



(25)-0418-1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРЕНА ОПОР ЛЭП, РАСПОЛОЖЕННЫХ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЙ

Павел Илларионович Соловей¹, Анатолий Николаевич Переварюха²,
Татьяна Васильевна Морозова³

^{1,2,3} Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия

¹pavelsolovej1@gmail.com, ²a.n.perevaryukha@donnasa.ru, ³t.v.morozova@donnasa.ru

Аннотация. В статье представлен эффективный способ определения крена опор линий электропередачи, расположенных в стесненных условиях наблюдений. Установлено, что при наличии видимости на центр опоры только с одного опорного пункта, предложенный способ является наиболее эффективным и менее трудоемким по сравнению с другими способами определения крена опор. Детально описана технология проведения угловых и линейных измерений, выполняемых с применением безотражательного электронного тахеометра. Выполнен подробный расчет точности угловых и линейных измерений. Установлено, что основное влияние на точность определения крена опор оказывают погрешности угловых измерений. Показано, что в условиях строительства угловые измерения следует выполнять с погрешностью не более $\pm 4''$, а в условиях эксплуатации – не более $\pm 8''$. Приведена методика определения дирекционного угла вектора крена, необходимого в случае выравнивания опор, имеющих недопустимый крен.

Ключевые слова: опоры ЛЭП, крен, стесненные условия, геодезический контроль, расчет точности

Для цитирования: Соловей П. И., Переварюха А. Н., Морозова Т. В. Определение крена опор ЛЭП, расположенных в стесненных условиях наблюдений // *Металлические конструкции*. 2025. Т. 31, № 1. С. 15–21. doi: 10.71536/mc.2025.v31n1.2. edn: rhdpjh.

Original article

DETERMINATION OF THE INCLINATION OF TRANSMISSION LINE SUPPORTS LOCATED IN CRAMPED OBSERVATION CONDITIONS

Pavel I. Solovej¹, Anatoly N. Perevarjuha², Tatyana V. Morozova³

^{1,2,3} Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,

¹pavelsolovej1@gmail.com, ²a.n.perevaryukha@donnasa.ru, ³t.v.morozova@donnasa.ru

Abstract. The article presents an effective method for determining the tilt of transmission line supports located in cramped observation conditions. It has been established that if the center of the support is visible from only one reference point, the proposed method is the most effective and less labor-intensive compared to other methods for determining the tilt of supports. The technology for performing angular and linear measurements using a reflectorless electronic tachometer is described in detail. A detailed calculation of the accuracy of angular and linear measurements is performed. It is established that the main influence on the accuracy of determining the tilt of supports is exerted by errors in angular measurements. It is shown that under construction conditions, angular measurements should be performed with an error of no more than $\pm 4''$, and under operating conditions – no more than $\pm 8''$. A technique is given for determining the directional angle of the tilt vector, which is necessary in the case of aligning supports with an unacceptable tilt.



Keywords: transmission line supports, tilt, cramped conditions, geodetic control, accuracy calculation

For citation: Solovej P. I., Perevarjuha A. N., Morozova T. V. Determination of the inclination of transmission line supports located in cramped observation conditions. *Metal Constructions*. 2025;31(1):15–21. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2025.v31n1.2. edn: rhdphj.

Введение

Опоры ЛЭП представляют собой наиболее распространенный вид высотных сооружений. Под воздействием различных возмущающих факторов (неравномерные осадки, ветровые нагрузки) возникают недопустимые крены, которые приводят к нарушению бесперебойной подачи электроэнергии. Поэтому разработка и исследование эффективных методов определения крена опор ЛЭП, расположенных в стесненных условиях эксплуатации, являются актуальными.

Анализ исследований и публикаций

Геодезический контроль пространственного положения опор ЛЭП, расположенных на открытой местности эффективно определять с применением современных геодезических лазерных сканеров [1; 8; 9; 10]. Но при отсутствии видимости на низ сооружения сканеры применить невозможно.

Применяемый способ наклонного проектирования для определения крена опор с 2-х, 3-х опорных пунктов с использованием оптических теодолитов или электронных тахеометров не всегда применим, так как приборы необходимо устанавливать на осях симметрии сооружений.

