

УДК [528.236:528.71]+621.644

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-62-69

Методы обработки данных, полученных в линейных координатах, для геоинформационного обеспечения аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем

Д. В. Долгополов¹, В. А. Мелкий^{2✉}, Е. И. Аврунев³

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

² Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, Российская Федерация

³ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: vamelkiy@mail.ru

Аннотация. Цель работы – разработка математического алгоритма, позволяющего преобразовывать систему линейных координат, используемую при определении положения характерных точек оси трубопровода, в пространственную прямоугольную координатную систему, которая необходима для актуализации результатов обследования трубопровода наземными методами с применением данных дистанционного зондирования Земли, полученных с использованием GNSS-технологий. Актуальность разработки такого алгоритма обусловлена необходимостью позиционирования дефектов трубопроводов, обнаруженных соответствующим наземным измерительным технологическим средством в линейной координатной системе, в геопространство трубопроводной системы. Основным элементом и достоинством алгоритма является наличие компонента, обеспечивающего возможность выполнения оценки точности наземных измерений в линейной координатной системе с результатами, полученными из GNSS-технологий. Реализация предлагаемого алгоритма позволит получать качественную и достоверную информацию о состоянии технологических компонентов трубопроводной системы. Основные источники информации – сведения из открытых литературных источников о методах построения системы линейных координат и способах преобразования линейных координат в геодезические. Апробирование методов выполнялось с применением ГИС-технологий. Выполненные теоретические исследования позволили разработать математический алгоритм преобразования линейной координатной системы в пространственную прямоугольную с контролем точности получаемых результатов.

Ключевые слова: система линейных координат, пространственная прямоугольная координатная система, геопространство трубопроводной системы, GNSS-технологии

Для цитирования:

Долгополов Д. В., Мелкий В. А., Аврунев Е. И. Методы обработки данных, полученных в линейных координатах, для геоинформационного обеспечения аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 6. – С. 62–69. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-62-69

Введение

Важнейшим аспектом безопасного функционирования трубопроводной системы является своевременное обнаружение ее дефектов и их актуализация в геопространстве этой системы.

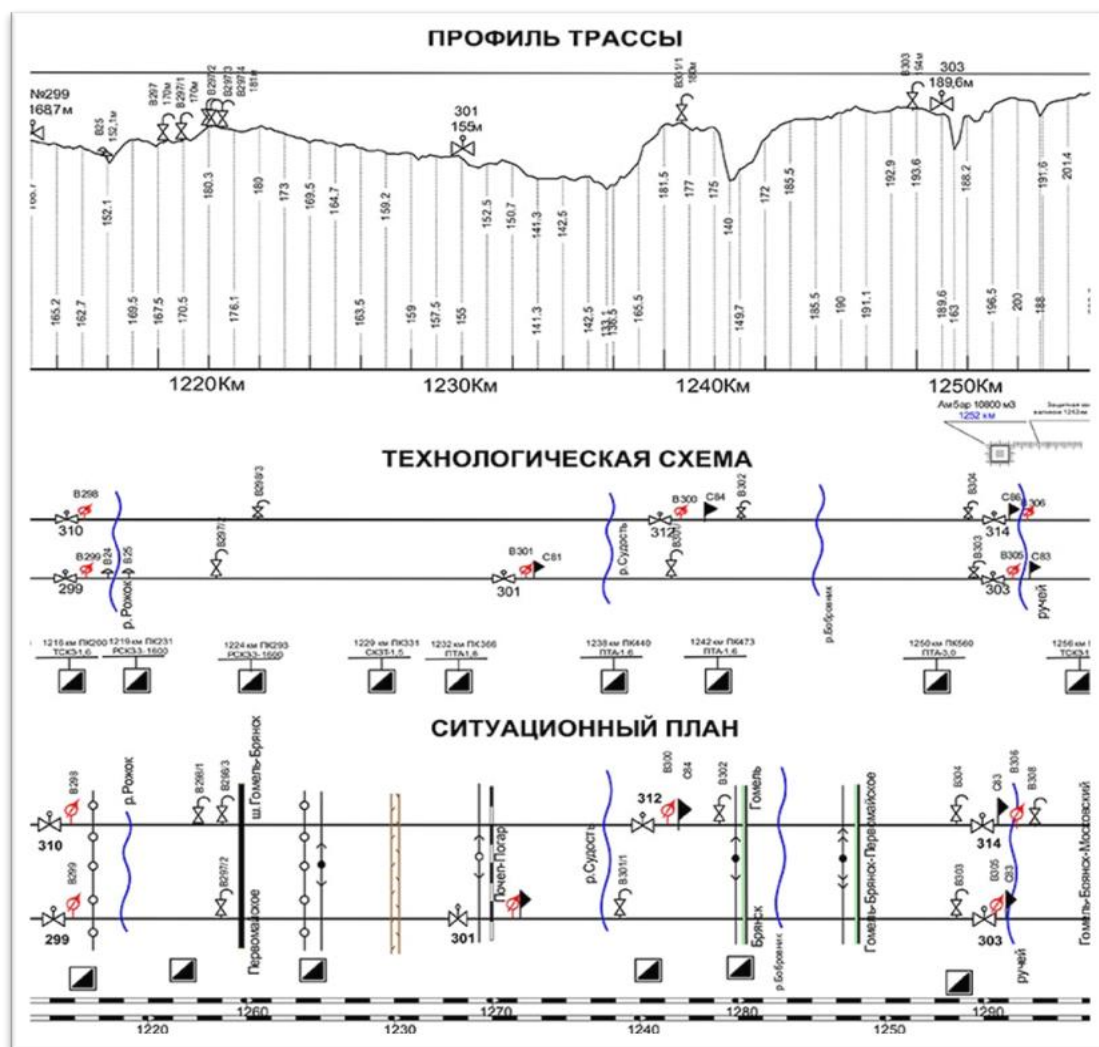
Реализация такой технологической процедуры позволит планировать соответствующие мероприятия по обеспечению безопасности функционирования трубопроводной системы.

