Degrees of deviations by level, skewness and subsidence¹

Установленная скорость пассажирских/грузовых поездов, км/ч <i>Set speed of passenger/cargo trains, km/h</i>	Степень <i>Degree</i>	Величина отклонения уровня, мм <i>Level deviation value, mm</i>	Величина перекоса, мм <i>Skewness value, mm</i>	Величина просадки, мм <i>Slippage value, mm</i>
61–120 / 61–90	I	от 9 до 12 <i>9 to 12</i>	от 9 до 10 <i>9 to 10</i>	от 10 до 12 <i>9 to 12</i>
	II	до 20 <i>up to 20</i>	до 14 <i>up to 14</i>	до 20 <i>up to 20</i>
	III	до 25 <i>up to 25</i>	до 20 <i>up to 20</i>	до 25 <i>up to 25</i>
	IV	Более / <i>more than</i>		
Движение закрывается <i>Traffic is shutting down</i>		25	20	25
		Более / <i>more than</i>		
		50	50	45

Таким образом, в рамках коллокации $V_{zt} \equiv m(t) + D(K(Z) + d_i)$ — данные мониторинга D представляются как волновые числа, значения d_i которых являются мнимыми значениями для формирования графика в системе цифрового (параметрического) информационного моделирования. Формирование конечного состава элементов в рамках декомпозиции и создание графиков мониторинга в пространственной системе являются неразрывными технологическими процессами. Данный вывод получен на основе зависимостей и математического аппарата, полученного при выполнении шага 2.

Выполнение декомпозиции элементов модели и привязка данных мониторинга

Perform decomposition of model elements and linking of monitoring data

Третий шаг основан на выполнении декомпозиции, основанной на получении геометрических примитивов, организованных в группы элементов, с последующим моделированием данных мониторинга в соответствии с ранее определенным математическим аппаратом. Данный

¹ Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов, утверждённая МПС РФ № ЦП-515 от 14.10.1997, Таблица 3.2.

этап объединяет в себе описываемые в рамках трехшагового метода блоки визуального программирования (рис. 3). Визуальное программирование в инженерной деятельности применяется для процедурного моделирования, позволяющего создавать и поддерживать в актуальном состоянии элементы объектов железнодорожной инфраструктуры.²

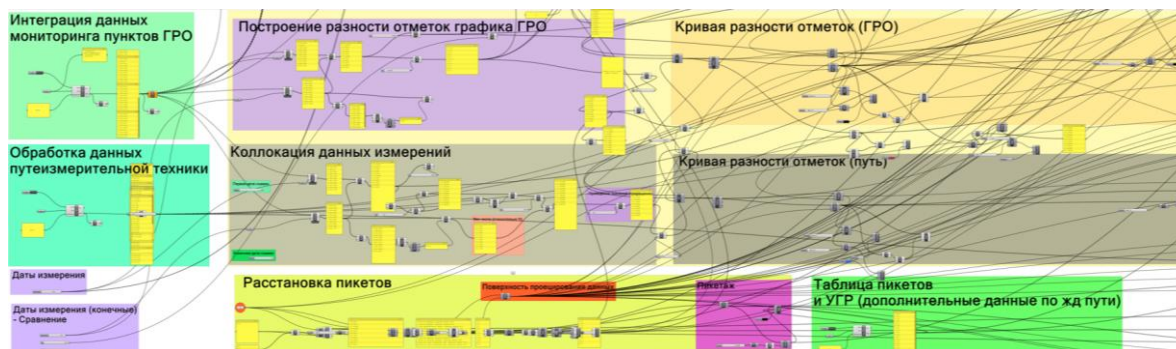


Рисунок 3. Изображение основных фрагментов параметрического моделирования (разработано авторами)

Figure 3. Depiction of the main fragments of parametric modelling (developed by the authors)

В основе формирования частоты волн графика лежит получение значений фаз. Фазы выражаются как значения t , множество которых является диапазоном членения основания графика, тождественного протяженности участка железнодорожного пути. Формирование множества t в цифровой информационной модели выполняется на основе декомпозиции элементов трассы и иных элементов жизненного цикла.

