

Д. В. Долгополов¹✉, Т. И. Кузнецов¹, А. Л. Федотов¹

Применение данных дистанционного зондирования Земли для информационного обеспечения геотехнического мониторинга магистральных трубопроводов

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

Аннотация. Рассматривается опыт использования данных дистанционного зондирования Земли для решения задач в рамках геотехнического мониторинга магистральных трубопроводов. Ключевыми задачами среди которых являются: мониторинг пространственного положения объектов линейной части магистрального трубопровода по данным воздушного лазерного сканирования; выявление экзогенных геологических процессов с использованием ортофотопланов и цифровой модели рельефа в коридоре трассы трубопровода; анализ динамики экзогенных геологических процессов с использованием цифровых моделей рельефа, построенных на разных циклах мониторинга. Отмечается, что важным является выявить закономерности между ненормативным состоянием трубопровода и протекающими природными, природно-техногенными и техногенными процессами в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов; исследовать факторы, которые оказывают влияние на состояние трубопровода и разработать методы их распознавания по материалам дистанционного зондирования.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг; цифровая аэросъемка; воздушно-лазерное сканирование; цифровая модель рельефа; магистральный трубопровод; экзогенные геологические процессы

D. V. Dolgopolov¹✉, T. I. Kuznetsov¹, A. L. Fedotov¹

Application of remote sensing data for information support of geotechnical monitoring of main pipelines

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

Abstract. The experience of using Earth remote sensing data to solve problems in the framework of geotechnical monitoring of main pipelines is considered. The key tasks among which are: monitoring the spatial position of objects in the linear part of the main pipeline based on aerial laser scanning data; identification of exogenous geological processes using orthophotoplanes and a digital relief model in the pipeline route corridor; analysis of the dynamics of exogenous geological processes using digital relief models based on different monitoring cycles. It is noted that it is important to identify patterns between the abnormal condition of the pipeline and ongoing natural, man-made, and man-made processes during the operation of main pipelines; to investigate the factors that affect the condition of the pipeline and to develop methods for recognizing them based on remote sensing data.

Keywords: geotechnical monitoring; digital aerial photography; airborne laser scanning; digital relief model; main pipeline; exogenous geological processes

Введение

Геотехнический мониторинг магистральных трубопроводов (МТ) проводится на участках трубопровода, проходящих в сложных природно-климатических и геологических условиях (общая протяженность более 7 000 км). Для решения задач геотехнического мониторинга ранее проводились аэровизуальные и инженерные обследования трассы трубопровода. В процессе аэровизуальных обследований выявлялись опасные экзогенные геологические процессы, в ходе инженерных работ геологи в поле уточняли их влияние на трубопровод. Для измерения планово-высотного положения (ПВП) объектов трубопроводной системы изначально использовались классические методы инструментальных геодезических измерений. В дальнейшем классические методы измерения сменили методы спутниковых определений, а также методы аэросъемки, в том числе с использованием ВЛС [1–8]. Для проведения воздушного лазерного сканирования (ВЛС) на трубопроводах подземной прокладки были установлены устройства определения высоты [9].

Объектами мониторинга являются протяженные объекты МТ (линейная часть (ЛЧ) и нефтеперекачивающие станции), а также опасные природные процессы и их проявления в коридоре трассы, способные оказать влияние на трубопровод). Задачей наших исследований является информационное обеспечение задач геотехнического мониторинга данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации МТ (рисунок 1).



Рис. 1. Обобщенная схема аэрокосмического мониторинга при геотехническом мониторинге МТ (по [10] с дополнениями)

Данные, полученные в ходе мониторинга, должны обеспечивать расчет текущего и прогнозного состояния объектов МТ с учетом изменений природно-

климатических и эксплуатационных условий. Для этого контроль пространственного положения трубопровода осуществляют с использованием технологии воздушного лазерного сканирования, дополняя его геодезическим методом спутниковых определений. Периодичность определения планово-высотного положения объектов МТ на участках с многолетнемерзлыми грунтами 2 раза в год. Погрешность определения ПВП объектов трубопровода методом ВЛС составляет не более 6 см.

