

Т. И. Кузнецов¹, Д. В. Долгополов^{1✉}, А. И. Барышев¹

Мониторинг трасс магистральных трубопроводов с использованием средств воздушного лазерного сканирования и дифференциальной подсистемы ГНСС

¹Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта,
г. Москва, Российская Федерация
e-mail: DolgopolovDV@niitnn.transneft.ru

Аннотация. Рассматривается опыт применения цифровой аэросъемки (ЦАФС) и воздушного лазерного сканирования (ВЛС) для задач мониторинга магистральных трубопроводов (МТ) с использованием дифференциальной подсистемы ГНСС. Данный подход актуален при организации геотехнического мониторинга магистральных трубопроводов, расположенных в условиях криолитозоны на значительных по протяженности, труднодоступных территориях. В статье приводится описание методики геотехнического мониторинга с использованием технологий цифровой аэросъемки и ВЛС. Методика обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предусматривает получение цифровой модели рельефа (ЦМР), а также ортофотоплана для выявления и мониторинга опасных геологических процессов в коридоре трассы трубопровода. Помимо этого для исследования коридора трассы создают серию производных карт с на коридор трассы 150-300 м. Приводится сравнение результатов двух циклов мониторинга трубопровода, полученных с использованием дифференциальной подсистемы ГНСС и без. Делается вывод о целесообразности развертывания дифференциальной подсистемы ГНСС на объектах мониторинга.

Ключевые слова: воздушно-лазерное сканирование; геотехнический мониторинг; дифференциальная подсистема ГНСС; магистральный трубопровод; экзогенные геологические процессы

T. I. Kuznetsov¹, D. V. Dolgopolov^{1✉}, A. I. Baryshev¹

Monitoring of main pipeline routes using airborne laser scanning and the GNSS differential subsystem

¹ Pipeline Transport Institute, LLC (Transnet R&D, LLC), Moscow, Russian Federation
e-mail: DolgopolovDV@niitnn.transneft.ru

Abstract. The experience of using digital aerial photography (DAFS) and airborne laser scanning (VLSI) for monitoring main pipelines (MT) using the differential GNSS subsystem is considered. This approach is relevant in the organization of geotechnical monitoring of main pipelines located in cryolithozone conditions in significant, inaccessible territories. The article describes the methods of geotechnical monitoring using digital aerial photography and radar technologies. The Earth remote sensing (DZ) data processing technique provides for obtaining a digital relief model (DEM), as well as a photo plan for identifying and monitoring hazardous geological processes in the pipeline route corridor. For this purpose, to explore the corridor of the route, a series of lead maps are created from the corridor of the route 150-300 m. The results of two pipeline monitoring cycles obtained using the differential GNSS subsystem and without are compared. The conclusion is made about the expediency of deploying the differential GNSS subsystem at monitoring facilities.

Keywords: airborne laser scanning (LIDAR); geotechnical monitoring; differential subsystem of GNSS; trunk pipeline; exogenous geological processes

Введение

Для обеспечения безопасной эксплуатации объектов магистральных трубопроводов организуется геотехнический мониторинг в рамках которого решаются задачи контроля состояния системы «трубопровод – окружающая среда», в том числе разработки компенсирующих мероприятий на участках выявленных отклонений системы от проектных значений. В процессе геотехнического мониторинга осуществляется сбор, обработка и анализ данных о фактическом состоянии магистральных трубопроводов и природной среды, а также моделирование протекающих процессов и прогноз их развития [1–6]. При организации мониторинга особое внимание уделяется контролю планово-высотного положения объекта, а также возникновению и развитию экзогенных геологических процессов (ЭГП), так как изменение планово-высотного положения трубопровода (чаще всего, связанного с ЭГП) могут вызвать рост напряжений и деформаций вплоть до предельных значений и, как следствие, потерю устойчивости и разрушение конструкции.

С развитием средств дистанционного зондирования мониторинг трасс магистральных трубопроводов все чаще осуществляют с использованием средств воздушного лазерного сканирования [7–12]. При этом как правило для протяженных линейных объектов трубопроводных систем существует проблема взаимной увязки данных разных циклов измерений, что требует решение задачи по геодезическому обеспечению (координатному и высотному), которая решается путем создания единого координатного пространства для объекта мониторинга на весь срок эксплуатации объекта для чего может быть развернута дифференциальная подсистема ГНСС.

