

Д. В. Долгополов¹✉, А. Г. Ахундов¹, А. А. Ахундова²

Трехмерное геоинформационное моделирование объектов магистрального трубопровода при геотехническом мониторинге

¹ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта»,
г. Москва, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации», г. Москва, Российская Федерация
e-mail: DolgopolovDV@transneft.ru

Аннотация. Рассматривается опыт трехмерного геоинформационного моделирования объектов магистральных трубопроводов по данным лазерного сканирования. Данная тема актуальна, в частности, для задач мониторинга магистральных трубопроводов, решаемых в процессе их строительства и эксплуатации. Предлагаемый подход трехмерного геоинформационного моделирования основан на принципе унификации и создании иерархического классификатора объектов моделирования. Приводятся описание методических подходов и результаты моделирования объектов магистрального трубопровода разного уровня проработки от минимального уровня (LOD 100) до максимального уровня проработки (LOD 500). Рассмотрен вопрос автоматизированной обработки материалов дистанционного зондирования земли с использованием инструментов искусственного интеллекта, в том числе для решения кадастровых и землеустроительных работ. Делается вывод о том, что трехмерные геоинформационные модели позволяют осуществлять контроль геометрии и пространственного положения объектов трубопроводного транспорта в процессе их строительства и эксплуатации, оценивать динамику изменений, а также могут быть использованы при формировании инженерных цифровых моделей местности.

Ключевые слова: трехмерное геоинформационное моделирование; магистральный трубопровод; геоинформационная система; лазерное сканирование; цифровая модель объекта

D. V. Dolgopolov¹✉, A. G. Akhundov¹, A. A. Akhundova²

Three-dimensional geoinformation modeling of main pipeline facilities during geotechnical monitoring

¹Pipeline Transport Institute, LLC (Transnet R&D, LLC), Moscow, Russian Federation

²Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration,
Moscow, Russian Federation
e-mail: DolgopolovDV@transneft.ru

Abstract. The experience of 3D geoinformation modeling of trunk pipeline objects based on laser scanning data is considered. This topic is relevant, in particular, for the tasks of monitoring trunk pipelines during their construction and operation. The proposed approach of three-dimensional geoinformation modeling is based on the principle of unification and creation of a hierarchical classifier of modeling objects. Description of methodological approaches and results of modeling of pipeline objects of various levels of development from the minimum level (LOD 100) to the maximum level of development (LOD 500) are given. The issue of automated processing of earth remote sensing materials using artificial intelligence tools, including for solving cadastral and land management works, was considered. It is concluded that three-dimensional geoinformation models make it possible to control the geometry and spatial

position of pipeline transport facilities during their construction and operation, assess the dynamics of changes, and can also be used in the formation of engineering digital models of the area.

Keywords: three-dimensional geoinformation modeling; main pipeline; geoinformation system; laser scanning; digital model of the object

Введение

В настоящее время методы и технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) получили стремительное развитие. Стали доступными для использования при проведении мониторинга такие технологии как воздушное и наземное лазерное сканирование, цифровая аэрофотосъемка с использованием беспилотных авиационных систем.

Данные ДЗЗ, получаемые в процессе строительства и эксплуатации объектов магистральных трубопроводов (МТ), дают возможность осуществить оперативный анализ текущего состояния природно-технических систем и оценить динамику изменений, а в ряде случаев спрогнозировать будущее состояние. Для проведения пространственного анализа используются данные ДЗЗ, например, облака точек лазерного отражения (ТЛО), пространственная растровая и векторная информация, а также трехмерные цифровые модели объектов, рельефа и местности, которые получают по данным цифровой аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования (рис. 1).