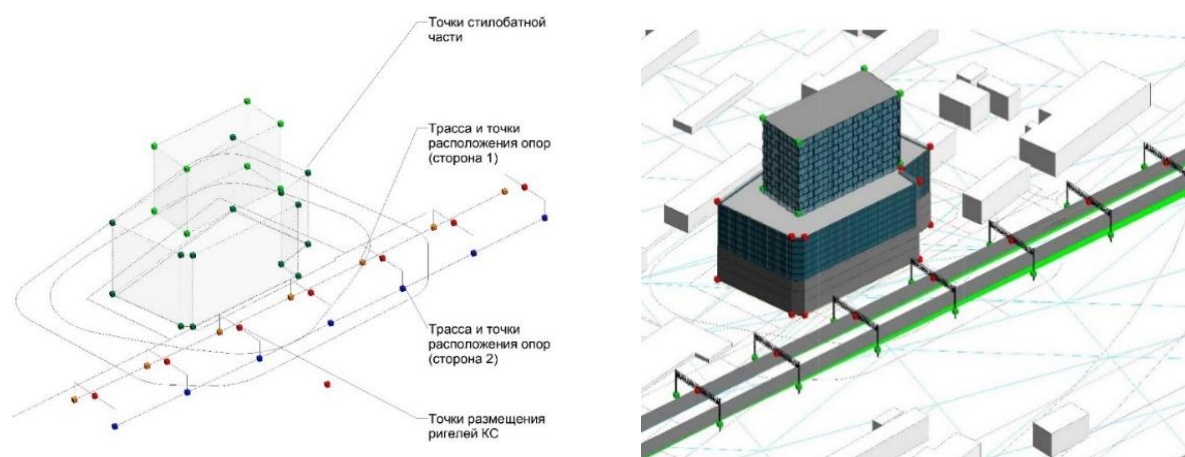


Рисунок 4. Декомпозиция элементов цифровой информационной модели с выделением их в наборы данных (разработано авторами)

Figure 4. Decomposition of digital information model elements with their separation into datasets (developed by the authors)

² Из публикации в научном журнале. Biancardo, Salvatore Antonio & Intignano, Mattia & Viscione, Nunzio & Guerra de Oliveira, Sara & Tibaut, Andrej. (2021). Procedural Modeling-Based BIM Approach for Railway Design. Journal of Advanced Transportation. 2021. 1–17. 10.1155/2021/8839362.

Декомпозиция данных применяется для получения примитивов и их базисных векторов, объединенных в группы и позволяющих проводить дальнейшие преобразования в рамках коллокации данных мониторинга (рис. 4).

Данные планового положения, в частности, контуров элементов являются результатом декомпозиции данных цифрового информационного моделирования и систем автоматизированного проектирования. Вышеупомянутое членение достигается посредством наличия в конструкции точек и ребер, заложенных в процессе создания единичных элементов, содержащих геометрию и структуру атрибутивного описания.³ На основе декомпозиции данных цифровой информационной модели элементы жизненного цикла проецируются на ось данных. Данные существуют во множестве $\{0, 1, 2, \dots, 10\}$, где нулевое значение относится к точке начала профиля трассы и месту подключения к существующему участку. При этом множества плюсовых точек пикетов, полученных в результате проецирования элементов жизненного цикла на профиль можно выразить множеством $\{t_1; t_2; t_3, \dots, t_n\}$, где t обозначают значения множеств, существующих на оси трассы. Формируются множества данных, группирующих элементы в соответствии с типом и функциональной принадлежностью (рис. 5). Преобразованием данных цифровых информационных моделей с применением логико-математического аппарата занимались ученые Мюнхенского технического университета в рамках изучения декомпозиции гетерогенных повторяющихся элементов ЦИМ на порядковые множества [10]. Основной проблемой, решаемой декомпозицией является повышение гетерогенности посредством выстраивания перекрестных и сопряженных связей между разными группами элементов, нежели отработки структуры отдельных их представлений. Ранее не исследовались средства повышения связанности элементов цифрового информационного моделирования для перехода от условной их корреляции к установлению зависимости в рамках работ строительно-эксплуатационного цикла.

Основоположником параметрического моделирования в рамках интеграции данных в систему трехмерного информационного моделирования Чаком Истманом, описаны основные условия проведения данной работы: формализованное описание критериев представления данных, обработка цифровой информационной модели (декомпозиция), вывод данных и их проверка на основе критериев [11]. В отечественной практике расчетного моделирования рассматриваются конечно-элементные модели, содержащие элементы в увязке с пространственными данными [12].

³ Библиотеки информационного моделирования.