В последнее время геодезический контроль пространственного положения металлических башен и опор ЛЭП выполняют с применением высокоточных датчиков-наклона [5], но они требуют надежной защиты от температурных и ветровых воздействий. Накоплен некоторый опыт [4; 6; 7] использования приемников спутниковых сигналов для определения деформаций высотных зданий и сооружений и их можно применять для дистанционного контроля крена опор

ЛЭП. Как и датчики наклона так и приемники спутниковых сигналов рационально использовать на уникальных опорах ЛЭП, где можно обеспечить их сохранность во время эксплуатации.

Описание объекта исследования

Объектом исследований являются металлические опоры линий электропередачи, расположенные в стесненных условиях геодезического контроля их вертикальной оси.

Цель работы

Разработать эффективный способ определения крена опор линий электропередачи, расположенных в труднодоступных для геодезических наблюдений местах.

Основной материал

Опоры линий электропередачи являются самыми распространенными в мире высотными сооружениями. Большинство из опор не превышает 50 метров [2]. Самой высокой опорой в России является опора высотой 197 метров в г. Балаково, а самая высокая в мире опора высотой 380 метров расположена в Китайской провинции Чжэцзян.

Под влиянием различных внешних факторов происходят неравномерные осадки основания, что приводит к возникновению крена опор, поэтому производят регулярный геодезический контроль положения вертикальной оси сооружения.

Если опора расположена на открытой местности, то ее крен эффективно определять из 2-х,

3-х опорных пунктов, расположенных на осях симметрии сооружения [2]. Но в стесненных условиях наблюдений, когда низ сооружения виден только с одного опорного пункта, такой метод применить невозможно.

В таких стесненных условиях нами предлагается следующий метод определения крена опор ЛЭП.

На расстоянии равно не менее высоты опоры закрепляют опорный пункт T , с которого виден центр (точка O) нижнего сечения (рис. 1). Необходимо стремиться, чтобы линия TO была примерно перпендикулярна направлению крена. На пересечении диагоналей AB и CD фиксируют точку O – центр нижнего сечения сооружения. В опорном пункте T устанавливают электронный тахеометр с безотражательной функцией измерения расстояний. Измеряют магнитный азимут α линии TO , расстояния $a = TO$, $b = TN$ и угол β .

Линейную величину крена вычисляют по формуле:

$$Q = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \beta}. \quad (1)$$

Для оценки точности определения крена Q продифференцируем выражение (1) по аргументам a , b , β :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial a} &= \frac{a - b \cdot \cos \beta}{\sqrt{Z}}; \\ \frac{\partial Q}{\partial b} &= \frac{b - a \cdot \cos \beta}{\sqrt{Z}}; \\ \frac{\partial Q}{\partial \beta} &= \frac{ab \cdot \sin \beta}{\sqrt{Z}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $Z = a^2 + b^2 - 2ab \cos \beta$; $\sqrt{Z} = Q$.

Перейдя к средним квадратическим погрешностям, получим:

$$M_Q^2 = \left(\frac{a - b \cdot \cos \beta}{\sqrt{Z}} \right)^2 m_a^2 + \left(\frac{b - a \cdot \cos \beta}{\sqrt{Z}} \right)^2 m_b^2 + \left(\frac{ab \cdot \sin \beta \cdot m_\beta}{\sqrt{Z} \cdot \rho} \right)^2, \quad (3)$$

где m_a, m_b, m_β – средние квадратические погрешности измерения параметров a , b , β .

Для упрощения вычислений примем: $a = b = S$, $m_a = m_b = m_s$, тогда формула (3) примет следующий вид:

$$m_Q^2 = m_s^2 (1 - \cos \beta) + \left(\frac{m_\beta \cdot S^2 \sin \beta}{\rho \sqrt{Z}} \right)^2. \quad (4)$$

Так как параллактический угол β очень мал, то $\cos \beta = 0$, а $\sin \beta = 1$. Тогда формула (4) преобразуется к виду:

$$m_Q = \frac{m_\beta \cdot S^2}{\rho \cdot Q}. \quad (5)$$

Определим с какой точностью необходимо измерять угол β . Для этого из формулы (5), получим:

$$m_\beta = \frac{m_Q \cdot Q \cdot \rho}{S^2}. \quad (6)$$

Согласно Свода правил [3] предельные относительные крены опор зависят от их вида, высоты и представлены в таблице.

