

DOI: 10.32347/2786-7269.2023.3.122-133

УДК 528.4

д.т.н., професор **Кучин О.С.**,  
askuchin77@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4031-164X,к.т.н., доцент **Бруй Г.В.**,  
Brui.h.v@nmu.one, ORCID: 0000-0001-9527-8889,к.т.н., доцент **Янкін О.Є.**,  
yankin.o.ue@nmu.one, ORCID: 0000-0003-3208-3253,

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО ЗМІЩЕННЯ ТОЧОК ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ГЕОДЕЗИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

*Наведено результати геодезичних (маркшейдерських) спостережень та результатів тривимірного моделювання зрушень земної поверхні на спостережній станції, закладеній над очисними роботами 124-ї лави шахти «Благодатна» у Західному Донбасі (Україна). Для визначення зрушень та деформацій трунтові репера профільних ліній координувалися за допомогою GNSS - приймача та електронного тахеометра з точністю їх просторового положення 4-5 мм. Побудовано просторові 3D - моделі зміщення точок земної поверхні в зоні впливу гірничих робіт. За їх допомогою розв'язувати задачі щодо встановлення фактичних величин зрушень та деформацій земної поверхні на підроблюваних територіях. 3D-модель зрушення точок земної поверхні, спрогнозована за методикою діючих державних стандартів України, надає можливість оцінювати вплив підземних очисних гірничих робіт на екологічну ситуацію району підробки та безпеку функціонування цивільних та промислових споруд у небезпечній зоні.*

*Ключові слова:* геодезичні спостереження; зрушення та деформації; просторова модель зрушення; репер; осідання земної поверхні.

Геодезичні (маркшейдерські) спостереження за зрушенням земної поверхні зазвичай виконують заздалегідь (до початку проведення очисних гірничих робіт), на пунктах типових або спеціальних спостережних станціях. В результаті виконання спостережень одержують величини зрушень та деформацій земної поверхні вздовж лінії реперів (профільної лінії).

Сучасне геодезичне обладнання за результатами вимірювань дозволяє отримати вектор зміщення окремо закладених реперів та їх ліній. Це стало можливим з появою точних електронних тахеометрів, GNSS-приймачів, безпілотних літальних апаратів та прикладних програмних продуктів з обробки

результатів спостережень [1-5]. Використання сучасного геодезичного обладнання задовольняє необхідним умовам щодо точності спостережень. Область застосування безпілотних літальних апаратів обмежується погодними умовами, недостатньою точністю зйомки, складністю закріплення фіксуючих марок, наявності рослинності. Використання GNSS-приймачів у режимі статичної зйомки збільшує час проведення геодезичних робіт за умови постійної зміни рельєфу місцевості над очисним вибоєм, що рухається, а в режимі RTK знижується точність виконання зйомки. Повітряне лазерне сканування також залежить від погодних умов, виникають певні складнощі знаходження невеликих за розмірами реперів, які в більшості випадків мають бути заглибленими.

При використанні електронних тахеометрів суттєво підвищується точність та швидкість спостережень, вплив погодних умов незначний. Використання жорстких висків вирішує проблему центрування над заглибленими реперами. При традиційних способах вимірів (горизонтальні кути, довжини, перевищення) систематичні та випадкові похибки накопичуються і при значній протяжності профільних ліній призводять до зниження точності та достовірності результатів. Крім цього, результати спостережень дають можливість аналізу лише вздовж траєкторії профільної лінії без можливості оцінки векторів просторового зміщення. Застосування нових технологій спостережень дозволяє отримувати вектори зрушень реперів у межах мульди з практично однаковою точністю.

Метою досліджень є створення просторової моделі зрушення земної поверхні за результатами геодезичних інструментальних спостережень та вирішення за її допомогою низки актуальних завдань з охорони порушених земель та об'єктів на підроблюваних територіях.

Актуальність цих питань призвела до вивчення процесу зрушення не тільки в Україні, а й за кордоном [9-15]. Дослідження виконуються найчастіше методами фізичного моделювання осідання в результаті послідовного вилучення запасів вугілля в лаві. Досліджується механізм осідання земної поверхні при розробці свити вугілля. На жаль, ці результати не можуть бути адаптовані до умов України через малу потужність вугільних пластів та специфіку гірських порід. Багато робіт у галузі зрушення земної поверхні від впливу видобутку корисних копалин [16-18] засновані на чисельному моделюванні та ймовірнісному аналізі переміщень точок поверхні на основі кореляційного розпізнавання параметрів гірського масиву. Аналіз публікацій [19-23] показав, що практична складова, яка визначає напрямки сучасних наукових досліджень процесу деформування гірських порід є: встановлення взаємозв'язку між вертикальною і горизонтальною проєкціями вектору зрушення, визначення навантажень та переміщення на контурі та виробок.

