

Ф. Р. Валишев¹✉, С. С. Шемяков¹, А. А. Ерофеев¹

Спутниковое геодезическое обеспечение цифрового двойника объекта дорожной инфраструктуры в криолитозоне

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ),
г. Томск, Российская Федерация
e-mail: fuat_1981@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме геодезического обеспечения цифровых двойников линейных инфраструктурных объектов, эксплуатируемых в криолитозоне. На примере участка, расположенного на 1 242 км автодороги Сургут-Надым-Салехард (Ямало-Ненецкий автономный округ) с мостом через реку Хойзерияна апробирована комплексная методика создания планово-высотной геодезической основы с применением спутниковой геодезической аппаратуры, метода точного позиционирования PPP и сервиса постобработки AUSPOS. Описана архитектура цифрового двойника участка автодороги, объединяющего материалы воздушного лазерного сканирования, цифровые модели рельефа и теплофизическую модель грунтов. Показано, как высокоточное планово-высотное геодезическое обоснование обеспечивает интеграцию разнородных пространственных данных с прогнозной моделью деградации многолетнемерзлых пород. Обоснована ключевая роль спутниковой геодезии в создании динамических пространственно-временных моделей для исследования интенсивности деформации объектов транспортной инфраструктурой в криолитозоне.

Ключевые слова: спутниковая геодезия, ГНСС, цифровой двойник, криолитозона, автодорога, воздушное лазерное сканирование, теплофизическое моделирование

F. R. Valishev¹✉, S. S. Shemykov¹, A. A. Erofeev¹

Satellite geodetic support for a digital twin of a road Infrastructure facility in the cryolithozone

¹National Research Tomsk State University (NR TSU), Tomsk, Russian Federation
e-mail: fuat_1981@mail.ru

Abstract. The article addresses the problem of geodetic support for digital twins of linear infrastructure facilities operated in the cryolithozone. Using the example of a section located at 1,242 km of the Surgut–Nadym–Salekhard highway (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug) with a bridge over the Khoyzeriyena River, a comprehensive methodology for establishing a horizontal and vertical geodetic control network has been tested, employing satellite geodetic equipment, the Precise Point Positioning (PPP) method, and the AUSPOS post-processing service. The architecture of a digital twin of the highway section is described, integrating airborne laser scanning data, digital elevation models, and a thermophysical soil model. It is shown how high-precision horizontal and vertical geodetic control enables the fusion of heterogeneous spatial data with a predictive model of permafrost degradation. The key role of satellite geodesy in creating dynamic spatiotemporal models for studying the deformation intensity of transport infrastructure facilities in the cryolithozone is substantiated

Keywords: satellite geodesy, GNSS, digital twin, cryolithozone, highway, airborne laser scanning, thermophysical modeling

Введение

Линейные объекты транспортной инфраструктуры, расположенные в криолитозоне, испытывают непрерывное воздействие криогенных процессов – термокарста, морозного пучения, солифлюкции, термоэрозии и др. [1]. Автомобильная дорога Надым-Салехард, пересекающая Ямало-Ненецкий автономный округ на протяжении 344 км, является важнейшей круглогодичной транспортной артерией, связывающей западные и восточные районы округа. Ежегодные наблюдения фиксируют локальные деформации дорожного покрытия – просадки, трещины, волны, обусловленные деградацией многолетнемерзлых оснований под воздействием климатических изменений и техногенных нагрузок. Прогнозирование этих процессов и научное обоснование инженерных решений требуют перехода от разрозненных периодических обследований к постоянному мониторингу, основанному на цифровых двойниках и современных информационных системах. Данный подход позволит применять динамические пространственно-временные модели, интегрирующие данные геодезического мониторинга, дистанционного зондирования Земли и численного теплофизического моделирования.