Для самых распространенных промежуточных прямых опор, высота которых в основном не превышает 50 метров предельный относительный крен составит

$$Q = 0,0030 \cdot 50 \text{ м} = 0,150 \text{ м} = 150 \text{ мм}.$$

Тогда предельная погрешность измерения крена, согласно правил математической статистики, составит

$$m_Q = Q/3 = 150/3 = 50 \text{ мм}.$$

Для расчета точности измерения угла β по формуле (6) примем:

$$m_Q = 50 \text{ мм}, Q = 1 \text{ 000 мм}, \rho = 206 \text{ 265}'' \approx 200 \text{ 000}'' , S = 50 \text{ м} = 50 \text{ 000 мм}.$$

Подставив эти параметры в формулу (6), получим:

$$m_\beta = \frac{50 \cdot 1 \text{ 000} \cdot 200 \text{ 000}}{(50 \text{ 000})^2} = \pm 4''.$$

Таким образом в условиях строительства угол β следует измерять электронным тахеометром с погрешностью не более $\pm 4''$.

В условиях эксплуатации предельный относительный крен металлических опор не должен превышать 0,005 высоты H сооружения, т. е.:

$$Q = 0,005 \cdot 50 \text{ м} = 0,250 \text{ м} = 250 \text{ мм}.$$

В свою очередь предельная погрешность определения крена опоры составит:

$$m_Q = \frac{Q}{3} = \frac{250}{3} = 83 \text{ мм}.$$

При тех же параметрах, что и в предыдущем расчете по формуле (6) получим

$$m_\beta = \pm 8''.$$

Точность угловых измерений при визировании на точку N (рис. 1) зависит от конструктивных особенностей верха опоры. Следует отметить, что не на всех конструкциях опор точка N совпадает с осью симметрии верха сооружения.

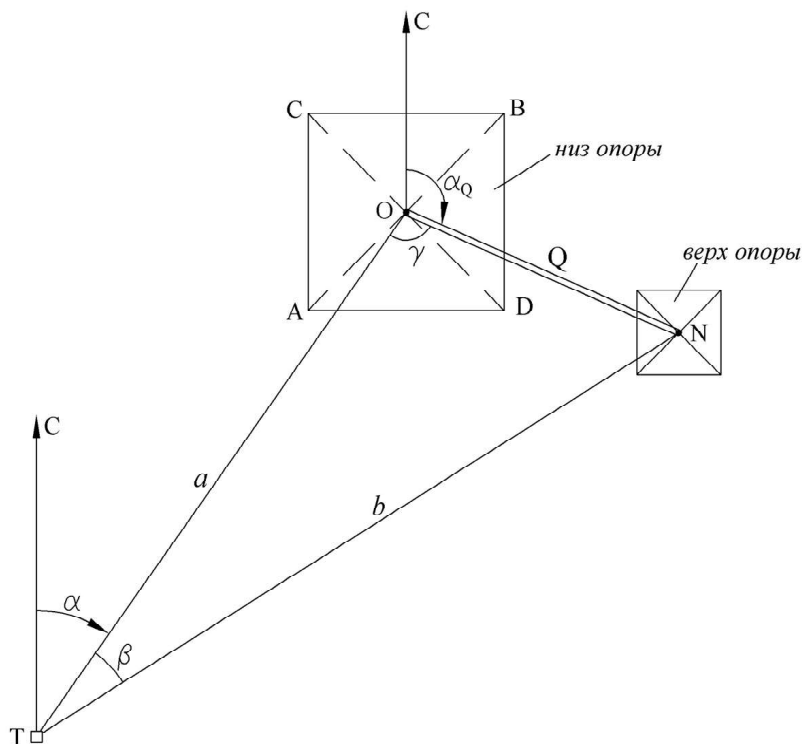


Рисунок 1 – Схема определения крена опоры с одного опорного пункта.