Особливістю проведених нами досліджень є використання комп'ютерного моделювання поверхні мульди зрушення за результатами натурних геодезичних спостережень на підроблюваній території.

У Західному Донбасі та інших гірничодобувних регіонах України, при значному обсягу виконаних спостережень за процесом зрушення, дослідження векторів просторового переміщення точок під час підробки очисними виробками не проводилися.

Для встановлення векторів зміщення точок за умов сучасних темпів просування очисного вибою (150-170 м/міс) в зоні впливу 124-ї лави шахти «Благодатна» ВАТ «Павлоградвугілля» закладено типову спостережну станцію, що складається з 4-х профільних ліній та кількох окремо розташованих реперів.

Розрізна піч пройдена за простяганням пласта  $c_1$  на глибині 335 м. Гірничо-геологічна характеристика ділянки в районі відпрацювання 124-ї лави характеризується такими показниками:

- потужність пласта, що виймається – 1,15-1,20 м;
- кут падіння пласта – 2-3°;
- довжина лави – 220 м;
- управління покрівлею – повне обвалення;
- потужність наносів – 65 м;
- середня швидкість руху забою – 150-170 м/міс ;
- підробка – вторинна.

Покрівля пласта  $c_1$  представлена аргілітами, алевролітами та слабкими пісковиками. За даними випробування зразків порід на опір стискання знаходиться в межах 12-30 МПа.

Товща, покрівлі гірських порід, підроблена очисними роботами пласта  $c_5$ . Потужність породних шарів між пластами становить 78 м.

Винесення в натуру положення реперів спостережної станції здійснювалося з використанням електронного тахеометра TOPCON-235N та GNSS-приймача Hi-Target V100 в режимі RTK з точністю позиціонування просторового положення реперів 2-4 см. Спостереження за просторовим зміщенням точок виконувалось електронним тахеометром з використанням жорсткого виска ОЖ-3, переобладнаного під призмову систему тахеометра. Попередньо виконане калібрування відбивних призм та юстування рівня ОЖ-3. Висота встановлення призми становила 1,2 м, а точність центрування не перевищувала 1,2 мм. При кожному вимірюванні здійснювався триразовий поворот штанги виску в горизонтальній площині на кут 120°, що підвищило точність центрування до 0,7 мм. За вихідну точку для винесення профільних ліній спостережної станції використовувались пункти полігонометрії 4 класу, закладені на проммайданчику шахти. Репера профільних ліній у вигляді заглиблених металевих стрижнів

діаметром 20 мм та довжиною 1,2 м закладені з інтервалом у 20 м, що відповідає інструкції щодо виконання інструментальних спостережень на типових та спеціальних спостережних станціях.

Верхня частина реперів накривалася квадратною металевою пластиною товщиною 0,8 мм зі стороною 20 см. Пластини необхідні для пошуку прихованих під ґрунтом реперів за допомогою металошукача при виконанні наступних спостережень.

Внаслідок проведення робіт з рекультивації, репера 1-3 було втрачено до моменту 2-го спостереження. Спостереження за просторовим зміщенням реперів профільних ліній здійснювалися з однієї точки (репер першої профільної лінії №15). Максимальна довжина у вимірюваннях не перевищувала 500 м, що відповідає абсолютній максимальній похибці лінійних вимірів – 2,5 мм. Частина цієї похибки для приладу, що використовується, є інструментальною (2 мм) і присутня в кожному рівноточному виміру. Виходячи з цього, відносна точність вимірювання відстані між реперами профільної лінії з урахуванням точності центрування жорсткого виска склала 1/10000.

Усього проведено п'ять серій інструментальних спостережень, включаючи дві серії до початку проведення очисних гірничих робіт. На момент виконання останнього спостереження процес зрушення реперів спостережної станції закінчився.

При відході вибою лави на відстань 330 м від розрізної печі в районі репера №20 візуально встановлено значні стиски земної поверхні у напрямі простягання пласта. Внаслідок дії горизонтальних деформацій залізобетонні плити автодороги місцевого значення поблизу репера №20 піднялися на висоту 50 см (рис. 1).



Рис. 1. Результат впливу стиснення земної поверхні на бетонне покриття дороги

В результаті вимірювань за кожною серією спостережень отримані просторові координати реперів, за якими визначено величини зрушень і деформацій земної поверхні. Для визначення зрушень та деформацій ґрунтові репери профільних ліній координувалися за допомогою електронного тахеометра з точністю їхнього просторового положення 4-5 мм.