Методы и материалы

С целью формирования единого координатного пространства на объектах геотехнического мониторинга ПАО «Транснефть» развернута дифференциальная подсистема ГНСС, представленная в виде местных автоматизированных геодезических сетей (далее – МАГС) для геодезического обеспечения геотехнического мониторинга [13]. МАГС обеспечивает возможности работы в следующих системах координат: МСК, WGS-84. МАГС представляет собой сеть постоянно-действующих референцных станций, объединенных посредством каналов связи с центром хранения и обработки геодезических данных. Рекомендованное расстояние между референцными станциями не более 40 км (рисунок 1).

МАГС обеспечивает среднюю квадратическую погрешность определений:

- в режиме «Статика» и «Быстрая статика», не более: 5 мм + 0,5 мм/км в плане и 10 мм + 0,5 мм/км по высоте;

- в режиме непрерывной кинематики, в режиме «стой-иди» с последующей обработкой и режиме «RTK», не более: 10 мм + 1,0 мм/км в плане и 20 мм + 1,0 мм/км по высоте.

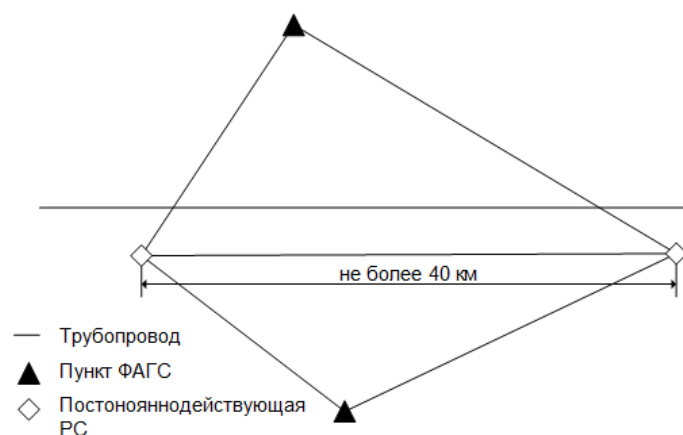


Рис. 2.Схема расположения референционных станций МАГС

При осуществлении геотехнического мониторинга наличие постоянно действующих референционных станций дает следующие преимущества:

- оптимизация состава работ при проведении воздушного лазерного сканирования;
- возможность круглосуточной работы;
- обеспечение безопасности и снижение рисков;
- создание единой платформы для сбора, хранения и анализа данных геодезических наблюдений;
- использование в работе современных ГНСС – методов и технологий получения координатно-высотных решений;
- исключение влияния человеческого фактора;
- снижение трудовых затрат на выполнение геодезических измерений.

Ключевыми задачами мониторинга трубопроводов являются:

- 1) определение пространственного положения трубопровода;
- 2) выявление, мониторинг и анализ опасных геологических, которые являются основным фактором потенциального влияния на изменение пространственного положения трубопровода.

Результаты

Магистральные трубопроводы характеризуются значительной протяженностью на труднодоступных территориях с распространением многолетних мерзлых грунтов. Что потребовало от ООО «НИИ Транснефть» поиска и апробации метода мониторинга, обеспечивающего:

- мониторинг протяженных трасс магистральных трубопроводов;
- выполнение полевых работ в короткие сроки;
- минимальное участие полевых бригад в наземных геодезических работах;
- точность и объективность информации о рельефе и пространственном положении объектов;

- сокращение влияния человеческого фактора при проведении обследований и обработке результатов измерений;
- полноту информации для оценки динамики экзогенных геологических процессов и перемещений грунта и объектов трубопровода;
- возможность автоматизации обработки результатов измерений;
- получение массива данных, необходимого и достаточного для разработки технических решений, направленных на повышение устойчивости трубопровода и обеспечение эффективной инженерной защиты.