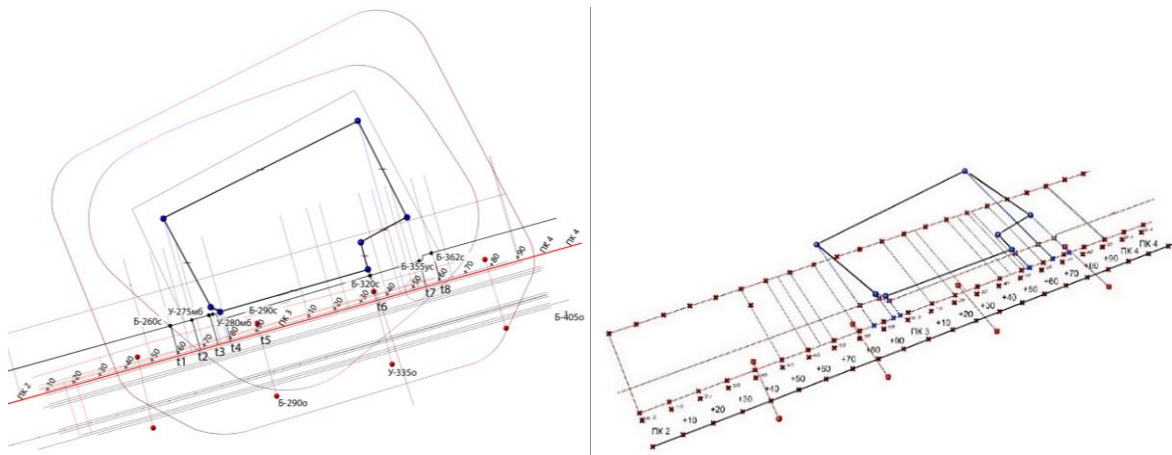


Рисунок 5. Результаты декомпозиции цифровой информационной модели и получения наборов данных на основе данных САПР и модуля программирования (разработано авторами)

Figure 5. Results of decomposition of the digital information model and obtaining datasets based on CAD data and programming module (developed by the authors)

Данные условия были дополнены в части сопряжения параметров оси трассы железнодорожного пути со смежными данными в рамках создания неявных моделей [13]. Данный подход в теории моделирования называется моделированием реляционных неявных знаний, и предполагает генерацию параметров, распространяемых на протяжении моделируемой области значений. Для образования области значений в рамках описываемой параметрической модели создаются области графиков на основе групп данных, которые в процессе программной обработки заполняются промежуточными значениями гауссовой кривизны. Группы данных, содержащие отдельные наборы множеств t позволяют формировать разветвленную структуру графиков, результаты моделирования которых совмещаются в едином диапазоне фаз графика, соответствующего пространственному расположению элементов (рис. 6). Представленный ниже анализ полученных графиков направлен на выявление отдельных аспектов оценки результатов с упором на динамику изменений, зафиксированных в ходе проведения мониторинга.

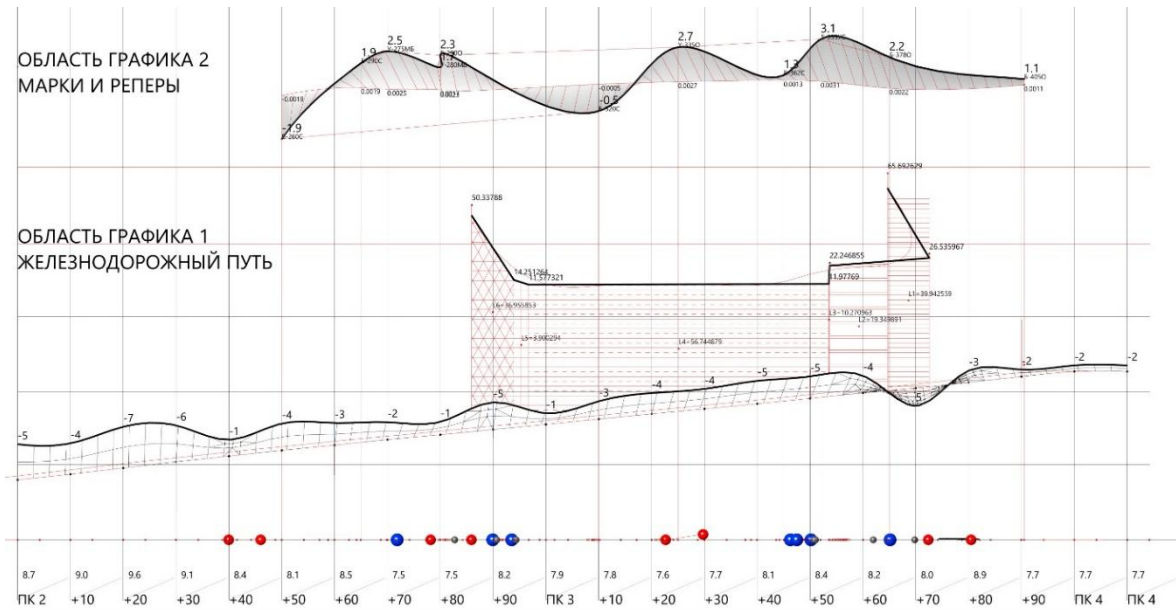


Рисунок 6. Графики пространственного моделирования показателей мониторинга в программе визуального программирования Grasshopper для обработки данных САПР (разработано авторами)

Figure 6. Graphs of spatial modelling of monitoring indicators in Grasshopper visual programming software for CAD data processing (developed by the authors)