Відповідно до [6], при пологому заляганні пластів, характер розподілу зрушень та деформацій земної поверхні симетричний щодо головного перерізу вхрест простягання пласта. Виходячи з цього, результати геодезичних спостережень у даних умовах підробки правомірно дзеркально екстраполювати щодо траєкторії 1-ї профільної лінії (вздовж лінії повстання пласта).

Математичне опрацювання результатів інструментальних геодезичних спостережень виконано за допомогою програмного забезпечення САМАРа (Система Автоматизації Маркшейдерських Робіт) на базовій платформі AutoCAD. Імпорт знімальних точок виконано у системі координат гірничого підприємства.

На рис. 2 відображені ізолінії осідань земної поверхні і вектори зміщення реперів на момент 4-го і 5-го спостереження (останнє спостереження проводилося за умови закінчення процесу зсуву). Для кожного репера показаний вектор зсуву в горизонтальній площині.

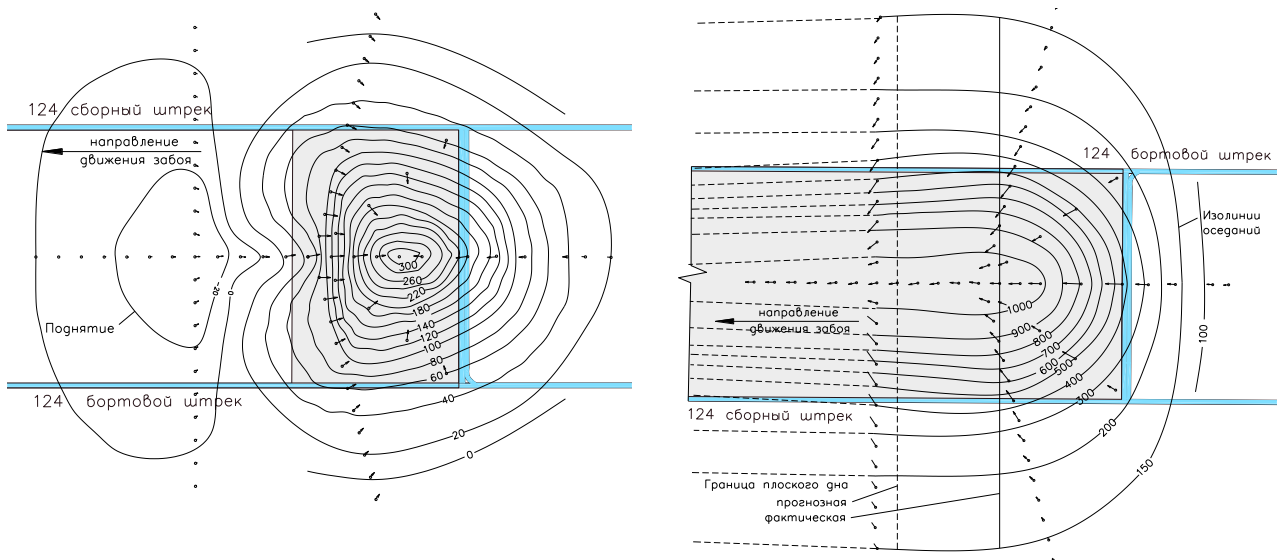


Рис. 2. Ізолінії осідань земної поверхні на момент 4-го та 5-го спостережень

За результатами обробки геодезичних спостережень, сформована модель поверхні мульди зрушення. Вона отримана як математична різниця топографічних поверхонь до початку процесу зрушення та на момент виконання спостережень. Під терміном «модель» в даному випадку слід розуміти тривимірну поверхню, яка, крім абсолютної позначки, може мати довільну



кількість інших параметрів (максимальні величини нахилів, кривизни тощо) у кожній вузловій точці моделі. Кожна модель завантажується в оперативну пам'ять комп'ютера, після закінчення роботи з нею записується в базу даних.

Первинна генерація може бути здійснена:

- шляхом прямого перетворення з об'єктів AutoCAD (3DFACE та POLYMEH) із збереженням топології елементів;
- шляхом зчитування з ASCII-файлу, що містить опис вузлів та значень параметрів у них, а також топологічний опис мережі;
- шляхом автоматичної генерації моделі на основі масиву нерегулярних позначок (пікетів), що мають довільну кількість параметрів.

У наведеному випадку модель створювалася на основі позначок, імпортованих з відомості результатів спостережень у систему AutoCAD. Кожен вузол моделі крім просторових координат містить усі п'ять типів зрушень та деформацій, отриманих за результатами камеральної обробки конкретного спостереження (осідання, максимальні величини нахилів, горизонтальних зрушень, кривизни, горизонтальних деформацій). Візуально модель є нерегулярною мережею трикутників, вершини яких – вузли (рис. 3).