В настоящее время геотехнический мониторинг на объектах МТ выполняется с использованием технологий цифровой аэросъемки и ВЛС. Накоплен богатый практический опыт проведения аэросъемочных работ и работ по геоинформационному обеспечению геотехнического мониторинга [14–16]. Методика обработки данных ВЛС предусматривает получение цифровой модели местности и цифровой модели рельефа (ЦМР) со средней плотностью ТЛО более 20 точек/м², а также ортофотоплана высокого пространственного разрешения (0,4 см) и плановой точности не менее 25 см. Помимо этого для исследования коридора трассы в процессе обработки данных мониторинга получают серию производных карт с шириной коридора 150–300 м.

В процессе исследования была разработана методика обработки и анализа результатов воздушного лазерного сканирования и цифровой аэросъемки, которая обеспечивает:

- дешифрирование объектов линейной части МТ (УОВ, УЗА, опоры ЛЭП, опоры МТ) [17, 18];
- определение пространственного положения объектов линейной части МТ;
- определение изменений пространственного положения объектов линейной части МТ между циклами мониторинга;
- выявление новых проявлений ЭГП;
- выявление динамики ЭГП между циклами мониторинга (изменение площади, глубины или высоты).
- классификация выявленных опасных геологических процессов;
- количественная оценка динамики проявлений ЭГП, произошедших за период между циклами мониторинга (ВЛС).

Для автоматизации процесса обработки результатов ВЛС разработаны и внедрены программные модули: автоматизированного анализа планово-высотного положения объектов МТ, а также автоматизированного анализа параметров сложных геологических условий расположения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС [19, 20] (рисунок 2).

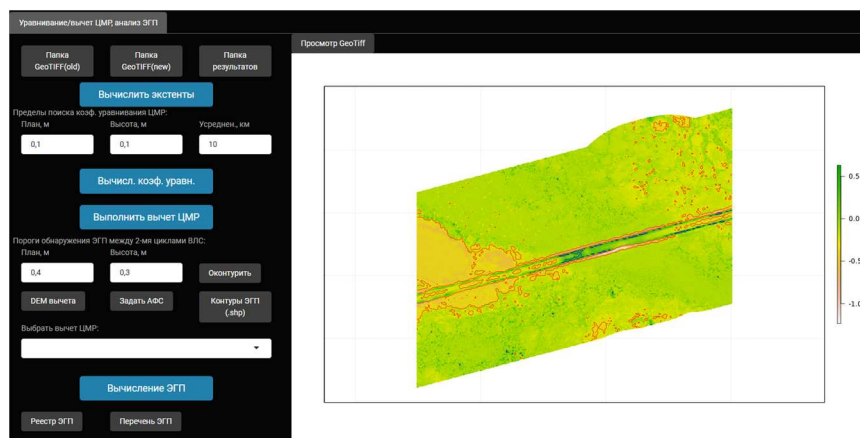


Рис.3. Автоматизированное выявление ЭГП в разработанном программном модуле [20]

Мониторинг средствами ВЛС осуществлялся для линейной части магистральных трубопроводов протяженностью более 6000 км. В процессе работы были получены следующие результаты:

- осуществлен контроль планово-высотного положения участков линейной части МТ на ММГ для более 6600 УОВ;
- проведен контроль отклонений от вертикали более 100 000 опор ЛЭП;
- выявление более 5 500 проявлений ЭГП в коридоре трассы МТ.

В процессе проведения геотехнического мониторинга магистральных трубопроводов средствами ВЛС накоплен существенный опыт, который позволяет судить о целесообразности развития местных автоматизированных геодезических сетей. На рисунке 3 приведены результаты взаимной увязки данных разных циклов мониторинга трубопровода средствами ВЛС в отсутствии МАГС, которые иллюстрируют ошибку между измерениями.

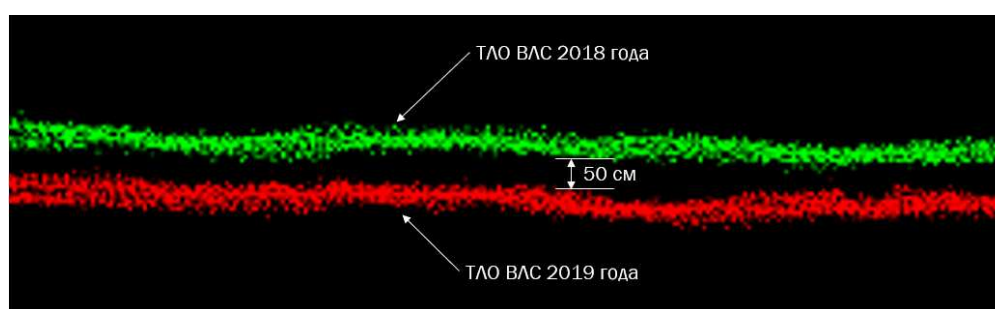


Рис. 3. Результаты сравнения ТЛО по данным ВЛС 2018–2019 гг. в отсутствии МАГС до применения системы уравнивания