На рисунке 6 показан результат создания логико-математический аппарата, позволяющего моделировать просадки пути (область графика 1) и осадки элементов геодезической разбивочной основы (далее — ГРО) в рамках области графика 2. На области графика 1 дополнительно построена кривая котлована на основе значений расстояний между контуром здания и железнодорожными путями, а также длинами отдельных сторон здания. Моделируемые области графиков предназначены для анализа данных в системе визуального программирования. Исходными данными для моделирования являются результаты декомпозиции цифровой информационной модели и данные мониторинга. Последние создаются в формате таблиц, ячейки и столбцы которых обрабатываются в системе параметрического моделирования, основные модули которого представлены на рисунке 2. Рассмотрим некоторые особенности коллокации данных, используемой в данной работе и проиллюстрированной на рисунке 6 в системе моделируемого графика железнодорожного пути. График представляет из себя область, состоящую из кривых верхнего и нижнего пределов. Значения верхнего предела содержат разности просадок в фазах графика (пикетах), формирующих кривую разности моделируемого множества или полиномиальную кривую. Кривая нижнего предела строится на основе относительных нулей значений разности, моделируемых на верхней кривой. Область данных между кривыми заполняется значениями гауссовой кривизны в соответствии с принципами коллокации данных в математическом моделировании, ранее описанными Ф. Аручио в контексте решения

дифференциальных уравнений, образуемых двумя граничными кривыми в изо-геометрическом выражении [14]. Получение промежуточных данных поверхности производится на основе геометрической сети, где значения средней кривизны (K) выводятся как расстояния между ближайшими точками, образуемыми ребрами сети (рис. 6). В данном случае преобразование данных в комплексные числа позволяет получать нужную амплитуду значений в частоте фаз, образуемых множествами t . В виду того, что множества t имеют конкретное координатно-пространственное распределение, изменение значений амплитуды позволило экспериментально подтвердить ранее предложенную зависимость дисперсии $V_{zt} = m(t) + (D + d_i)$, в том числе дополнить данные коэффициентами средней кривизны (K). Плотность точек и их распределение на поверхности сети основана на фазах и кривизне фрагментов, образуемых фазами, аппроксимируемых в заданной частоте (рис. 7).

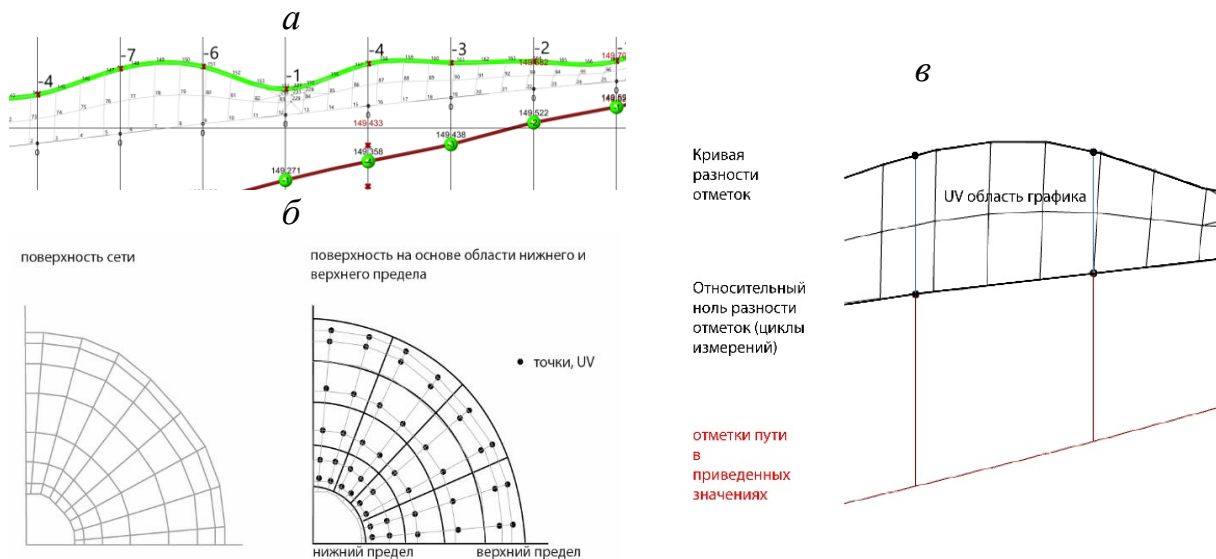


Рисунок 7. Схема формирования графиков в пространственной системе: а — зависимость значений от кривизны поверхности, определяемой кривыми нижних и верхних пределов (разработан авторами); б — получение значений кривизны (UV) в точках поверхности на основе расстояний между образующими ребрами сети (в редакции авторов на основе источника: https://www.researchgate.net/publication/228648648_Isogeometric_collocation_methods); в — область графика по данным путеизмерительного оборудования (разработано авторами)

Figure 7. Scheme of graph formation in the spatial system: a — dependence of values on surface curvature defined by curves of lower and upper limits (developed by the authors); b — obtaining values of curvature (UV) in surface points based on distances between forming edges of the network (in the authors' edition based on the source: https://www.researchgate.net/publication/228648648_Isogeometric_collocation_methods); c — area of the graph based on data of track measuring equipment (developed by the authors)

В результате выявлена некоторая корреляция значений просадки с отдельными работами, проводимыми на смежном участке в рамках

данных⁵, гетерогенность дисперсии которых препятствует проведению качественной оценки [13].