Поскольку в настоящее время обнаружение дефектов (внутритрубная диагностика)

выполняется в линейной системе координат, возникает актуальная научно-техническая задача преобразования этой системы в пространственную прямоугольную координатную систему, в которой создается геопространство трубопроводов. Отметим, что геопространство системы трубопровод-

ного транспорта создается по данным дистанционного зондирования Земли с применением GNSS-технологий.

Исходной основой для создания геопространства, в том числе могут являться технологические схемы и профили, представленные на рис. 1 [1].



ответствующего участка трубопровода и планирования устранения дефектов;

- сопоставление дефектов и их источников, выявленных по аэрокосмическим данным в процессе дешифрирования;

- координирование и анализ событий, выявленных в процессе обследования (для трубопроводов и ЛЭП): зарастание, несанкционированные земляные работы и др.

Для решения этих задач, получаемых в процессе мониторинга разными средствами, необходимо преобразование линейных координат в пространственные прямоугольные. Необходимость этого преобразования проиллюстрирована на рис. 2.

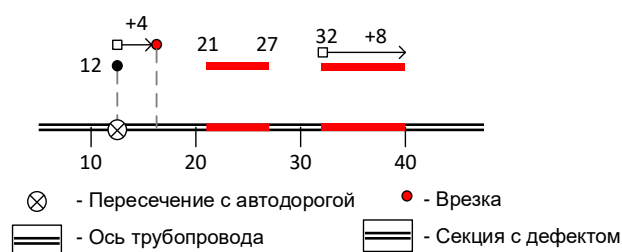


Рис. 2. Данные и события вдоль оси трассы трубопровода

Таким образом, разрабатываемый алгоритм должен обеспечивать решение следующих научно-технических задач:

- преобразование линейной системы координат в пространственную прямоугольную;

- выполнение оценки точности данных, полученных в результате внутритрубной диагностики в линейной системе координат.

Существующие методы и инструменты

В настоящее время существует несколько реализаций программных продуктов для работы с данными в системе линейных координат [9–11]. Вместе с тем, теоретическое и методическое обеспечение данных работ недостаточно, количество научных работ по данной тематике весьма ограничено [12–17].

Следует отметить, что система линейных координат – это математический аппарат, используемый для определения местоположения характерных точек на прямой линии. Следова-

тельно, прямая линия, в свете решения обозначенных выше задач, должна образовываться двумя пунктами (калибровочными точками), имеющими координаты в пространственной прямоугольной координатной системе.

Алгоритм преобразования линейных координат в пространственные прямоугольные с оценкой точности выполненных измерений

Поскольку используемое в настоящее время технологическое средство для внутритрубной диагностики выполняет измерения длин наклонных линий по оси трассы трубопровода, представим проекцию пространственной прямоугольной координатной системы на плоскость, определяемую координатами X и Y .

Такая проекция с фрагментом участка трассы трубопровода, ограниченного калибровочными точками, приведена на рис. 3.