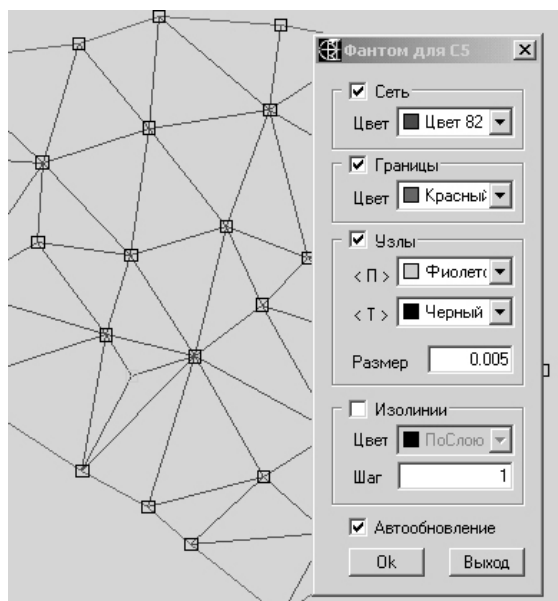


Рис. 3. Приклад візуалізації моделі у додатку САМАРА

За допомогою створених моделей можна визначати значення параметра у будь-якому вузлі або довільній точці (у цьому випадку значення параметра обчислюватиметься інтерполюванням). З моделями можна проводити різні математичні операції: додавання, віднімання, злиття та ін. Таким чином, маючи моделі осідання земної поверхні від впливу двох сусідніх виробок можна отримати сумарну загальну модель. При розгляді наслідків підтоплення земної

поверхні за допомогою моделей земної поверхні, поверхні осідань та рівня ґрунтових вод легко вирішується завдання встановлення меж підтоплення. В даному випадку контур зони підтоплення може бути побудований як результат перетину поверхні рівня ґрунтових вод і різниці земної поверхні та поверхні осідань. Для вирішення подібного завдання в умовах конкретного гірничого підприємства, що розробляє свиту вугільних пластів, моделі осідань можуть бути отримані через прогнозування за методикою чинного стандарту [6].

Для візуалізації процесу зрушення земної поверхні побудовано просторові моделі змінення топографічної вихідної поверхні внаслідок впливу очисних гірничих робіт (рис. 4). Для цього в автоматизованому режимі за допомогою команди програмного продукту САМАРа (*Побудувати мережу AutoCAD*) створені позамасштабні мережі примітивом *3DFACE*.

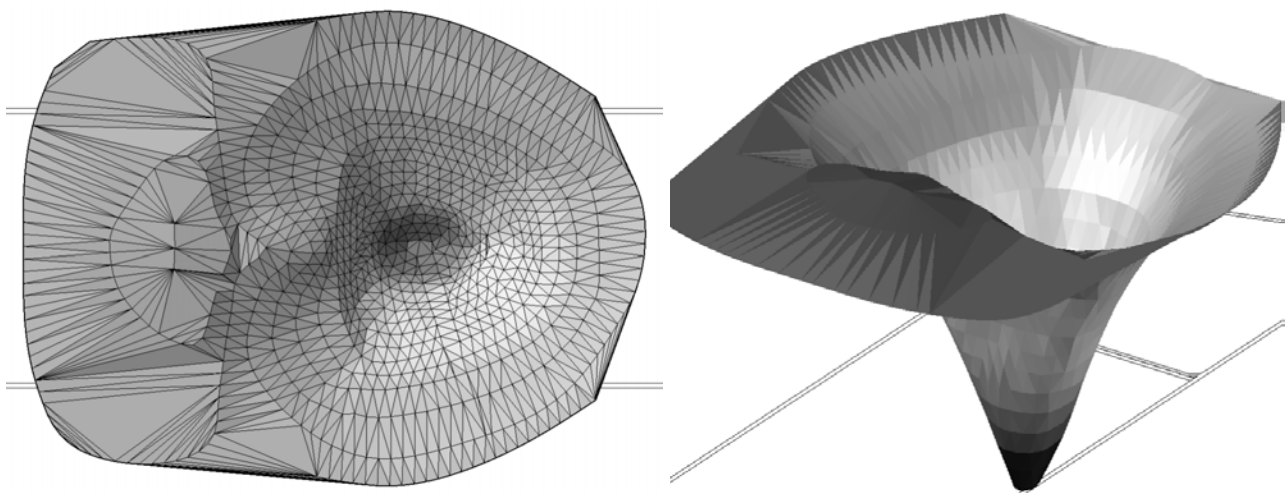


Рис. 4. Тривимірна просторова модель (позамасштабна) осідань земної поверхні на момент 4-го спостереження

На моделі (рис. 4, справа) візуально можна спостерігати підняття земної поверхні попереду лінії очисного вибою, зона яких спостерігається ізолінійної поверхні (рис. 2). Аналіз цього явища не є метою наведених досліджень, але слід зазначити, що просторове тривимірне представлення поверхності мульди зрушення надає можливості з візуального розуміння процесу зрушення на очисним вибоєм, що рухається.