Опыт обследований методом ВЛС на участках применения МАГС за последние 6 лет подтвердил, что использование МАГС повышает точность и достоверность определения ПВП объектов МТ, положения опор ЛЭП и оценки ди-

намики природной среды, а также оптимизацию работы на подготовку планово-высотного геодезического обеспечения ВЛС.

Заключение

Современные программные средства позволяют автоматизировать процесс обработки данных ВЛС с целью определения планово-высотного положения объектов МТ, параметров сложных геологических условий расположения объектов МТ и оценки их динамики. Это позволяет оптимизировать камеральные работы и минимизировать человеческий фактор при анализе результатов ВЛС, что повышает оперативность и достоверность получаемых результатов.

Разработанные ООО «НИИ Транснефть» подходы к организации геотехнического мониторинга с использованием средств ВЛС являются универсальными и могут быть применены на других протяженных линейных объектах для обеспечения их безопасной эксплуатации.

Перспективы развития дистанционных методов мониторинга на магистральных трубопроводах заключаются в создании дифференциальной подсистемы ГНСС на объектах мониторинга, а также в развитии автоматизированных средств обработки результатов лазерного сканирования протяженных трасс МТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макарычева, Е. М. методика районирования территории протяженных линейных объектов по условиям формирования термокарста / Е. М. Макарычева, В. П. Мерзляков, О. К. Миронов // Криосфера Земли. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 58–66. – DOI 10.15372/KZ20230106. – EDN OWALQR.
2. Макарычева Е. М., Ибрагимов Э. Р., Кузнецов Т. И., Шуршин К. Ю. Применение воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга объектов магистрального трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов: ООО «Транснефть-Медиа», Т. 9. – № 1. – Москва, 2019. – С. 21–31.
3. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте / Д. В. Долгополов, М. Ю. Бабoryкин, Е. В. Жидиляева, В. А. Мелкий // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2(52). – С. 25–34. – DOI 10.25714/MNT.2022.52.003. – EDN YCMEZK.
4. Бабoryкин М.Ю., Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Выявление опасных геологических процессов при проведении инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей рельефа // Инженерные изыскания. 2015. № 2. С. 30–37.
5. Долгополов, Д. В. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли / Д. В. Долгополов, М. Ю. Бабoryкин, В. А. Мелкий // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 25–32. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32. – EDN CZDJRR.
6. Makarycheva, E. M. Geotechnical Monitoring of Pipeline Systems in Permafrost Conditions / E. M. Makarycheva, T. I. Kuznetsov, E. R. Ibragimov // International Conference «Solving the puzzles from Cryosphere»: Program, Abstracts, Pushchino, 15–18 апреля 2019 года. – Pushchino: Без издательства, 2019. – P. 130–132. – EDN VLXOYB.
7. Долгополов, Д. В. Применение технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга и картографирования на трубопроводном транспорте / Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, М. Ю. Бабoryкин // Региональные геосистемы. – 2022. – Т. 46, № 3. – С. 339–355. – DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355. – EDN ABWPNH.