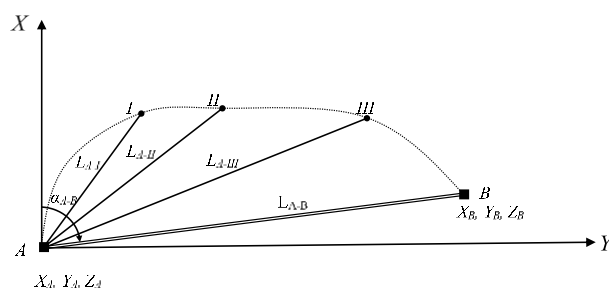


Рис. 3. Преобразование линейной системы координат в пространственную прямоугольную для i -участка трассы трубопровода:

A, B – калибровочные точки (элементы трассы), образующие линейную систему координат участка трассы и координаты которых определены с использованием $GNSS$ -технологий в пространственной прямоугольной координатной системе;

I, II, III – определяющие, в том числе дефекты трассы трубопровода;

L_{A-B} – длина участка трассы трубопровода

На рис. 3 калибровочные точки A и B , представлены в линейной системе координат с известными пространственными прямоугольными геодезическими координа-

тами. Координаты этих точек определяются на местности в результате применения GNSS-технологий.

Для повышения точности и достоверности получаемой информации число калибровочных точек должно соответствовать конфигурации трассы трубопровода и точностным измерительным характеристикам технологического средства для внутритрубной диагностики. Следовательно, вся трасса трубопровода будет представлена n -системами линейных координат, связанных между собой пространственными прямоугольными координатами калибровочных точек.

$$\Delta_i = L_{A-B}^{ИЗМ} - \sqrt{\left(X_B^{GNSS} - X_A^{GNSS}\right)^2 + \left(Y_B^{GNSS} - Y_A^{GNSS}\right)^2 + \left(Z_B^{GNSS} - Z_A^{GNSS}\right)^2} \leq t \cdot m_{НОРМ}, \quad (1)$$

где $m_{НОРМ}$ – нормативная точность определения местоположения оси трассы в пространстве, устанавливаемая нормативно, исходя из категории трубопровода и условий местности;

t – статистический коэффициент перехода от средних квадратических ошибок (СКО) параметров к их предельным значениям;

i – номер участка трассы трубопровода;

2) выполнение статистического критерия (1) определяет возможность принятия гипотезы о равенстве средних квадратических ошибок по осям координат, которая приводит к следующему уравнению:

$$\gamma_{A-B} = \arcsin \frac{Z_B^{GNSS} - Z_A^{GNSS}}{\sqrt{\left(X_B^{GNSS} - X_A^{GNSS}\right)^2 + \left(Y_B^{GNSS} - Y_A^{GNSS}\right)^2}}; \quad (4)$$

5) при выполнении критерия (1) и принятии гипотезы (2) преобразование линейных координат точек дефектов трассы трубопровода в прямоугольную координатную систему выполняется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} X_I &= X_A^{GNSS} + \left(L_{A-I}^{ИЗМ} - \frac{\Delta_X \cdot L_{A-I}^{ИЗМ}}{L_{A-B}^{ИЗМ}} \right) \cdot \cos \alpha_{A-I}; \\ Y_I &= Y_A^{GNSS} + \left(L_{A-I}^{ИЗМ} - \frac{\Delta_Y \cdot L_{A-I}^{ИЗМ}}{L_{A-B}^{ИЗМ}} \right) \cdot \sin \alpha_{A-I}; \quad (5) \\ Z_I &= Z_A^{GNSS} + \left(L_{A-I}^{ИЗМ} - \frac{\Delta_Z \cdot L_{A-I}^{ИЗМ}}{L_{A-B}^{ИЗМ}} \right) \cdot \cos \gamma_{A-I}; \end{aligned}$$

Алгоритм преобразования линейных координат в пространственные прямоугольные для i -участка трассы трубопровода с оценкой точности выполненных измерений будет представлен в виде следующих математических операций:

1) оценка точности измерений технологическим средством внутритрубной диагностики выполняется на основании сравнения измеренной длины линии между калибровочными точками соответствующего участка трассы трубопровода, с ее значением, вычисленным из решения обратной геодезической задачи по координатам калибровочных точек из GNSS-определений

$$\Delta_X = \Delta_Y = \Delta_Z = \frac{\Delta_i}{\sqrt{3}}; \quad (2)$$

3) вычисление угла ориентирования базовой линии А–В между калибровочными точками выполняется с использованием следующего уравнения:

$$\alpha_{A-B} = \arctg \frac{Y_B^{GNSS} - Y_A^{GNSS}}{X_B^{GNSS} - X_A^{GNSS}}; \quad (3)$$