Таким образом, для однозначности трактовки данных следует проводить предварительную их оценку на характер вариативности в группе сопряженных в рамках множеств фаз графика и показателей мониторинга. В результате для моделирования пунктов ГРО было принято уравнение, выведенное в данной статье в рамках математической дисперсии, $\delta(z)$. Полученный результат показывает явный доверительный интервал в части анализа разности значений циклов измерений, расположенный в зоне работ нулевого цикла на смежном участке (рис. 8, область графика 3).

Заключение

Conclusion

Проведенное исследование позволяет расширить применение технологии информационного моделирования объектов транспортной инфраструктуры в рамках эксплуатации относительно ранее исследуемых способов оценки текущего состояния на этапе строительства. В частности, представленная технология декомпозиции данных применялась ранее в рамках рационализации геометрии поверхностей и выделения отдельных фрагментов облаков точек сканирования [15]. В представленном трехшаговом методе моделирования данных мониторинга в пространственной системе учитываться характер данных и их свойства при выборе логико-математического аппарата параметрической модели. В данной статье рассмотрены случаи, когда уместно получение графиков через приращение координат и случаи, когда необходимо использовать более сложные преобразования, основанные на математической дисперсии. В частности, получен вывод о необходимости первичной декомпозиции материалов ЦИМ для повышения степени гетерогенности трехмерных областей данных и получения групп данных, и параметров t в диапазонах групп. Также выявлена важность логико-математического описания технологических процессов P , в виду сложности введения всех необходимых переменных в результирующие уравнения. Так, например, координаты Z на основе которых проводится моделирование графика, встраиваются в его фазы, основанные на XU через параметры t . Связь различных математических аппаратов для описания планового положения и высотного затруднительна на уровне отдельных уравнений. При этом рассмотрение математических выражений в системе и практическое их применение возможно в рамках параметрического моделирования (рис. 3).

⁵ Разнотипность значений данных ГРО.

Таким образом, различные локальные технологические процессы в рамках решения отдельных задач объединены в сводную технологию или технологический процесс Р.

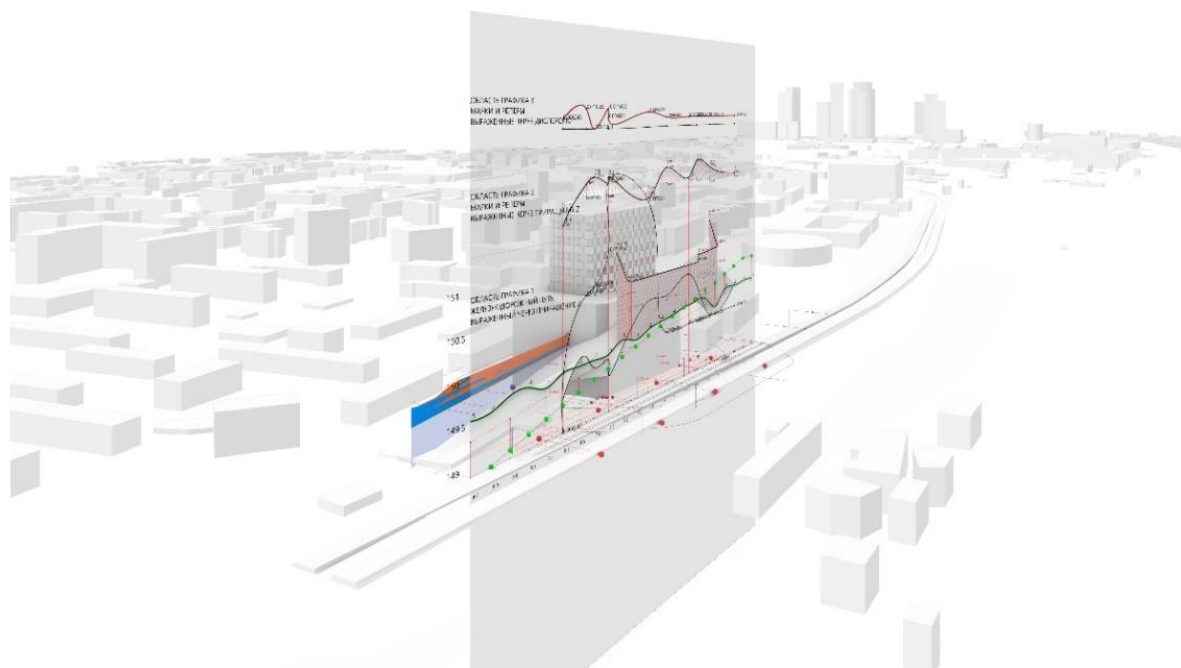


Рисунок 9. Трехмерная среда инженерных данных на основе параметрического и цифрового информационного моделирования — наложение данных мониторинга на модель местности (разработано авторами)