8. Lausch, Angela & Schaepman, Michael & Skidmore, Andrew & Catana, Eusebiu & Bannehr, Lutz & Bastian, Olaf & Borg, Erik & Bumberger, Jan & Dietrich, Peter & Cornelia, Glaesser & Hacker, Jorg & Höfer, Rene & Jagdhuber, Thomas & Jany, Sven & Jung, András & Karnieli, Arnon & Klenke, Reinhard & Kirsten, Toralf & Ködel, Uta & Baatz, Roland. (2022). Remote Sensing of Geomorphodiversity Linked to Biodiversity—Part III: Traits, Processes and Remote Sensing Characteristics. *Remote Sensing*. 2279. 10.3390/rs14092279.
9. Amelunke, Michael & Anderson, Carlton & Waldron, Margaret & Raber, George & Carter, Gregory. (2024). Influence of Flight Altitude and Surface Characteristics on UAS-LiDAR Ground Height Estimate Accuracy in *Juncus roemerianus* Scheele-Dominated Marshes. *Remote Sensing*. 16. 384. 10.3390/rs16020384.
10. Geotechnical Monitoring Of Pipelines Located In Difficult Climatic Conditions / E. M. Makarycheva, V. I. Surikov, T. I. Kuznetsov, D. V. Dolgoplov // 13 Pipeline Technology Conference, Berlin, 12–14 марта 2018 года. – Berlin: ESTREL CONVENTION CENTER, 2018. – P. 14–20. – EDN CWDGRQ.
11. Resop, Jonathan & Lehmann, Laura & Hession, W. (2019). Drone Laser Scanning for Modeling Riverscape Topography and Vegetation: Comparison with Traditional Aerial Lidar. *Drones*. 3. 35. 10.3390/drones3020035.
12. Jessin, Jeremy & Charlotte, Heinzlef & Long, Nathalie & Serre, Damien. (2023). A Systematic Review of UAVs for Island Coastal Environment and Risk Monitoring: Towards a Resilience Assessment. *Drones*. 7. 206. 10.3390/drones7030206.
13. М. С. Куприянов, М. П. Гасилин, Е. М. Макарычева, Т. И. Кузнецов. Организация высокоточной координатной системы на объектах магистральных трубопроводов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 512–521.
14. Макарычева Е. М., Кузнецов Т. И., Половков С. А., Барышев А. И., Покровская Е. А. 3D-ГИС для сопровождения работ по геотехническому мониторингу объектов магистральных трубопроводов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов: ООО «Транснефть-Медиа»*. – Т. 10. – № 4. – Москва, 2020. – С. 342–351.
15. Кузнецов, Т. И. Новые возможности для геотехнического мониторинга трубопроводных систем при использовании ГИС технологий с 3D визуализацией / Т. И. Кузнецов, Д. В. Долгополов // *Трубопроводный транспорт – 2017 : тезисы докладов XII Международной учебно-научно-практической конференции*, Уфа, 24–25 мая 2017 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2017. – С. 122–123. – EDN ZEMDIR.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662888 Российская Федерация. Технологическая цифровая платформа мониторинга природно-технологической среды: № 2022662580: заявл. 07.07.2022: опубл. 07.07.2022 / Д. В. Долгополов, Р. А. Камашев, Д. С. Назаров, М. С. Удовиченко; заявитель Закрытое акционерное общество «Ай Ко». – EDN LLTLVA.
17. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, А. В. Полуянова, В. А. Мелкий // *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65–81. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81. – EDN BQCQZY.
18. Дешифрирование инфраструктуры магистральных трубопроводов по аэрокосмическим изображениям / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, В. А. Мелкий, В. В. Братков // *Мониторинг. Наука и технологии*. – 2020. – № 2(44). – С. 19–25. – DOI 10.25714/MNT.2020.44.003. – EDN MOYFVT.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680590 Российская Федерация. Программный модуль автоматизированного анализа планово-высотного положения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС: № 2023680005: заявл. 29.09.2023: опубл. 03.10.2023 / Т. И. Кузнецов, А. И. Барышев, Е. А. Покровская [и др.] ; за-

явитель Публичное акционерное общество «Транснефть», Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть - Восток», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть - Дальний Восток», Акционерное общество «Транснефть - Сибирь». – EDN KBXQWB.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682372 Российская Федерация. Программный модуль автоматизированного анализа параметров сложных геологических условий расположения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС: № 2023680694: заявл. 06.10.2023; опубл. 25.10.2023 / Т. И. Кузнецов, А. И. Барышев, Е. А. Покровская [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть», Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Восток», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Дальний Восток», Акционерное общество «Транснефть - Сибирь». – EDN FORHAO.

© Т. И. Кузнецов, Д. В. Долгополов, А. И. Барышев, 2025