Концепция цифрового двойника (ЦД) в приложении к инженерным объектам предполагает наличие виртуального аналога, который синхронизируется с физическим оригиналом в режиме, близком к реальному времени, и позволяет не только диагностировать текущее состояние, но и моделировать сценарии его изменения под действием природных и техногенных факторов. Для линейных сооружений в криолитозоне такой двойник должен объединять: геометрически точную модель рельефа и конструктивных элементов дороги; геологическую модель основания с распределением льдистости и теплофизических свойств; данные многолетнего геодезического мониторинга смещений; климатические и гидрогеологические параметры; а также численный решатель, воспроизводящий тепловые и деформационные процессы. Ядром, обеспечивающим совместную работу всех компонентов, служит единая высокоточная пространственно-временная основа, создаваемая средствами спутниковой геодезии.

Ключевым требованием к геодезическому обеспечению ЦД является возможность фиксации смещений с сантиметровой точностью в условиях практически полного отсутствия постоянно действующих базовых станций на удаленных арктических территориях. В рамках проекта, поддержанного грантом Губернатора Ямало-Ненецкого автономного округа (проект № 601-19-01/13), разработана и апробирована методика спутниково-геодезического мониторинга, опирающаяся на метод точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning) и свободно распространяемые сервисы постобработки ГНСС-данных.

Методы и материалы

Спутниково-геодезические наблюдения и их обработка. Полевые работы в рамках данного исследования выполнялись в летний период в 2024 и 2025 гг. Для создания планово-высотной геодезической сети на 23 ключевых участках авто-

дороги Сургут-Надым-Салехард, расположенных в интервале с 997 до 1 279 км, были закреплены долговременные реперы. Конструктивно реперы представляли собой анкерные болты, засверленные в бетонные блоки дорожного ограждения и болты, засверленные непосредственно в асфальтобетонное покрытие обочины. Все знаки замаркированы, сфотографированы и снабжены описанием местоположения для последующей идентификации при повторных циклах измерений.

Спутниковые геодезические наблюдения выполнялись в статическом режиме двухчастотными ГНСС-приемниками Pentax G6Ti (220 каналов, встроенные модемы, степень защиты IP68) и EFT M1 Plus. Продолжительность сеансов варьировалась от 3 до 9 часов, дискретность записи составляла 1 Гц, маска угла возвышения спутников – 5° . Ориентация антенн выверялась по северу с точностью не хуже 2° , а высота антенны измерялась дважды – до и после сеанса – с контролем сходимости.

Обработка наблюдений выполнена методом PPP с помощью онлайн-сервиса AUSPOS, поддерживаемого геонаучным центром Австралии (Geoscience Australia) [2]. Сервис использует точные эфемериды и поправки часов, предоставляемые Международной ГНСС-службой (IGS), и программное ядро Bernese GNSS Software Version 5.2, что обеспечивает определение координат в системе ITRF2020 на эпоху наблюдений с заявленной точностью около 1–3 см в плане и до 1 см по высоте при длительности сеанса свыше 6 часов. В расчетах учитывались параметры антенн (ARP – точка приведения антенны, APC – фазовый центр) согласно калибровочным файлам IGS, а также глобальная модель геоида EGM2008. Среднее удаление реперов от ближайших постоянно действующих пунктов IGS, используемых AUSPOS в качестве опорных, не превышало 800 км, что соответствует рекомендациям для PPP-обработки [3].

Воздушное лазерное сканирование и построение цифровых моделей рельефа. Параллельно с геодезическими наземными работами выполнена аэрофототопосъемка с использованием беспилотного воздушного судна вертолетного типа ВТ-30Е, оснащенного лазерным сканером АГМ-МС3 v.2. Было отснято 26 участков автодороги общей протяженностью 233 км. Полеты проводились на относительной высоте 100 м при скорости вдоль автодороги до 8 м/с и на удалении 12–15 м/с. Суммарная плотность неклассифицированного облака точек лазерных отражений составила 60–70 точек/м², после выделения класса «земля» – 5–7 точек/м², что обеспечивает детальность описания микрорельефа, достаточную для выявления локальных деформаций в виде просадок.