Таблица. Предельные относительные крены различного вида опор в условиях строительства

№ п/п	Вид опор	Предельный относительный крен
1	Промежуточные прямые	0,0030
2	Анкерные и анкерно-угловые, промежуточные угловые, концевые, порталы открытых распределительных устройств	0,0025
3	Специальные переходные	0,0020

На фото (рис. 2) представлены виды верха опор различной конструкции. Так, на рисунке 2, а, б показаны верха опор, на которых отчетливо видно их ось симметрии, совпадающая с точкой N. В таких условиях погрешность измерения угла β будет минимальной.

На рисунке 2, в, г показаны верха опор, в которых отсутствует ось симметрии и определить положение точки N невозможно. По нашим исследованиям погрешность измерения угла β в таких условиях может достигать до 1', что не отвечает расчетным требованиям ($m_\beta = \pm 4''$). В таких условиях при определении крена опор следует применять другие способы (например, способ координат).

Дирекционный угол вектора крена α_Q (рис. 1) определяют по следующей методике.

Из треугольника TON, используя теорему синусов, будем иметь:

$$\frac{Q}{\sin \beta} = \frac{b}{\sin \gamma}. \quad (7)$$

Откуда:

$$\sin \gamma = \frac{b \cdot \sin \beta}{Q}, \quad \gamma = \arcsin(\gamma). \quad (8)$$

Тогда дирекционный угол вектора крена можно вычислить по формуле:

$$\alpha_Q = \alpha + 180^\circ - \gamma. \quad (9)$$

Дирекционный угол α_Q необходимо знать в случае недопустимого крена опор и их возможного выравнивания. Требования к точности

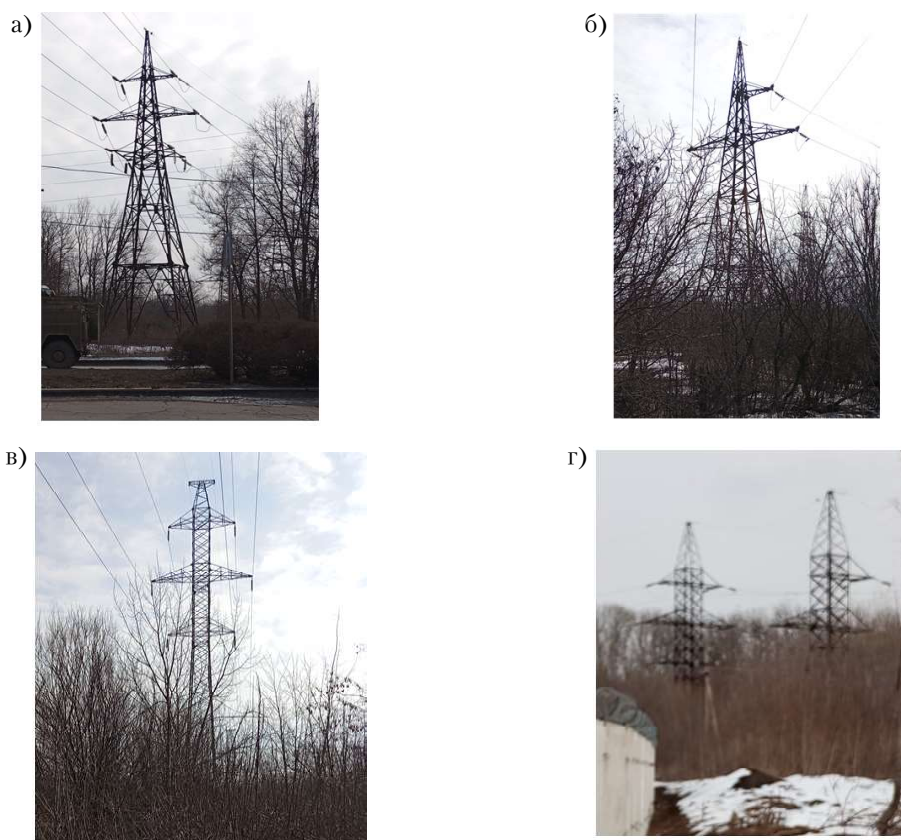


Рисунок 2 – Различные конструкции верха опор ЛЭП: а, б) верха опор, на которых можно наметить ось симметрии; в, г) верха опор, в которых отсутствует ось симметрии.