Представлені просторові моделі дозволять визначати величини осідань, нахилів, горизонтальних зрушень деформацій земної поверхні у довільних точках мульди зрушення. Це завдання є актуальним, тому що в зоні впливу гірничих робіт розташовані лінії електромереж високої напруги, які встановлені на металевих фермових конструкціях. Найбільш небезпечними видами деформацій даного виду інженерних комунікацій є саме нахили земної поверхні.

Представлений метод комп'ютерного тривимірного моделювання може бути використаний не лише для аналізу результатів спостережень, але й для прогнозування впливу підземних розробок на земну поверхню та об'єктів, розташованих на ній. Тривимірні моделі зрушення земної поверхні будуються за результатами розрахунку очікуваних величин зрушень і деформацій.

Прогнозна тривимірна модель осідань земної поверхні [6] за наведеним вище алгоритмом побудована для визначення зрушень та деформацій земної поверхні по трасі газопроводу внаслідок впливу 1065-ї лави пласта  $c_{10}^B$  ВСП «ШАХТОУПРАВЛІННЯ ДНІПРОВСЬКЕ» ПрАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ» (рис. 5).

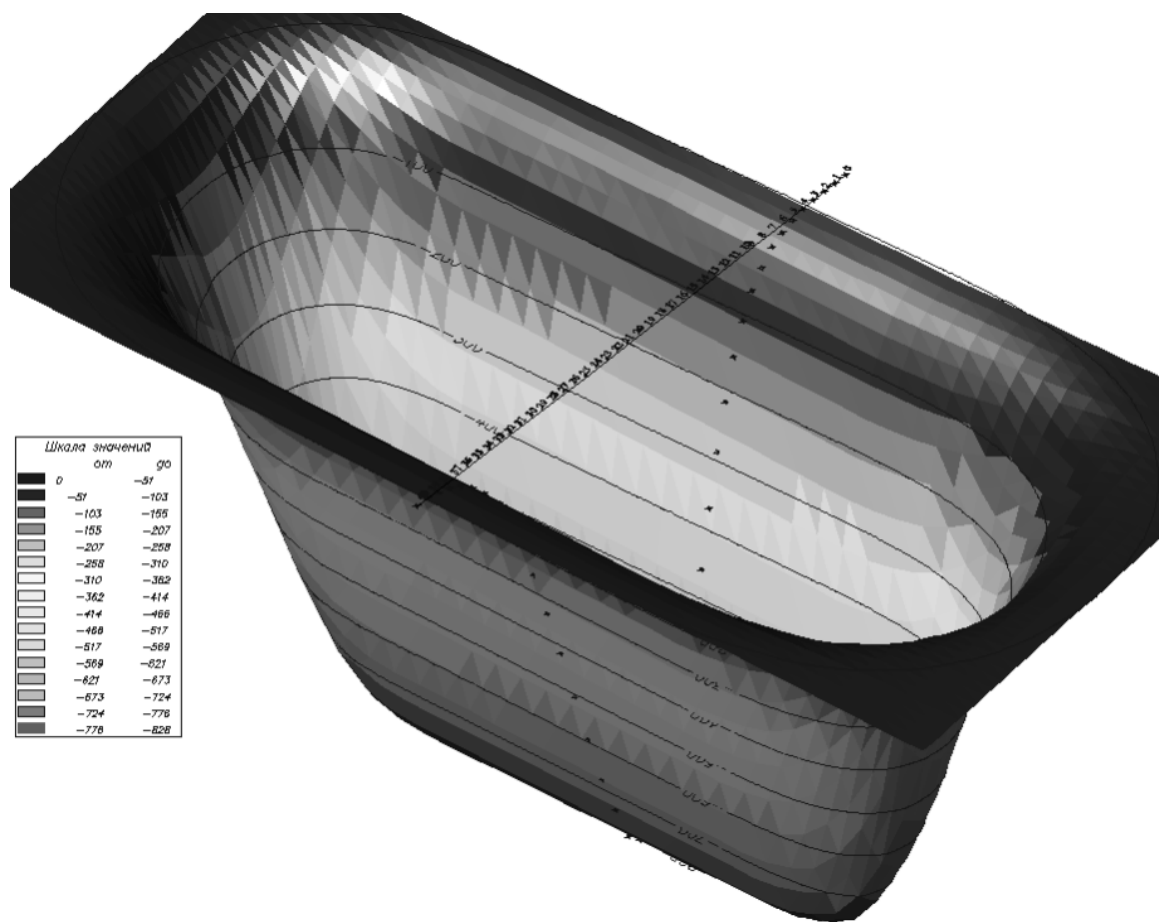


Рис. 5. Тривимірна модель осідань (М 100:1) земної поверхні внаслідок впливу 1065-ї лави пласта  $c_{10}^B$  ВСП «ШАХТОУПРАВЛІННЯ ДНІПРОВСЬКЕ» ПрАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ»