Обработка данных ВЛС включала уравнивание траекторий, поиск и уравнивание соответствий между перекрывающимися полосами в программном пакете AGM ScanWorks Pro, классификацию точек по типам поверхности LiDAR 360 [13], а также фотограмметрическую обработку аэрофотоснимков в Agisoft Metashape для получения ортофотопланов и цифровых моделей поверхности. По облаку точек класса «земля» построены цифровые модели рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 2–4 см. Ортофотопланы имеют разрешение 2 см/пиксель. Точность координирования облаков точек контролировалась по геодезическим реперам: средняя ошибка по координатам центров фотографирования не превысила 1,4 мм

по X , 0,2 мм по Y и 0,6 мм по Z , что говорит о высокой жесткости уравненной фотограмметрической сети.

Концепция и архитектура цифрового двойника. Разрабатываемый цифровой двойник участка автодороги (мост через реку Хойзериена) в криолитозоне представляет собой многослойную информационно-вычислительную систему, объединяющую следующие функциональные подсистемы.

1. Подсистема сбора и хранения данных, аккумулирующая результаты периодических ГНСС-измерений на реперах, данные непрерывного мониторинга с автоматических метеостанций и термометрических скважин, материалы ВЛС, а также атрибутивную информацию о конструкции дорожной одежды и геологическом строении основания.

2. Пространственно-временная основа, реализованная в виде каталога координат реперов и опорных точек в единой системе ITRF2020 с привязкой к эпохам наблюдений и оценками точности [4]. Именно эта подсистема обеспечивает совместное использование разновременных и разнородных данных в общей системе отсчета.

3. Геометрическая модель рельефа территории в виде облака точек лазерных отражений, построенная по данным ВЛС, а также трехмерных моделей инженерных сооружений (мосты, водопропускные трубы), построенных по данным лазерного сканирования комбинированным способом.

4. Теплофизическая модель в программном комплексе Frost 3D, которая на основе распределения теплофизических свойств грунтов и граничных климатических условий рассчитывает температурное поле грунтов основания и прогнозирует его динамику.

5. Подсистема анализа деформаций, сопоставляет координаты реперов, полученные в разных циклах наблюдений с применением СГА, с расчетными полями напряжений и деформаций. Это позволяет выявлять зоны риска и тренды смещений.

Все компоненты объединены в ГИС-проекте в программном комплексе QGIS, где ключевым связующим элементом выступает высокоточная геодезическая основа. Без нее невозможно корректно совместить облака точек, полученные в разные годы и организовать мониторинг динамики деформаций.

Результаты

Пространственно-временная основа цифрового двойника. В результате обработки ГНСС-наблюдений получены координаты 23 реперов. Для каждого пункта сервис AUSPOS выдает полную ковариационную матрицу, что позволяет корректно оценивать точность и использовать ее при последующем уравнивании сети.

Средняя квадратическая погрешность (СКП) определения плановых координат по всей сети составила 8 мм, высотных – 20 мм, что соответствует требованиям ГОСТ Р 59562–2021 к топографическим съемкам масштаба 1:500 и обеспечивает надежную основу для мониторинга деформаций [3]. Полученная

точность характерна для PPP-обработки при длительности сеансов более 3 часов и удалении от пунктов IGS в пределах 1 000 км.

Важно отметить, что все 23 репера были объединены в единую сеть путем совместного уравнивания векторов, полученных по PPP, с фиксацией одного наиболее надежного пункта. Это позволило дополнительно повысить внутреннюю согласованность сети: относительные ошибки между соседними реперами не превысили 5 мм в плане и 12 мм по высоте.

Интеграция с ВЛС, построение ЦМР и теплофизическое моделирование участка автодороги Надым-Салехард с мостом через реку Хойзериена. Цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная по данным воздушного лазерного сканирования (ВЛС), является геометрической основой для создания теплофизической модели участка автодороги Надым-Салехард с мостом через реку Хойзериена.

На основе классифицированных облаков точек (класс «земля») после уравнивания по геодезическим реперам была построена ЦМР с регулярным шагом 0,5 м. (рисунок 1). Пространственное разрешение итоговых ЦМР составило 2–4 см, отклонения от контрольных точек на реперах не превысили 3 см.