4) вычисление угла наклона базовой линии А–В к проекции пространственной координатной системы на плоскость выполняется с использованием следующего уравнения:

6) вычисление остальных точек на рассматриваемом участке трассы будет выполняться по аналогичным формулам, в которых будет меняться только параметр $L_{A-I}^{ИЗМ}$;

7) средняя квадратическая ошибка определения местоположения дефектовых точек по всей оси трассы выполняется с использованием формулы Гаусса

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i}{n}} \leq t \cdot m_{НОРМ}, \quad (6)$$

где n – число участков, расположенных по оси трассы трубопровода.

Результаты, полученные с использованием разработанного алгоритма (1)–(6), актуализируются в геопространстве системы трубопровода, где они могут быть сопоставлены с материалами ДЗЗ, полученными с учетом возможностей дешифрирования объектов транспортной инфраструктуры) [18–20].

Заключение

Разработанный алгоритм преобразования линейных координат дефектовых точек

в пространственные прямоугольные позволяет получить актуальную и достоверную информацию о состоянии технологического оборудования системы трубопроводов, что дает возможность создать актуальное геопространство, необходимое для планирования и реализации профилактических мероприятий, обеспечивающих безопасное функционирование этого важнейшего компонента транспортной инфраструктуры Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгополов Д. В., Никонов Д. В., Полуянова А. В., Мелкий В. А. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65–81. – DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81.
2. Бродская И. А. Интеграция ГИС-технологий, традиционных исследований и методов аэрокосмического зондирования для мониторинга магистральных трубопроводов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 3. – С. 141–150.
3. Карпик А. П., Лисицкий Д. В. Электронное геопространство – сущность и концептуальные основы // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 41–44.
4. Лисицкий Д. В., Чернов А. В. Теоретические основы трехмерного кадастра объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 153–170.
5. Мурзинцев П. П., Биндер И. О., Репин А. С., Гриднева Б. О. Инженерные изыскания коридоров линейных коммуникаций с учётом геотехнического мониторинга бугров пучения // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 10. – С. 7–13. – DOI 10.22389/0016-7126-2020-964-10-7-13.
6. ОР-75.180.00-КТН-039–08 с изм. 1 Требования к технологическим схемам нефтеперекачивающих станций, профилям и схемам линейной части магистральных нефтепроводов ОАО «АК «Транснефть»». – М. : ОАО «АК «Транснефть»». – 2012. – 861 с.
7. Юров Ф. Д. Особенности организации мониторинга линейных транспортных систем в криолитозоне // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. Москва, Геомаркетинг. – 2022. – С. 234–242.
8. Blazek R. Introducing the linear reference system in GRASS // International Journal of Geoinformatics. – 2005. – Vol. 1. – No. 3. – P. 95–100.
9. Хренов Н. Н. Диагностика состояния газопроводных геотехнических систем на основе сочетания дистанционного зондирования и наземных методов // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 36–40.
10. Ревзон А. Л. Аэрокосмический мониторинг состояния линейных природно-технических систем // Инженерная геология. – 2012. – № 1. – С. 24–36.
11. Введение в системы линейных координат. ESRI [Электронный ресурс]. – URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/data/linear-referencing/introduction-to-linear-referencing.htm> (дата обращения 21.04.2024).
12. Афонин К. Ф. Методика использования дифференциальных поправок для преобразования пространственных прямоугольных координат в пространственные геодезические // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82. – № 4. – С. 2–7. – DOI 10.22389/0016-7126-2021-970-4-2-7.
13. Брынь М. Я., Баширова Д. Р., Багишян А. Г. Сравнительная оценка мобильного лазерного сканирования, аэрофотосъемки с беспилотной авиационной системы и съемки с ком-

плексной дорожной лаборатории при выполнении диагностики автомобильных дорог // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 211–221. – DOI 10.20295/1815-588X-2021-2-211-221.

14. Виноградов А. В. Об установлении единой координатной системы в геодезических работах // Геодезия и картография. – 2010. – № 5. – С. 16–18.