определения параметра α_0 достаточно подробно описаны в работе [2].

Заключение

По итогам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что определение крена опор ЛЭП при наличии видимости на основании сооружения с одного опорного пункта предлагаемый способ может быть достаточно эффективным и наименее трудоемким.

2. Доказано, что наибольшее влияние на точность определения крена предлагаемым способом оказывают погрешности угловых измерений.
3. Разработан способ вычисления дирекционного угла вектора крена, который необходим в случае недопустимого крена и возможного выравнивания сооружения.
4. Данный способ прошел апробацию на ряде реальных опор ЛЭП, расположенных в стесненных условиях эксплуатации и показал достаточную точность и эффективность.

Список источников

1. Вальков В. А., Яковлев А. А. Геодезический мониторинг высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования // Естественные и технические науки. 2015. N 2 (80). С. 89-92. URL: <https://rucont.ru/efd/490621> (дата обращения: 12.10.2024). ISSN 1684-2626.

References

1. Valkov, V.A. and Yakovlev, A.A. (2015), "Geodetic Monitoring of High-Rise Structures Using Terrestrial Laser Scanning Technology", *Natural and Technical Sciences*, vol. 2, no. 80, pp. 89-92, available at: <https://rucont.ru/efd/490621> (Accessed 12 October 2025). ISSN 1684-2626.