Figure 9. Three-dimensional environment of engineering data based on parametric and digital information modeling — superimposition of monitoring data on a terrain model (developed by the authors)

Данные исследования используются в качестве учебных материалов при реализации образовательной программы «Информационное моделирование объектов транспортной инфраструктуры» в Российском университете транспорта (РУТ МИИТ), опираясь на опыт проведения исследований северных территорий России [16]. Результат моделирования в виду выстроенных отношений элементов модели в системе эксплуатации объекта и нового строительства представляет из себя среду инженерных данных, позволяющую работать с векторными и численными данными в системе объекта транспортной инфраструктуры и иных объектов строительства на смежных участках. Одной из отличительных особенностей программного модуля является наглядность результатов моделирования для проведения оценки (рис. 9). В рамках данного процесса проводится первичная декомпозиция с выявлением групп данных, оценивается характер полученных массивов t и проводится выбор логико-математической модели обработки данных. Проведение работ на основе цифрового информационного моделирования позволяет при формировании аппарата и программных модулей моделирования учитывать описанные выше факторы, влияющие на количественную и качественную оценку данных,

что позволяет дополнительно отметить перспективу использования ЦИМ при эксплуатации земляного полотна, отдельных элементов и обустройств на линиях опорной сети железных дорог. Предложенный трехшаговый метод цифрового информационного моделирования объектов инфраструктуры является попыткой объединения технологий цифрового описания и обследования объектов в единой среде инженерных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шепитько, Т.В.** Задачи и возможности повышения надежности земляного полотна на линиях опорной сети железных дорог / Т.В. Шепитько, А.А. Зайцев, А.В. Семочкин // Путь и путевое хозяйство. — 2023. — № 9. — С. 9–14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54372283>. EDN: [HNOYYQ](https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54372283). (Дата обращения: 19.01.2025).
2. **Fischer, T.** Geometry Rationalization for Non-Standard Architecture / T. Fischer // Architecture Science. — 2012. — Vol. 5. — P. 25–47. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=IzvAqAAAAAJ&citation_for_view=IzvAqAAAAAJ:WC23djZS0W4C. (Дата обращения: 19.01.2025).
3. **Nuttens, T.** Using BIM models for the design of large rail infrastructure projects: key factors for a successful implementation / T. Nuttens, V. De Breuck, R. Cattoor, K. Decock, I. Hemeryck // International Journal of Sustainable Development and Planning. — 2018. — Vol. 13. — No. 1. — P. 73–83. URL: <https://iijeta.org/journals/ijsdp/paper/10.2495/SDP-V13-N1-73-83>. DOI: [10.2495/SDP-V13-N1-73-83](https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N1-73-83). (Дата обращения: 19.01.2025).
4. **Le, T.** Generating partial civil information model views using a semantic information retrieval approach / T. Le, H.D. Jeong, S.B. Gilbert, E. Chukharev-Hudilainen // ITcon. — 2020. — Vol. 25. — P. 41–54. URL: <https://www.itcon.org/paper/2020/2>. DOI: [10.36680/j.itcon.2020.002](https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.002). (Дата обращения: 19.01.2025).
5. **Benjaoran, V.** Enhancing visualization of 4D CAD model compared to conventional methods / V. Benjaoran, S. Bhokha // Engineering, Construction and Architectural Management. — 2009. — Vol. 16. — No. 4. — P. 392–408. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/09699980910970860/full/html>. DOI: [10.1108/09699980910970860](https://doi.org/10.1108/09699980910970860). (Дата обращения: 19.01.2025).
6. **Zhu, J.** A Common Approach to Geo-Referencing Building Models in Industry Foundation Classes for BIM/GIS Integration / J. Zhu, P. Wu // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2021. — Vol. 10. — No. 6. — Art. 362. URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/10/6/362>. DOI: [10.3390/ijgi10060362](https://doi.org/10.3390/ijgi10060362). EDN: [GKELFU](https://www.mdpi.com/2220-9964/10/6/362). (Дата обращения: 19.01.2025).
7. **Jaud, Š.** Georeferencing in the context of building information modelling / Š. Jaud, A. Donaubaauer, O. Heunecke, A. Borrmann // Automation in Construction. — 2020. — Vol. 118. — Art. 103211. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580519311896?via%3Dihub>. DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103211](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103211). EDN: [EYXUIR](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580519311896?via%3Dihub). (Дата обращения: 19.01.2025).
8. **Arroyo Ohoiri, K.** Processing BIM and GIS Models in Practice: Experiences and Recommendations from a GeoBIM Project in The Netherlands / K. Arroyo Ohoiri, A. Diakité, T. Krijnen, H. Ledoux, J. Stoter // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2018. — Vol. 7. — No. 8. — Art. 311. URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/7/8/311>. DOI: [10.3390/ijgi7080311](https://doi.org/10.3390/ijgi7080311). (Дата обращения: 19.01.2025).
9. **Бучкин, В.А.** Сравнительный анализ программных комплексов / В.А. Бучкин, Е.А. Рыжик, Е.П. Ленченкова // Мир транспорта. — 2013. — Т. 11. — № 2. — С. 112–121. URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/viewFile/347/603>. EDN: [QIUXOD](https://mirtr.elpub.ru/jour/article/viewFile/347/603). (Дата обращения: 07.02.2025).
10. **Beck, S.F.** Analyzing Contextual Linking of Heterogeneous Information Models from the Domains BIM and UIM / S.F. Beck, J. Abualdenien, I.H. Hijazi, A. Borrmann, T.H. Kolbe // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2021. — Vol. 10. — No. 12. — Art. 807. URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/10/12/807>. DOI: [10.3390/ijgi10120807](https://doi.org/10.3390/ijgi10120807). EDN: [CWXLUE](https://www.mdpi.com/2220-9964/10/12/807). (Дата обращения: 07.02.2025).
11. **Eastman, C.** Automatic rule-based checking of building designs / C. Eastman, J.M. Lee, Y.S. Jeong, J.K. Lee // Automation in Construction. — 2009. — Vol. 18. — No. 8. — P. 1011–1033. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580509001198>. DOI: [10.1016/j.autcon.2009.07.002](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.07.002). (Дата обращения: 07.02.2025).