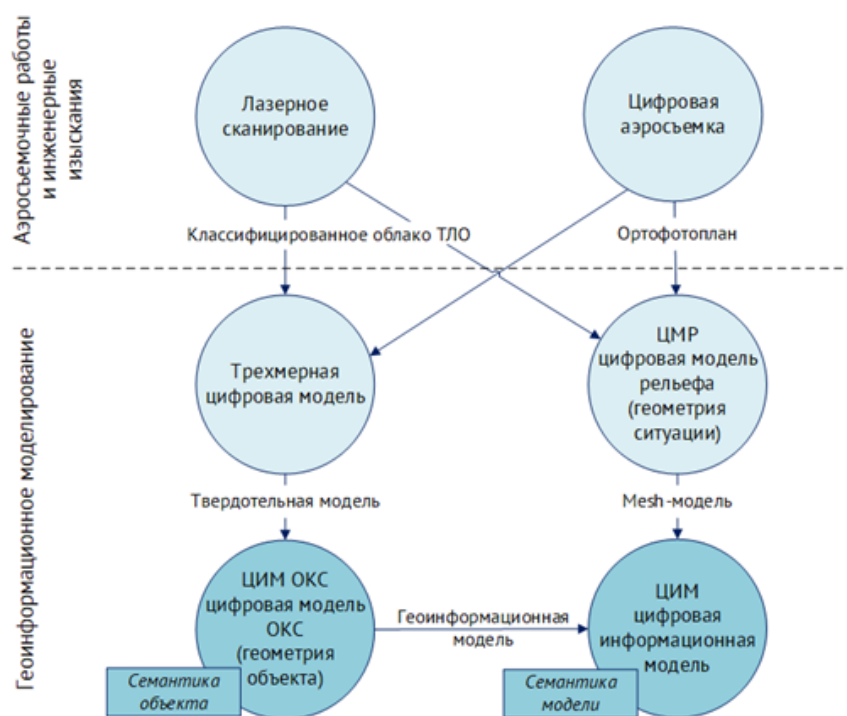


Рис. 1. Схема формирования цифровой модели местности

Актуальным направлением исследований в области мониторинга трубопроводных систем является развитие методических основ и технологических решений создания трехмерных геоинформационных моделей объектов МТ для решения прикладных задач.

Методы и материалы

Цифровой основой геотехнического мониторинга МТ является актуальная цифровая информационная модель, которая строится по данным лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки, а также данным внутритрубной диагностики и инструментальных измерений.

Чтобы обеспечить возможности создания трехмерных цифровых моделей, совместное использование пространственных данных, полученных различными средствами, необходимо сформировать единое геоинформационное пространство объекта МТ, которое в том числе обеспечивает возможность сравнения данных мониторинга за разные периоды мониторинга с целью выявления динамики протекающих процессов.

Для работы с пространственными данными, информацией и моделями используют геоинформационные системы (ГИС) с возможностью трехмерной визуализации [1]. Такие ГИС-системы используют для анализа изменений на объектах МТ и выработки рекомендации по предупреждению негативных процессов. Особенности ГИС геотехнического мониторинга являются: многомерное моделирование объектов МТ, создание математических моделей исследуемых процессов, использование эффективных численных алгоритмов и специализированных программных модулей при прогнозе и анализе [2].

Основой таких ГИС являются цифровая информационная модель объекта геотехнического мониторинга, которая строится с использованием цифровых моделей объектов МТ и цифровой модели рельефа (рис. 2).

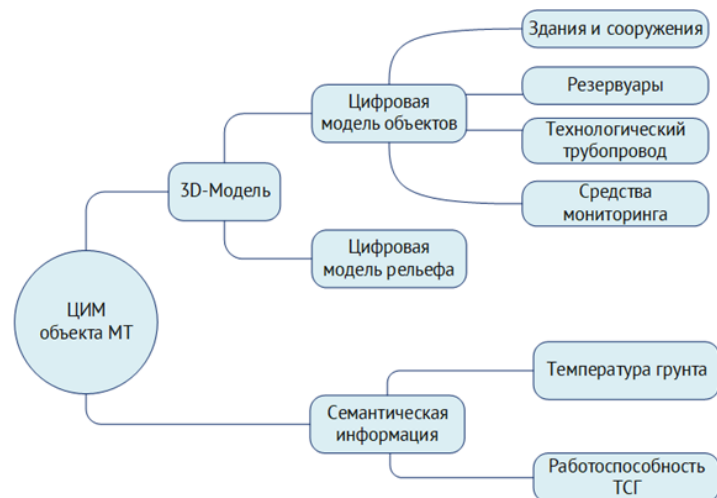


Рис. 2. Структурная схема формирования проекта в 3D - ГИС

В зависимости от прикладных задач ГИС с возможностью 3D-визуализации наполняют данными, информацией и моделями, совместное использование которых обеспечивается за счет использования единого геопространства [3].

Трехмерные геоинформационные модели, построенные по материалам обследований объектов МТ, позволяют осуществлять контроль геометрии и пространственного положения технических и природных объектов, оценивать ди-

намику изменений, по данным нескольких циклов мониторинга, а также могут быть использованы при комплексном анализе данных геотехнического мониторинга с использованием проектных, кадастровых и иных данных.

Ключевым принципом, которым руководствуются при трехмерном геоинформационном моделировании технологических объектов является принцип унификации. Принцип унификации предполагает, во-первых, создание базисных элементов, а во-вторых, обязательную классификацию объектов моделирования [4-6].

Результаты

Методические подходы создания трехмерных геоинформационных моделей объектов МТ предполагают формирование нескольких вариантов одного объекта моделирования с разной степенью проработки, обозначаемом как LOD (от англ. Level of Development). Определив степень проработки (детализации), мы можем оптимизировать работы по созданию трехмерной цифровой модели исходя из ее назначения или решаемой задачи.