2. Соловей П. И., Переварюха А. Н. Геодезический мониторинг деформаций высотных сооружений башенного типа в условиях эксплуатации: монография. Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры; ЭБС АСВ, 2023. 237 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/139427.html> (дата обращения: 18.02.2025).
3. СП 126.13330-2017. Геодезические работы в строительстве. М.: Стандартинформ, 2018. 53 с.
4. Фялковский А. Л. Разработка и исследование технологических решений повышения качества геодезического мониторинга динамических объектов с использованием ГНСС: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32. Москва, 2015. 152 с.
5. Хиллер Б. Разработка и исследование автоматизированной системы геодезического деформационного мониторинга инженерных сооружений на основе высокоточной цифровой инклинометрии и тахеометрии: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32. Москва, 2017. 24 с. 144 с.
6. High Accuracy Real-time Dam Monitoring Using Low-Cost GPS Equipment / R. Ali [et al.]. // Conference: From Pharaohs to Geoinformatics FIG - TS 43 - Deformation Measurement and Analysis 5 At: Cairo (Cairo, Egypt, 16-21 April 2005). Cairo, 2005. P. 1-20.
7. Baraka M. A., El-Shazly A. H. Monitoring Bridge Deformations During Static Loading Tests Using GPS // From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8 (Cairo, Egypt, 16-21 April 2005). Cairo, 2005. P. 1-10.
8. Berenyi A., Lovas T., Barsi A. Terrestrial Laser Scanning - Civil Engineering Applications // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Newcastle, UK, 26-30 April 2010). Vol. XXXVIII. Part 5 Commission V Symposium. Newcastle, 2010. P. 80-85.
9. Deformation measurement using terrestrial laser scanning at the hydropower station of Gabčíkovo / T. Schäfer [et al.]. // IN GEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying (Bratislava, Slovakia, 11-13 November 2004). Bratislava, 2004. P. 1-10.
10. Zhang Guo-hui. Deformation monitor based on 3D laser scanner // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Beijing, China, 2008). Vol. XXXVII. Part B4. Beijing, 2008. P. 1549-1551.
2. Solovej, P.I. and Perevaryuxa, A.N. (2023), *Geodezicheskij monitoring deformacij vysotnyx sooruzhenij bashennogo tipa v usloviyax ekspluatatsii* [Geodetic monitoring of deformations of high-rise tower-type structures under operating conditions]: monograph, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, EBS DIA, Makeevka, Russia, available at: <https://www.iprbookshop.ru/139427.html> (Accessed 18.02.2025).
3. Ministry of Construction and Housing and Municipal Services of the Russian Federation (2018), *SP 126.13330.2017: Geodezicheskie raboty v stroitelstve* [SP 126.13330.2017 Geodetic works in construction], Standartinform, Moscow, Russia.
4. Fyalkovskij, A.L. (2015), "Development and research of technological solutions to improve the quality of geodetic monitoring of dynamic objects using GNSS", Ph.D. Thesis, Geodesy, Moscow State of Geodesy and Cartography University, Moscow, Russia.
5. Xiller, B. (2017), "Development and research of an automated system for geodetic deformation monitoring of engineering structures based on high-precision digital inclinometry and tacheometry", Ph.D. Thesis, Geodesy, Moscow State of Geodesy and Cartography University, Moscow, Russia.
6. Ali, R., Cross, P., Kingdom, U. and El-Sharkawy, A. (2005), "High Accuracy Real-time Dam Monitoring Using Low-Cost GPS Equipment", *Conference: From Pharaohs to Geoinformatics FIG - TS 43 - Deformation Measurement and Analysis 5 At: Cairo*, Cairo, Egypt, 16-21 April 2005, pp. 1-20.
7. Baraka, M.A. and El-Shazly, A. H. (2005), "Monitoring Bridge Deformations During Static Loading Tests Using GPS", *From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8*, Cairo, Egypt, 16-21 April 2005, pp. 1-10.
8. Berényi, A., Lovas, T. and Barsi, A. (2010), "Terrestrial Laser Scanning - Civil Engineering Applications", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium*, Newcastle, UK, 26-30 April 2010, pp. 80-85.
9. Schäfer, T., Weber, T., Kyrinovic, P. and Zámečníková, M. (2004), "Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo", *IN GEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*, Bratislava, Slovakia, 11-13 November 2004, pp. 1-10.
10. Zhang, Guo-hui (2008), "Deformation monitor based on 3D laser scanner", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVII, Part B4*, Beijing, China, 2008, pp. 1549-1551.

Информация об авторах

Соловей Павел Илларионович – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: исследование статических и динамических деформаций высотных зданий и сооружений.

Переварюха Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной геодезии Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: исследование статических и динамических деформаций колеблющихся и вращающихся объектов.

Морозова Татьяна Васильевна – старший преподаватель кафедры инженерной геодезии Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: исследование сдвижения земной поверхности и деформаций зданий и сооружений под действием подземных горных работ.

Information about the authors

Solovej Pavel I. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering Geodesy, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: research of static and dynamic deformations of high-rise buildings.

Perevarjuha Anatoly N. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Geodesy, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: research of static and dynamic deformations of varying and rotating objects.

Morozova Tatyana V. – Senior Lecturer, Department of Engineering Geodesy, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: research movement a terrestrial surface and deformations of buildings and constructions under the influence of underground mountain works.

Вклад авторов:

Соловей П. И. – научное руководство; концепция исследования; расчет точности; написание исходного текста; итоговые выводы.

Переварюха А. Н. – натурные геодезические исследования; обоснование точности; обработка результатов; написание исходного текста.

Морозова Т. В. – выполнение экспериментальных исследований; обработка результатов; оформление статьи; доработка текста.

Contribution of the authors:

Solovej P. I. – scientific supervision; research concept; accuracy calculation; writing the original text; final conclusions.

Perevarjuha A. N. – in-kind geodetic surveys; justification of accuracy; processing of results; writing of the original text.

Morozova T. V. – conducting experimental research; processing results; preparing articles; revising text.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.02.2025; одобрена после рецензирования 21.03.2024; принята к публикации 28.03.2025.

The article was submitted 27.02.2025; approved after reviewing 21.03.2024; accepted for publication 28.03.2025.