15. Использование линейной системы координат. Autodesk. Autocad. Map 3D. [электронный ресурс]. – URL: <https://help.autodesk.com/view/MAP/2022/RUS/?guid=GUID-462ECE8C-1C7A-4CD2-A18C-434230C08E2E> (дата обращения 21.04.2024).

16. Федоров С. А., Хромченко А. В. Исследование условий использования дополнительных спутниковых измерений при съемке линейных сооружений в исходной системе координат проекта // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 1-1 (103). – С. 145–151. – DOI <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.022>.

17. Saksono T., Fulazzaky M. A., Sari Z. Geodetic analysis of disputed accurate qibla direction. Journal of Applied Geodesy. – 2018. – No 12 (2), P. 1–10. – DOI 10.1515/jag-2017-0036.

18. Гук А. П., Шляхова М. М. Некоторые проблемы построения реалистических измерительных 3D-моделей по данным дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. – 2015. – № 4 (32). – С. 51–60.

19. Долгополов Д. В., Никонов Д. В., Мелкий В. А., Братков В. В. Дешифрирование инфраструктуры магистральных трубопроводов по аэрокосмическим изображениям // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 2 (44). – С. 19–25. – DOI 10.25714/MNT.2020.44.003.

20. Hausamann D., Zirinig W., Schreier G. High-Resolution Remote Sensing Used to Monitor Natural Gas Pipelines. Earth Observation Magazine. – 2002. – No. 11. – P. 12–17.

Об авторах

Даниил Валентинович Долгополов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории разработки и ведения геоинформационных систем и баз данных центра мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта.

Вячеслав Анатольевич Мелкий – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности.

Евгений Ильич Аврунев – кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования.

Получено 26.04.2024

© Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, Е. И. Аврунев, 2024

Methods of processing data obtained in linear coordinates for geoinformation support of aerospace monitoring of pipeline systems

D. V. Dolgoplov¹, V. A. Melkiy^{2✉}, E. I. Avrunev³

¹ Research Institute of Pipeline Transport (Transneft Research Institute LLC),
Moscow, Russian Federation

² Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch RAS,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

³ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: vamelkiy@mail.ru

Abstract. The objective of the work is to develop a mathematical algorithm for transforming the linear coordinate system used to determine the position of characteristic points of the pipeline axis into a spatial rectangular coordinate system, which is necessary to update the results of pipeline in-

spection by ground-based methods using Earth remote sensing data obtained using GNSS technologies. The relevance of developing such an algorithm is due to the need to position pipeline defects detected by the appropriate ground-based measuring technological tool in a linear coordinate system in the geospace of the pipeline system. The main element and advantage of the algorithm is the presence of a component that provides the ability to assess the accuracy of ground measurements in a linear coordinate system with the results obtained from GNSS technologies. The implementation of the proposed algorithm will allow obtaining high-quality and reliable information on the state of the technological components of the pipeline system. The main sources of information are information from open literary sources on the methods of constructing a linear coordinate system and ways of converting linear coordinates into geodetic ones. The methods were tested using GIS technologies. The theoretical studies performed allowed us to develop a mathematical algorithm for transforming a linear coordinate system into a spatial rectangular one with control over the accuracy of the results obtained.

Keywords: linear coordinate system, spatial rectangular coordinate system, geospace of pipeline system, GNSS technologies