У наведеній статті розглянуто методику виконання маркшейдерсько-геодезичних спостережень за зсувом земної поверхні, їх камеральну обробку з використанням програмного комплексу САМАРа (Україна), а також представлено можливості аналізу та застосування тривимірних моделей з метою прогнозування негативних екологічних наслідків розробки вугільних родовищ.



**ПОСИЛАННЯ**

1. Grishchenkova, E.N. (2014). Justification of the conditions for the use of electronic tachometers for instrumental observations at mine surveying observation stations. Problems of subsoil use: Collection of scientific papers. Part I. National Mineral and Raw Materials University "Gorny", St. Petersburg, C. 157-159.
2. Kuchin O.S., Chemakina M.V., Balafin I.E. (2017). Displacement of undermining rock mass above the moving longwall. Scientific Bulletin of National Mining University. № 1. C. 55-60.
3. Кучин О.С. (2021) Аналіз точності визначення об'ємів корисних копалин на складах з використанням сучасних прикладних програм / Кучин О.С., Згама О.А., Баришніков А.С. // Національний гірничий університет. Збірник наукових праць. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка». – № 65. – С. 16-27.
4. Kurmanbaev O.S., Kirgizbaeva D.M., Nurpeisova M.B. (2015). Research of geographic information systems at creation 3D models // 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM, Bulgaria, 18-24 June, C. 281-290.
5. Пряжин, А.А., Сашурин, А.Д., Боликов, В.Е., Ручкин, В.И., Ефремов, Е.Ю., Пряжина, Н.А., (2016). Особенности проведения геодинамического мониторинга на Узельгинском месторождении. Проблемы недропользования, вып. 4, С. 81–88. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.081>
6. Правила підробки споруд, будівель та природних об'єктів при видобутку вугілля підземним способом (2004) // Галузевий стандарт. – К.: Мінпаливенерго України. – 127 с.
7. Wang, Y., Zheng, J., & Wang, H. (2019). Fast Mesh Simplification Method for Three-Dimensional Geometric Models with Feature-Preserving Efficiency. Scientific Programming, 2019, C. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2019/4926190>
8. Yang, D., Qiu, H., Ma, S., Liu, Z., Du, C., Zhu, Y., & Cao, M. (2022). Slow surface subsidence and its impact on shallow loess landslides in a coal mining area. CATENA, 209, 105830. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105830>
9. Yastika, P.E., Shimizu, N., & Abidin, H.Z. (2019). Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2017 in coastal area of Semarang, Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, and Sentinel-1A SAR data. Advances in Space Research, 63(5), C. 1719–1736. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.008>
10. Chen, B., Li, Z., Yu, C., Fairbairn, D., Kang, J., Hu, J., & Liang, L. (2020). Three-dimensional time-varying large surface displacements in coal exploiting areas revealed through integration of SAR pixel offset measurements and mining subsidence model. Remote Sensing of Environment, 240 с., 111663. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111663>
11. Salmi, E.F., Nazem, M., & Karakus, M. (2017). The effect of rock mass gradual deterioration on the mechanism of post-mining subsidence over shallow abandoned coal mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 91, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.11.012>.
12. F. Salmi, E., & J. Sellers, E. (2022). A Rock Engineering System Based Abandoned Mine Instability Assessment Index with Case Studies for Waihi Gold Mine. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4034064>
13. Sepehri, M., Apel, D. B., & Hall, R. A. (2017). Prediction of mining-induced surface subsidence and ground movements at a Canadian diamond mine using an elastoplastic finite element model. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 100, C. 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.10.006>
14. Zhao, J., & Konietzky, H. (2020). Numerical analysis and prediction of ground surface movement induced by coal mining and subsequent groundwater flooding. International Journal of Coal Geology, 229, 103565. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103565>
15. Ma, S., Li, J., & Li, Z. (2022). Critical support pressure of shield tunnel face in soft-hard mixed strata. Transportation Geotechnics, 37, 100853. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100853>