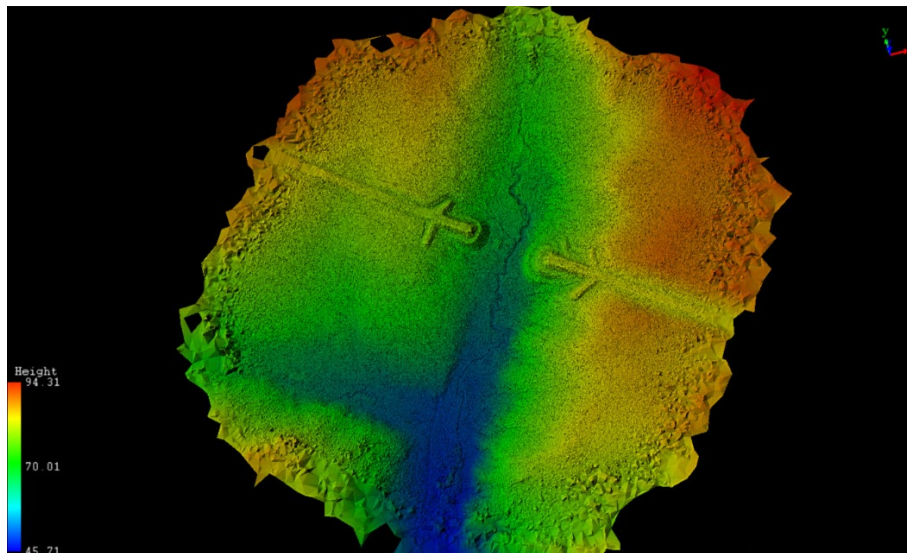


Рис. 1. Цифровая модель рельефа участка исследований с регулярным шагом 0,5 м

Полученная ЦМР импортирована в программный комплекс Frost 3D для построения трехмерной теплофизической модели.

Решалась нестационарная задача распространения тепла в трехмерном пространстве в программе Frost.Termo, основанная на широком апробированном уравнении теплопроводности (1), в котором учтены фазовые превращения и перенос тепла за счет конвекции [5]:

$$\left(C(T) + p_d L \frac{\partial W_w(T)}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda(T) \nabla T) + C_w u \nabla T = 0, \quad (1)$$

где T – температура, °C; $C(T)$ – объемная теплоемкость грунта, Дж/(м³·°C); $w_w(T)$ – содержание незамерзшей воды, д.е.; ρ_d – плотность скелета грунта, кг/м³; L – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; $\lambda(T)$ – теплопроводность, Вт/(м·°C); C_w – объемная теплоемкость воды, Дж/(м³·°C); u – вектор скорости фильтрации, м/с.

Для выполнения корректного моделирования требуется комплекс исходной информации: 1) геометрия модели и геологическое строение: задаются размеры расчетной области и пространственное распределение инженерно-геологических элементов (ИГЭ) [6] через сетку виртуальных скважин или поверхностей, 2) теплофизические свойства грунтов: для каждого ИГЭ необходимо задать параметры, определяющие его поведение при промерзании-оттаивании: плотность скелета грунта, ρ_d , г/см³, суммарная влажность, W_{tot} , д. е., теплопроводность в талом (λ_{th}) и мерзлом (λ_f) состояниях, Вт/(м·°C), объемная теплоемкость в талом (C_{th}) и мерзлом (C_f) состояниях, Дж/(м³·°C), параметры для построения кривой незамерзшей воды (температура начала замерзания T_{bf} , влажность на границе раскатывания W_p , число пластичности I_p), 3) климатические воздействия: на верхнюю границу модели задаются граничные условия, отражающие теплообмен с атмосферой: – многолетний ход температуры воздуха (среднемесячные или суточные значения). – высота и плотность снежного покрова по месяцам, – скорость ветра для расчета коэффициента конвективного теплообмена, – возможен учет долгосрочного климатического тренда (например, линейное повышение среднегодовой температуры), 4) начальное температурное поле: распределение температуры в грунтовом массиве на начальный момент времени. Задается по данным термометрических скважин или как результат предварительного стационарного расчета, 5) граничные условия на боковых и нижней границах: как правило, задаются условия адиабатичности (нулевой тепловой поток) или постоянного геотермического градиента, 6) параметры сооружений и инженерных мероприятий: при необходимости в модель включаются фундаменты, теплоизоляционные экраны, сезоннодействующие охлаждающие устройства (термосифоны), трубопроводы с заданными теплофизическими свойствами материалов.