12. Сафронов, В.С. Экспериментально–расчетный анализ резонансных колебаний сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста / В.С. Сафронов, А.В. Антипов // Строительная механика и конструкции. — 2012. — № 2(5). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18241449>. EDN: [PJEPXX](https://elibrary.ru/item.asp?id=18241449). (Дата обращения: 07.02.2025).
13. Häußler, M. Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN / M. Häußler, S. Esser, A. Borrmann // Automation in Construction. — 2021. — Vol. 121. — Art. 103427. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580520310074>. DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103427](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103427). EDN: [GCXKZA](https://elibrary.ru/item.asp?id=18241449). (Дата обращения: 07.02.2025).
14. Auricchio, F. Isogeometric collocation methods / F. Auricchio, L.B. da Veiga, T.J.R. Hughes, A. Reali, G. Sangalli // Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. — 2010. — Vol. 20. — No. 11. — P. 2075–2107. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S0218202510004878>. DOI: [10.1142/s0218202510004878](https://doi.org/10.1142/s0218202510004878). (Дата обращения: 07.02.2025).
15. Noichl, F. Enhancing point cloud semantic segmentation in the data-scarce domain of industrial plants through synthetic data / F. Noichl, F.C. Collins, A. Braun, A. Borrmann // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. — 2024. — Vol. 39. — P. 1530–1549. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/mice.13153>. DOI: [10.1111/mice.13153](https://doi.org/10.1111/mice.13153). EDN: [DUXQGL](https://elibrary.ru/item.asp?id=18241449). (Дата обращения: 07.02.2025).
16. Шепитько, Т.В. Транспортное развитие северных территорий России / Т.В. Шепитько, А.А. Зайцев, Н.И. Тенирядко, В.А. Бучкин // Известия Транссиба. — 2021. — № 3(47). — С. 116–130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48008690>. EDN: [JEAGZI](https://elibrary.ru/item.asp?id=48008690). (Дата обращения: 07.02.2025).

Сведения об авторах:

Семочкин Александр Владимирович — аспирант, Институт пути, строительства и сооружений, ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: alexandervsemochkin@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0792-0742>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1278792

Шепитько Таисия Васильевна — доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», директор, Институт пути, строительства и сооружений, ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: shepitko-tv@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4785-1625>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=480532

Зайцев Андрей Александрович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», Институт пути, строительства и сооружений, ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: andrei.zaitsev2010@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8931-0552>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=772051

Статья получена: 08.02.2025. Принята к публикации: 26.04.2025. Опубликовано онлайн: 10.06.2025.