REFERENCES

1. Dolgoplov, D. V., Nikonov, D. V., Poluyanov, A. V., & Melkiy, V. A. (2019). Possibilities of visual interpretation of main pipelines and infrastructure facilities using satellite images of high and ultra-high spatial resolution. *Vestnik SGUGT [Vestnik SGUGT]*, 24(3), 65–81. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81 [in Russian].
2. Brodskaya, I. A. (2008). Integration of GIS technologies, traditional research and aerospace sounding methods for monitoring main pipelines. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotogrammetry [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography]*, 3, 141–150. [in Russian].
3. Karpik, A.P., & Lisitsky, D.V. (2009). Electronic geospace – the essence and conceptual framework. *Geodezija ir Kartografija [Geodesy and cartography]*, 5, 41–44. [in Russian].
4. Lisitsky, D. V., & Chernov, A. V. (2018). Theoretical Basis of Three-Dimensional Cadastre of Real Estate Objects. *Vestnik SGUGT [Vestnik SGUGT]*, 23(2), 153–170. [in Russian].
5. Murzintsev, P. P., Binder, I. O., Repin, A. S., & Gridneva, B. O. (2020). Engineering surveys of linear communications corridors taking into account geotechnical monitoring of heaving mounds. *Geodezija ir Kartografija [Geodesy and cartography]*, 81(10), 7–13. DOI 10.22389/0016-7126-2020-964-10-7-13 [in Russian].
6. *OR-75.180.00-KTN-039–08 with amendment. 1 Requirements for technological diagrams of oil pumping stations, profiles and diagrams of the linear part of the main oil pipelines of JSC AK Transneft* (2012). Moscow: JSC AK Transneft, 861 p. [in Russian].
7. Yurov, F. D. (2022). Specifics of the organization of monitoring at linear transport systems in permafrost zone. *Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation. Materials of the Seventeenth All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition of Survey Organizations*. Moscow: Geomarketing, 234–242. [in Russian].
8. Blazek, R. (2005). Introducing the linear reference system in GRASS. *International Journal of Geoinformatics*, 1(3), 95–100.
9. Khrenov, N. N. (2009). Diagnostics of Gasline geotechnical systems Condition based on combination of Remote Sensing and Land Technique. *Geodezija ir Kartografija [Geodesy and cartography]*, 5, 36–40 [in Russian].
10. Revzon, A. L. (2012). Aerospace monitoring of the state of linear natural-technical systems. *Engineering Geology*, 1, 24–36 [in Russian].
11. *Introduction to linear coordinate systems. ESRI*. Retrived from <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/data/linear-referencing/introduction-to-linear-referencing.htm> (accessed 21 April 2024).

12. Afonin, K. F. (2021). Methodology for using differential corrections to transform spatial rectangular coordinates into spatial geodetic ones. *Geodezija ir Kartografija [Geodesy and cartography]*, 82 (4), 2–7. DOI 10.22389/0016-7126-2021-970-4-2-7 [in Russian].
13. Bryn, M. Ya., Bashirova, D. R., & Bagishyan, A. G. (2021). Comparative evaluation of Mobile Laser Scanning, Aerial Photography from an Unmanned Aircraft System and Surveying from an Integrated Road Laboratory when performing diagnostics of Highways. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 18 (2), 211–221. DOI 10.20295/1815-588X-2021-2-211-221 [in Russian].
14. Vinogradov, A.V. (2010). On the establishment of a unified coordinate system in geodetic work. *Geodezija ir Kartografija [Geodesy and cartography]*, 5, 16–18. [in Russian].
15. *Using a linear coordinate system. Autodesk. AutoCAD. Map 3D*. Retrived from <https://help.autodesk.com/view/MAP/2022/RUS/?guid=GUID-462ECE8C-1C7A-4CD2-A18C-434230C08E2E> (accessed 21 April 2024).
16. Fedorov, S. A., & Khromchenko, A. V. (2021). A Study of the Conditions for the use of Additional Satellite Measurements when Capturing Footage of Outside plant in the Original Coordinate System of a Project *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Scientific Research Journal]*, 1-1 (103), 145–151. DOI <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.022> [in Russian].
17. Saksono, T., Fulazzaky, M. A., & Sari, Z. (2018). Geodetic analysis of disputed accurate qibla direction. *Journal of Applied Geodesy*, 12 (2), 1–10. DOI 10.1515/jag-2017-0036
18. Guk, A. P., & Shlyakhova, M. M. (2015). Some problems in constructing realistic 3D measurement models based on remote sensing data *Vestnik SGUGT [Vestnik SGUGT]*, 4(32), 51–60.
19. Dolgoplov, D. V., Nikonov, D. V., Melkiy, V. A., & Bratkov, V. V. (2020). Deciphering the infrastructure of main pipelines using aerospace images. *Monitoring. Nauka i tekhnologii. [Monitoring. Science and Technology]*, 2 (44), 19–25. DOI 10.25714/MNT.2020.44.003 [in Russian].
20. Hausamann, D., Zirnig, W., & Schreier, G. (2002). High-Resolution Remote Sensing Used to Monitor Natural Gas Pipelines. *Earth Observation Magazine*, 11, 12–17.

Author details

Daniil V. Dolgoplov – D. Sc., Leading Researcher at the laboratory for the development and maintenance of geographic information systems and databases of the monitoring center and geographic information systems of pipeline transport facilities.

Vyacheslav A. Melkiy – D. Sc., Leading Researcher, Laboratory of Volcanology and Volcanic Hazard.

Evgeniy I. Avrunev – Ph. D., Associate Professor of the Department of Cadaster and Territorial Planning.

Received 26.04.2024

© D. V. Dolgoplov, V. A. Melkiy, E. I. Avrunev, 2024