На рисунке 2.а и 2.б представлены результаты моделирования. На 15 октября 2024 г. – четко видно распространение многолетней мерзлоты (голубые тона).

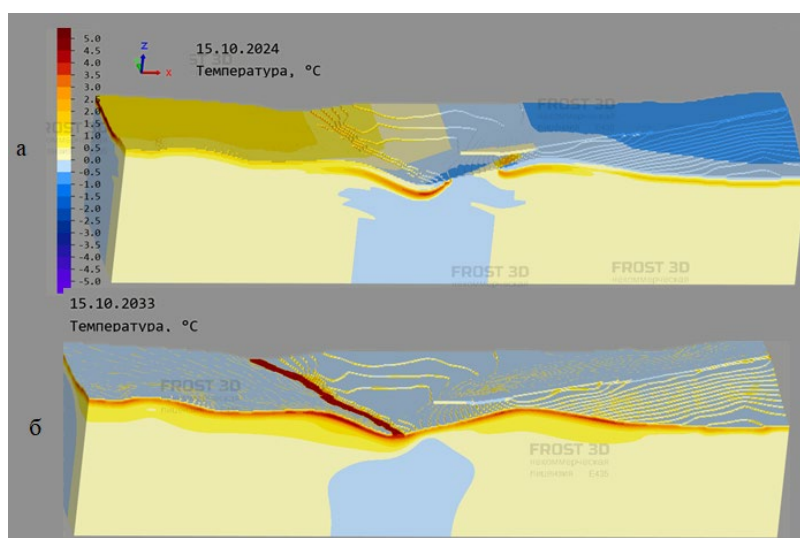


Рис. 2. Распределение потока тепла на середину октября 2024 г. (а) и прогноз температурных условий на изучаемом участке в октябре 2033 г (б)

Прогнозное моделирование до 2033 г. с учетом тренда повышения среднегодовой температуры воздуха ($+0,05$ °C/год) показало постепенную деградацию островной мерзлоты: к 2033 г. кровля мерзлоты опускается, а талик под руслом реки расширяется (рис.2.б). На рис. 3 приведены температурные профили в скважине у опоры моста на 2024 и 2033 гг., полученные в результате расчета на геометрической основе, заданной ЦМР.

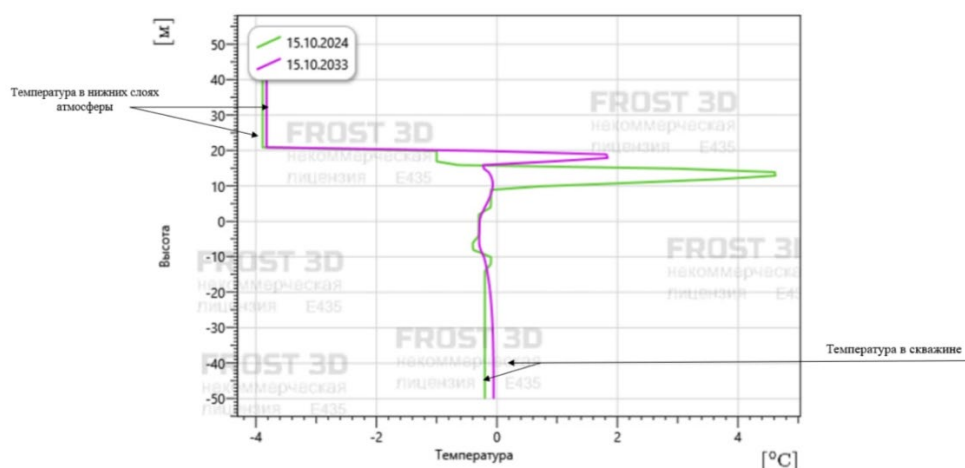


Рис. 3. Распределение температуры в скважине на середину октября 2024 и прогноз на октябрь 2033 г.