Статья подготовлена на основе исследований, выполненных в рамках гранта, предоставленного Министерством образования и науки в форме субсидии из федерального бюджета на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям развития научно-технологического развития, тема проекта «Анализ и разработка теоретических основ с исследованием и разработкой конструктивно-технологических решений по обеспечению эксплуатационной надёжности объектов транспортной инфраструктуры в условиях распространения многолетнемёрзлых грунтов», соглашение № 075-15-2024-559 от 24.04.2024

REFERENCES

1. Shepitko T.V., Zaytsev A.A., Semochkin A.V. Improving the reliability of the roadbed on the lines of the reference network of railways. *Railway Track and Facilities*. 2023;9:9–14. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54372283> (accessed 19th January 2025). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Fischer T. Geometry Rationalization for Non–Standard Architecture. *Architecture Science*. 2012;5:25–47. Available from: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=IzvAqAAA-AAJ&citation_for_view=IzvAqAAAAAJ:WC23djZS0W4C (accessed 19th January 2025). (In Eng.).

3. Nuttens T., De Breuck V., Cattoor R., Decock K., Hemeryck I. Using BIM models for the design of large rail infrastructure projects: key factors for a successful implementation. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2018;13(1):73–83. DOI: <https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N1-73-83> (In Eng.).
4. Le T., Jeong H.D., Gilbert S.B., Chukharev-Hudilainen E. Generating partial civil information model views using a semantic information retrieval approach. *ITcon*. 2020;25:41–54. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.002> (In Eng.).
5. Benjaoran V., Bhokha S. Enhancing visualization of 4D CAD model compared to conventional methods. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2009;16(4):392–408. DOI: <https://doi.org/10.1108/09699980910970860> (In Eng.).
6. Zhu J., Wu P. A Common Approach to Geo-Referencing Building Models in Industry Foundation Classes for BIM/GIS Integration. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021;10(6):362. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10060362> (In Eng.).
7. Jaud Š., Donaubaauer A., Heunecke O., Borrmann A. Georeferencing in the context of building information modelling. *Automation in Construction*. 2020;118:103211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103211> (In Eng.).
8. Arroyo Otori K., Diakit  A., Krijnen T., Ledoux H., Stoter J. Processing BIM and GIS Models in Practice: Experiences and Recommendations from a GeoBIM Project in The Netherlands. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2018;7(8):311. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi7080311> (In Eng.).
9. Buchkin V.A., Ryzhik E.A., Lenchenkova E.P. Comparative analysis of software packages. *World of Transport and Transportation*. 2013;11(2):112–121. Available from: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/viewFile/347/603> (accessed 07th February 2025). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Beck S.F., Abualdenien J., Hijazi I.H., Borrmann A., Kolbe T.H. Analyzing Contextual Linking of Heterogeneous Information Models from the Domains BIM and UIM. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021;10(12):807. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10120807> (In Eng.).
11. Eastman C., Lee J.M., Jeong Y.S., Lee J.K. Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*. 2009;18(8):1011–1033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.07.002> (In Eng.).
12. Safronov V.S., Antipov A.V. Pilot-design investigation of resonant vibration of road metal box span. *Structural Mechanics and Structures*. 2012;2(5). Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18241449> (accessed 07th February 2025). (In Russ., abstract in Eng.).
13. H u bler M., Esser S., Borrmann A. Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN. *Automation in Construction*. 2021;121:103427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103427> (In Eng.).
14. Auricchio F., da Veiga L.B., Hughes T.J.R., Reali A., Sangalli G. Isogeometric collocation methods. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. 2010;20(11):2075–2107. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218202510004878> (In Eng.).
15. Noichl F., Collins F.C., Braun A., Borrmann A. Enhancing point cloud semantic segmentation in the data-scarce domain of industrial plants through synthetic data. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2024;39:1530–1549. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.13153> (In Eng.).
16. Shepitko T.V., Zaytsev A.A., Teniryadko N.I., Buchkin V.A. Transport development of the northern territories of Russia. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2021;3(47):116–130. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48008690> (accessed 07th February 2025). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Alexander V. Semochkin — Institute of Way, Construction and Structures, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: alexandervsemochkin@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0792-0742>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1278792

Taisiya V. Shepitko — Institute of Way, Construction and Structures, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: shepitko-tv@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4785-1625>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=480532

Andrey A. Zaitsev — Institute of Way, Construction and Structures, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: andrei.zaitsev2010@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8931-0552>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=772051

Submitted: 08th February 2025. Revised: 26th April 2025. Published online: 10th June 2025.

The article was prepared on the basis of the research carried out under the grant provided by the Ministry of Education and Science in the form of a subsidy from the federal budget for major scientific projects in priority areas of scientific and technological development, project topic «Analysis and development of theoretical foundations with research and development of structural and technological solutions to ensure the operational reliability of transport infrastructure facilities in the spread of permafrost soils», Agreement No. 075-15-2024-559 24.04.2024