Предлагаемая нами методика трехмерного геоинформационного моделирования предполагает уровни детализации объекта МТ от минимального (LOD 100), который используется, например на этапе предпроектного обследования, до максимальных уровней (LOD 400 – LOD 500).

На рисунке 3 представлен пример трехмерной цифровой модели строения с уровнем детализации LOD 300. Несмотря на упрощенный вид модель с таким уровнем детализации может найти свое применение. Например, при теплофизических расчетах нефтеперекачивающей станции.

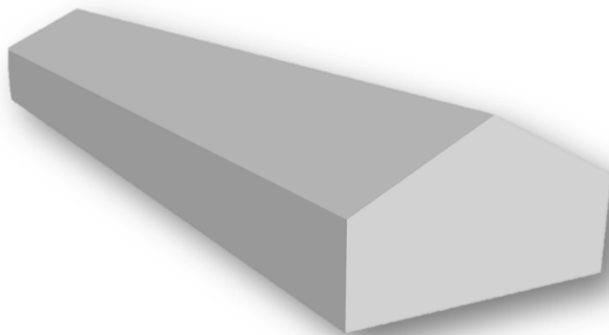


Рис. 3. Трехмерная цифровая модель строения с уровнем детализации LOD 300

Уровень детализации LOD 400 является высокодетальным и может использоваться на этапе строительства для задач строительного контроля, реконструкции, а также при мониторинге объектов МТ для контроля их геометрических параметров (рис. 4).

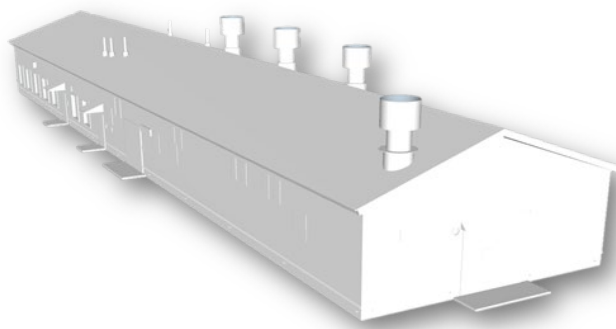


Рис. 4. Трехмерная цифровая модель строения с уровнем детализации LOD 400

Трехмерные цифровые модели с уровнем детализации LOD 500 – это высокодетальные текстурированные цифровые модели, которые используются при формировании корпоративных геоинформационных систем, при создании обучающих тренажеров с дополненной реальностью (рис. 5).



Рис. 5. Трехмерная цифровая модель строения с уровнем детализации LOD 500

Уровень LOD 500 используется, когда требуется максимальное соответствие модели местности, для чего для текстурирования используется фотоизображения, полученные в процессе полевых обследований.

При создании моделей высокой детализации как на этапе проектирования, так и при создании геоинформационных моделей по результатам ДЗЗ часто встает вопрос об информационном наполнении модели, обозначаемом как LOI (от англ. Level of Information). Это атрибутивная информация, которая привязана к геоинформационной модели.

Обсуждение

Выбор уровня проработки трехмерных геоинформационных моделей определяется исходя из требований решаемых задач. Например, для раннего обнаружения

и оценки изменений на площадном объекте МТ используются данные наземного лазерного сканирования, обработка которых позволяет построить трехмерные модели рельефа и местности с точностью первых сантиметров. Однако трудоемкость ручной обработки снижает оперативность проведения анализа и принятия решений, что может быть опасным в случае быстрого развития процессов.

Перспективным направлением решения задачи уменьшения трудоемкости трехмерного моделирования является автоматизация процесса обработки данных ДЗЗ (облаков точек лазерного отражения и фотограмметрических облаков) с помощью методов и технологий искусственного интеллекта (ИИ), в том числе компьютерного зрения. Алгоритмы ИИ позволяют определить объекты инфраструктуры в облаке точек по их пространственному положению и геометрии формы. Применение таких инструментов позволяет структурировать данные ДЗЗ, обеспечив оперативную обработку пространственных данных. Похожие инструменты разработаны и используются отечественными учеными для задач мониторинга земель, а также при анализе кадастровой информации [7, 8].

В настоящее время активно развиваются алгоритмы автоматизированной обработки ТЛЮ с целью создания твердотельных моделей зданий и сооружений с использованием геометрических примитивов. Кроме этого, алгоритмы компьютерного зрения способны выявить изменения в облаке точек, полученные за разные циклы мониторинга, с последующей оценкой потенциальной опасности динамики изменений. Такой переход от ручной обработки к автоматизированной позволяет сократить время обработки данных лазерного сканирования больших объемов, получаемых в процессе геотехнического мониторинга [9].