Таким образом, использование ЦМР высокого разрешения, построенной по данным ВЛС и привязанной к геодезической сети, обеспечивает геометрическую основу для теплофизического моделирования. Совместный анализ деформаций дорожного полотна и прогнозных изменений температурного поля мерзлоты

позволяет идентифицировать участки, критически уязвимые к криогенным процессам, и обосновывать инженерные мероприятия по стабилизации земляного полотна.

Обсуждение

Достигнутая точность геодезической сети (8 мм в плане) дает возможность в перспективе перейти к непрерывному ГНСС-мониторингу на части реперов, обеспечивая динамическую актуализацию цифрового двойника. Геодезическая основа выполняет роль каркаса, связывающего разновременные наблюдения: координаты реперов служат референсными точками для уравнивания облаков точек ВЛС, калибровки теплофизической модели и формирования единого базиса для расчета смещений.

Заключение

В 2024–2025 гг. на автодороге Надым-Салехард создана сеть из 23 реперов, координаты которых определены с точностью 8 мм (план) и 10 мм (высота) методом PPP (сервис AUSPOS). На примере моста через р. Хойзериена выполнено теплофизическое моделирование во Frost 3D с прогнозом деградации мерзлоты до 2033 г. (при тренде на потепление).

Разработана архитектура цифрового двойника, в котором спутниковая геодезия является системообразующим элементом, объединяющим данные ВЛС, мониторинга и численных расчетов. Прототип двойника позволяет анализировать текущее состояние объекта и делать прогнозные сценарии. Дальнейшее развитие предполагает переход к непрерывному ГНСС-мониторингу, использование машинного обучения для классификации деформаций и ассимиляцию измерений в теплофизическую модель, что обеспечит предиктивное управление инфраструктурой в криолитозоне.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Губернатора ЯНАО (проект № 601-19-01/13). Авторы благодарят Научный центр изучения Арктики (г. Салехард) за предоставленные данные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Земцов А. А. Геоморфология Западно-Сибирской равнины (северная и центральная часть). Томск: Изд-во Том. ун-та, 1976. 344 с.
2. AUSPOS. Online GPS Processing Service [Электронный ресурс]. – URL: <https://gnss.ga.gov.au/auspos> (дата обращения: 14.05.2026).
3. ГОСТ Р 59562-2021. Съёмка аэрофототопографическая. – М.: Стандартинформ, 2021. – 35 с.
4. Ерофеев А. А., Шкуренок А. Р., Саломаха М. А., Хон А. В., Шемяков С. С. Динамика рельефа автодороги Надым-Салехард по данным воздушного лазерного сканирования и геодезического контроля // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625045.
5. FROST 3D [Электронный ресурс] // frost3d.ru: [сайт]. – URL: <https://frost3d.ru/>

6. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий на объекте «Мост через реку Хойзериена», Научный центр изучения Арктики, Салехард, 2025.
7. Шкуренко А. Р., Ерофеев А. А., Еремеев В. Ф., Хон А. В., Шемяков С. С. Материалы плано-высотного геодезического обоснования лазерного сканирования автодороги Надым-Салехард // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625731.
8. ГОСТ Р 57700.37-2021. Численное моделирование физических процессов. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 15 с.
9. Долгополов Д. В., Баборыкин М. Ю., Жидиляева Е. В., Мелкий В. А. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2 (52). – С. 25–34.
10. Валишев Ф. Р., Ерофеев А. А., Шемяков С. С., Хон А. В., Погребняк С. Д. Каталог экзогенных процессов рельефообразования у основания автодороги Надым-Салехард // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026620409.
11. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. – LLC, 2015. – 32 p.
12. IGS – International GNSS Service [Электронный ресурс]. – URL: <http://igs.org> (дата обращения: 14.05.2026).
13. LiDAR360 V5.0 User Guide [Электронный ресурс]. – URL: <https://greenvalleyintl.com> (дата обращения: 14.05.2026).

© Ф. Р. Валишев, С. С. Шемяков, А. А. Ерофеев, 2026