16. Zheng, M., Li, S., Zhao, H., Huang, X., & Qiu, S. (2021). Probabilistic analysis of tunnel displacements based on correlative recognition of rock mass parameters. *Geoscience Frontiers*, 12(4), 101136. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.12.015>.
17. Li, N., Nguyen, H., Rostami, J., Zhang, W., Bui, X.-N., & Pradhan, B. (2022). Predicting rock displacement in underground mines using improved machine learning-based models. *Measurement*, 188, 110552. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110552>
18. Salmi, E.F., Karakus, M., & Nazem, M. (2019). Assessing the effects of rock mass gradual deterioration on the long-term stability of abandoned mine workings and the mechanisms of post-mining subsidence – A case study of Castle Fields mine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, C. 169–185. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.007>
19. Dai, H., Li, P., Marzhan, N., Yan, Y., Yuan, C., Serik, T., Guo, J., Zhakypbek, Y., & Seituly, K. (2022). Subsidence control method by inversely-inclined slicing and upward mining for ultra-thick steep seams. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(1), C. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.10.003>
20. Sun, W., Wang, H., & Hou, K. (2018). Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas. *Journal of Cleaner Production*, 171, C. 567–579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.253>
21. Liu, H., Zhang, J., Li, B., Zhou, N., Xiao, X., Li, M., & Zhu, C. (2020). Environmental behavior of construction and demolition waste as recycled aggregates for backfilling in mines: Leaching toxicity and surface subsidence studies. *Journal of Hazardous Materials*, 389, 121870. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121870>
22. Ghabraie, B., Ren, G., Zhang, X., & Smith, J. (2015). Physical modelling of subsidence from sequential extraction of partially overlapping longwall panels and study of substrata movement characteristics. *International Journal of Coal Geology*, 140, C. 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.01.004>
23. Ju, J., & Xu, J. (2015). Surface stepped subsidence related to top-coal caving longwall mining of extremely thick coal seam under shallow cover. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78, C. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.05.003>

doctor of Technical Sciences, Professor **Kuchin Oleksandr**,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Brui Hanna**,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Yankin Oleksandr**,  
Dnipro University of Technology

## **MODELING OF SPATIAL DISPLACEMENT OF POINTS ON THE EARTH'S SURFACE BASED ON THE RESULTS OF GEODETIC OBSERVATIONS**

The results of geodetic observations and the results of three-dimensional modeling of the earth's surface displacements at the observation station, laid over the longwall 124 of the Blagodatnaya Mine in the Western Donbass (Ukraine), are presented. To determine the displacements and deformations, the ground benchmarks of the profile lines were coordinated using a GNSS receiver and an electronic total station with an accuracy of their spatial position of 4-5 mm. Processing of the results of observations was carried out using the software product SAMARa (Automation System for Mine Surveying). Spatial 3D models of the displacement of points on the

earth's surface in the zone of influence of mining operations have been built. With their help, it is possible to solve problems of establishing the actual values of displacements and deformations of the earth's surface in undermined territories. A 3D model of displacements of points on the earth's surface, predicted according to the methodology of the current State Standards of Ukraine, will make it possible to assess the impact of underground mining on the ecological situation of the undermining area and the safety of civil and industrial structures in the hazardous zone.

Keywords: geodetic observations; displacements and deformations; spatial model of displacements; benchmark; earth's surface subsidence.