Программная реализация и интеграция в ГИС алгоритмов автоматической обработки данных ДЗЗ кратно повышает эффективность системы мониторинга на основе данных наземного и воздушного лазерного сканирования. Внедрение подобных решений позволяет повысить надежность эксплуатации МТ за счет возможности оперативной обработки данных лазерного сканирования объектов мониторинга.

Заключение

Объекты магистрального трубопровода на протяжении всего жизненного цикла (в процессе строительства, реконструкции и эксплуатации) претерпевают изменения и требуют постоянного мониторинга. Особенно это актуально на этапах строительства и эксплуатации объектов МТ в сложных природно-климатических условиях.

Использование геоинформационных моделей в процессе строительства, реконструкции и эксплуатации МТ способствует повышению их надежности, снижению вероятности аварий и катастроф, позволяют прогнозировать и оценивать возможные негативные события.

Современные ГИС обеспечивают функциональные возможности работы с цифровыми информационными моделями в трехмерном виде, при этом данные ДЗЗ в виде фотограмметрического облака и ТЛЮ используют как для моделирования, так и для дополнения уже существующих моделей. Информация в растровом виде

(аэрокосмические изображения) могут использоваться для текстурирования поверхности, а модели, построенные на этапе проектирования (в том числе в формате BIM) сравнивают с трехмерными моделями объектов МТ при проведении контроля «план»/ «факт». Трехмерные пространственные данные востребованы при геотехническом мониторинге для анализа опасных геологических процессов и в процессе реконструкции для контроля фактически выполненных работ, по облакам точек, в частности, можно рассчитать объем сыпучих масс [10].

И наконец, трехмерные геоинформационные модели востребованы для теплотехнических расчетов и при проведении прочностного анализа объектов мониторинга, когда осуществляется моделирование деформирования объекта мониторинга или его локального участка. Результаты физико-математического моделирования позволяют не только оценить текущее состояние объектов мониторинга, но и дают прогноз их состояния в будущем с учетом заложенных в расчетную модель параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 3D-ГИС для сопровождения работ по геотехническому мониторингу объектов магистральных трубопроводов / Е. М. Макарычева, Т. И. Кузнецов, С. А. Половков [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10, № 4. – С. 342-351.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662316 Российская Федерация. Программно-расчетный модуль расчета прочности и устойчивости трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами: № 2019661275: заявл. 13.09.2019: опубл. 20.09.2019 / С. Н. Чужин, А. А. Захаров, Т. И. Кузнецов [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть» (ПАО «Транснефть»), Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»), Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Восток» (ООО «Транснефть – Восток»), Акционерное общество "Транснефть - Сибирь" (АО "Транснефть - Сибирь"), Общество с ограниченной ответственностью "Транснефть - Дальний Восток" (ООО "Транснефть – Дальний Восток").

3. Аврунев, Е. И. Принципы формирования единого геопространства территорий / Е. И. Аврунев, А. П. Карпик, В. А. Мелкий // Проблемы геологии и освоения недр : Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина: в 2х томах, Томск, 08–12 апреля 2019 года. Том 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 428-429.

4. Построение трехмерных моделей объектов магистрального трубопровода по данным лазерного сканирования для формирования границы отвода земель / Д. В. Долгополов, Т. И. Кузнецов, А. Г. Ахундов [и др.] // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2025. – Т. 30, № 4. – С. 117-130. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-117-130.

5. Долгополов Д. В. Теоретическое обоснование принципов формирования геопространственных моделей трубопроводных систем // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2022. – Т. 66. – № 5. – С. 87–97.

6. Майоров А. А., Цветков В. Я., Андреева О. А. Трехмерное геоинформационное моделирование при массовом сборе информации // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – № 2. – С. 229–236

7. Немирский, И. В. Разработка алгоритма обнаружения пересечений объектов недвижимости в 3D-кадастре / И. В. Немирский, Т. А. Тихонов, Д. А. Гура // Современные проблемы и перспективы развития земельно-имущественных отношений: Сборник статей по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции, Краснодар, 24 апреля 2025 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2025. – С. 231-236.

8. Методика использования воздушного лазерного сканирования и нейросетевых технологий для обеспечения достоверными пространственными данными кадастра недвижимости / Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, С. В. Самарин, Д. А. Беспятчук // Геодезия и картография. – 2025. – Т. 86, № 6. – С. 54-63.

9. Долгополов, Д. В. Моделирование объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования / Д. В. Долгополов // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84, № 5. – С. 43-51.

10. Палехова, Е. О. Реализация математического алгоритма определения объема объекта, не имеющего «нависания», по данным лазерного сканирования / Е. О. Палехова, Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2025. – Т. 30, № 1. – С. 66-76. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-66-76. – EDN NCOIGH.

© Д. В. Долгополов, А. Г. Ахундов, А. А. Ахундова, 2026