Выявление и контроль развития экзогенных геологических процессов (ЭГП) опасных для трубопровода, осуществляют один раз в год в полосе 150 м (не менее 75 м вправо и влево от оси трубопровода) средствами ВЛС и цифровой аэро съемки. В процессе исследований для анализа по материалам воздушного лазерного сканирования формируется цифровая модель рельефа с погрешностью определения высоты 6 см., а по материалам цифровой аэро съемки строится цифровой ортофотоплан с пространственным разрешением 4 см.

В настоящее время в рамках геотехнического мониторинга осуществляют аэрокосмическую съемку магистрального трубопровода со следующими основными целями:

- картографирование объектов МТ;
- контроль ПВП объектов магистральных трубопроводов;
- выявление ЭГП;
- мониторинг развития ЭГП;
- контроль отклонения от вертикали опор ЛЭП;
- подготовка компенсирующих мероприятий;
- разработка программ мониторинга объектов магистрального трубопровода

Результаты

Мониторинг осуществляется для магистральных трубопроводов, проложенных в сложных природно-климатических условиях, общей протяженностью 7000 км преимущественно средствами цифровой аэро съемки и воздушного лазерного сканирования. В результате мониторинга выявлено более 5500 опасных геологических процессов в коридоре трассы трубопровода.

В процессе работ, были разработаны методики обработки данных ДЗЗ для решения производственных задач геотехнического мониторинга, в том числе:

- дешифрирование объектов линейной части МТ по данным аэрокосмической съемки (использование ортофотопланов) [11, 12];
- определение планово-высотного положения объектов линейной части магистрального трубопровода по данным ВЛС с использованием устройств определения высоты;
- выявление экзогенных геологических процессов по данным цифровой аэро съемки и цифровой модели рельефа, построенной по данным ВЛС [13–15];
- анализ динамики ЭГП между циклами мониторинга с использованием ЦМР, построенных на каждом цикле, и анализом разницы между ними;

- классификация выявленных ЭГП по типу протекающих процессов;
- количественная оценка ЭГП, по данным ВЛС, оценка степени опасности;
- контроль отклонения от вертикали опор ЛЭП по данным ВЛС.

В целях информационного обеспечения геотехнического мониторинга, автоматизации процесса обработки данных ДЗЗ, реализации математических моделей расчета были разработаны следующие программы для ЭВМ и базы данных, в том числе:

- ГИС Мониторинг [16];
- Архив электронных копий проектной и исполнительной документации объектов МН «Куюмба – Тайшет» [17];
- Модель данных для расчета ореолов оттаивания с использованием программно-расчетного модуля [18];
- Модель данных для расчетов планово-высотного положения с использованием программно-расчетного модуля [19];
- Программный модуль автоматизированного анализа планово-высотного положения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС [20];
- Программный модуль автоматизированного анализа параметров сложных геологических условий расположения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС [21].

Для осуществления эффективного мониторинга протяженных трасс МТ требуется помимо технологий дистанционного зондирования использовать современные геоинформационные технологии, а также, при необходимости, разрабатывать средства автоматизированной обработки пространственных данных. Наш практический опыт показывает, что при разработке систем оценки фактического состояния МТ по данным мониторинга, систем поддержки принятия решений важной задачей является разработка требований к предельным значениям параметров мониторинга объектов МТ. Помимо этого, необходимо изучить закономерности развития и протекания природных, природно-техногенных и техногенных процессов в процессе эксплуатации МТ, исследовать факторы, которые оказывают влияние на состояние МТ и разработать методы их распознавания по материалам ДЗЗ. При наличии таких отраслевых знаний, современные технологии ДЗЗ совместно с информационными технологиями обеспечивают возможность своевременно выявить ненормативное и аварийное состояния трубопровода и причины их возникновения.

Оценка методов съемки с точки зрения требуемой точности, а также необходимости выявления и мониторинга факторов, влияющих на трубопровод, позволят оптимизировать систему мониторинга МТ. При этом могут быть использованы новые, экономически более эффективные технологии ДЗЗ, которые обеспечивают нам получение необходимых данных с нужной точностью. В качестве такой технологии может выступать, например, космическая радарная интерферометрия при условии создания отечественной космической группировки, которая обеспечить получение радарных изображений, а также апробации методов мониторинга объектов МТ.