## REFERENCES

1. Grishchenkova, E.N. (2014). Justification of the conditions for the use of electronic tachometers for instrumental observations at mine surveying observation stations. Problems of subsoil use: Collection of scientific papers. Part I. National Mineral and Raw Materials University "Gorny", S. 157-159. {in English}
2. Kuchin O.S., Chemakina M.V., Balafin I.E. (2017). Displacement of undermining rock mass above the moving longwall. Scientific Bulletin of National Mining University. № 1. S. 55-60. {in English}
3. Kuchyn O.S. (2021). Analiz tochnosti vyznachennia ob'ємiv korysnykh kopalyn na skladakh z vykorystanniam suchasnykh prykladnykh prohram. Natsionalnyi hirnychyi universytet. Zbirnyk naukovykh prats. – Dnipro : NTU «Dniprovska politehnika», № 65, S. 16-27. {in Ukrainian}
4. Kurmanbaev O.S., Kirgizbaeva D.M., Nurpeisova M.B. (2015). Research of geographic information systems at creation 3D models // 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM, Bulgaria, 18-24 June, S. 281-290.
5. Panzhin, A.A., Sashurin, A.D., Bolikov, V.E., Ruchkin, V.I., Efremov, E.Yu. and Panzhina, N.A., (2016). Features of geodynamic monitoring at Uzelginskoye field. Problems of Subsoil Use, 4, S. 81–88.. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.081> {in Russian}
6. Pravyla pidrobky budivel, sporud ta pryrodnykh ob'єktiv pry vydobuvanni vuhillia pidzemnym sposobom: HSTU 101.00159226.001-2003. – [Chynnyi vid 2003–11–22]. – K.: Minpalyvenerho Ukrainy, 2003. – 126 s.– tabl. – (Natsionalni standarty Ukrainy). {in Ukrainian}
7. Wang, Y., Zheng, J., & Wang, H. (2019). Fast Mesh Simplification Method for Three-Dimensional Geometric Models with Feature-Preserving Efficiency. Scientific Programming, 2019, S. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2019/4926190>. {in English}
8. Yang, D., Qiu, H., Ma, S., Liu, Z., Du, C., Zhu, Y., & Cao, M. (2022). Slow surface subsidence and its impact on shallow loess landslides in a coal mining area. CATENA, 209 s., 105830. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105830>. {in English}
9. Yastika, P.E., Shimizu, N., & Abidin, H.Z. (2019). Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2017 in coastal area of Semarang, Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, and Sentinel-1A SAR data. Advances in Space Research, 63(5), S. 1719–1736. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.008>. {in English}
10. Chen, B., Li, Z., Yu, C., Fairbairn, D., Kang, J., Hu, J., & Liang, L. (2020). Three-dimensional time-varying large surface displacements in coal exploiting areas revealed through integration of SAR pixel offset measurements and mining subsidence model. Remote Sensing of Environment, 240 s., 111663. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111663>. {in English}
11. Salmi, E.F., Nazem, M., & Karakus, M. (2017). The effect of rock mass gradual deterioration on the mechanism of post-mining subsidence over shallow abandoned coal mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 91, S. 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.11.012>. {in English}

12. F. Salmi, E., & J. Sellers, E. (2022). A Rock Engineering System Based Abandoned Mine Instability Assessment Index with Case Studies for Waihi Gold Mine. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4034064>. {in English}
13. Sepehri, M., Apel, D. B., & Hall, R. A. (2017). Prediction of mining-induced surface subsidence and ground movements at a Canadian diamond mine using an elastoplastic finite element model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 100, S. 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.10.006>. {in English}
14. Zhao, J., & Konietzky, H. (2020). Numerical analysis and prediction of ground surface movement induced by coal mining and subsequent groundwater flooding. *International Journal of Coal Geology*, 229 s., 103565. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103565>. {in English}
15. Ma, S., Li, J., & Li, Z. (2022). Critical support pressure of shield tunnel face in soft-hard mixed strata. *Transportation Geotechnics*, 37, 100853. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100853>. {in English}
16. Zheng, M., Li, S., Zhao, H., Huang, X., & Qiu, S. (2021). Probabilistic analysis of tunnel displacements based on correlative recognition of rock mass parameters. *Geoscience Frontiers*, 12(4), 101136. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.12.015>. {in English}
17. Li, N., Nguyen, H., Rostami, J., Zhang, W., Bui, X.-N., & Pradhan, B. (2022). Predicting rock displacement in underground mines using improved machine learning-based models. *Measurement*, 188, 110552. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110552>. {in English}
18. Salmi, E. F., Karakus, M., & Nazem, M. (2019). Assessing the effects of rock mass gradual deterioration on the long-term stability of abandoned mine workings and the mechanisms of post-mining subsidence – A case study of Castle Fields mine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, S. 169–185. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.007>. {in English}
19. Dai, H., Li, P., Marzhan, N., Yan, Y., Yuan, C., Serik, T., Guo, J., Zhakypbek, Y., & Seituly, K. (2022). Subsidence control method by inversely-inclined slicing and upward mining for ultra-thick steep seams. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(1), S. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.10.003>. {in English}
20. Sun, W., Wang, H., & Hou, K. (2018). Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas. *Journal of Cleaner Production*, 171, 567–579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.253>. {in English}
21. Liu, H., Zhang, J., Li, B., Zhou, N., Xiao, X., Li, M., & Zhu, C. (2020). Environmental behavior of construction and demolition waste as recycled aggregates for backfilling in mines: Leaching toxicity and surface subsidence studies. *Journal of Hazardous Materials*, 389, 121870. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121870>. {in English}
22. Ghabraie, B., Ren, G., Zhang, X., & Smith, J. (2015). Physical modelling of subsidence from sequential extraction of partially overlapping longwall panels and study of substrata movement characteristics. *International Journal of Coal Geology*, 140, S. 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.01.004>. {in English}
23. Ju, J., & Xu, J. (2015). Surface stepped subsidence related to top-coal caving longwall mining of extremely thick coal seam under shallow cover. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78, S. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.05.003>. {in English}