Заключение

Технологии ДЗЗ доказали свою эффективность и могут быть эффективно использованы не только в рамках геотехнического мониторинга, но и для решения широкого круга производственных задач, на разных этапах жизненного цикла магистрального трубопровода, в том числе:

- на этапе предпроектного обследования для сбора данных о территории проектирования, создания ортофотоплана, получения цифровой модели рельефа (ЦМР);
- при инженерно-геодезических изысканиях для создания инженерно-топографических планов, формирования ЦМР;
- в процессе архитектурно-строительное проектирование при разработке проектной и рабочей документации, создании и уточнении BIM – моделей;
- в процессе эксплуатации при контроле зон с особыми условиями использования территории (ЗООИТ), оформлении прав на земельные участки, контроле использования арендованных земель, планировании работ в рамках программ капитального ремонта, обеспечения безопасности магистрального трубопровода;
- при создании цифровой модели местности, в том числе для разработки планов по ликвидации аварийных разливов нефти (ПЛАРН) на суше;
- в процессе строительства и реконструкции данные цифровой аэросъемки и лазерного сканирования могут быть использованы как инструменты строительного контроля при сравнении «план/факт», оценке объемов работ, создании исполнительной документации «как построено».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте / Д. В. Долгополов, М. Ю. Баборыкин, 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.
2. 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. Баборыкин // Региональные геосистемы. – 2022. – Т. 46, № 3. – С. 339–355. – DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355. – EDN ABWPNH.
3. Макарычева, Е. М. Перспективы использования метода воздушного лазерного сканирования при проведении инженерных изысканий на территории криолитозоны / Е. М. Макарычева, Т. И. Кузнецов // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы шестнадцатой общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций, Москва, 01–03 декабря 2021 года / ООО «Геомаркетинг»; ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»; Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» - Общероссийское отраслевое объединение работодателей Союз изыскателей. – Москва: Геомаркетинг, 2021. – С. 390–396. – EDN FWKKSА.
4. 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.
5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Патент на полезную модель № 182554 U1 Российская Федерация, МПК F17D 5/00. Устройство определения планово-высотного положения магистрального нефтепровода: № 2018118608: заявл. 21.05.2018; опубл. 22.08.2018 / А. Г. Воронов, С. Н. Чужин, А. А. Захаров [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество "Транснефть" (ПАО "Транснефть"), Общество с ограниченной ответственностью "Транснефть - Восток" (ООО "Транснефть - Восток"), Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта" (ООО "НИИ Транснефть"). – EDN RQPZAP.

10. Карпик, А. П. Геодезическая пространственная информационная система для обеспечения устойчивого развития территорий: специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Карпик Александр Петрович. – Новосибирск, 2005. – 51 с. – EDN NJUDKJ.

11. 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.

12. 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.

13. Долгополов, Д. В. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли / Д. В. Долгополов, М. Ю. Баборыкин, 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.

14. 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.

15. Баборыкин 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.

16. 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. – DOI 10.28999/2541-9595-2020-10-4-342-351. – EDN ONKIAZ.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662894 Российская Федерация. Архив электронных копий проектной и исполнительной документации объектов МН "Куюмба – Тайшет" : № 2017619837 : заявл. 03.10.2017: опубл. 20.11.2017 / В. И. Суриков, Д. В. Долгополов, Д. Ю. Федоренко [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»). – EDN IWXROS.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661876 Российская Федерация. Модель данных для расчета ореолов оттаивания с использованием программно-расчетного модуля: № 2017618891: заявл. 01.09.2017: опубл. 24.10.2017 / В. И. Суриков, Е. А. Покровская, Т. И. Кузнецов [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть» (ПАО «Транснефть»), Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»). – EDN TZOAQE.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662021 Российская Федерация. Модель данных для расчетов планово-высотного положения с использованием программно-расчетного модуля: № 2017618892: заявл. 01.09.2017: опубл. 26.10.2017 / В. И. Суриков, Э. Р. Ибрагимов, Т. И. Кузнецов [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть» (ПАО «Транснефть»), Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»). – EDN XWNKAW.

20. 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.] ; 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 KBXQWB.

21. 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.

© Д. В. Долгополов, Т. И. Кузнецов, А. Л. Федотов, 2025