

УДК 622.1:622.834

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-23>

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ОЧИСНИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ НА ЗЕМНУ ПОВЕРХНЮ ЗА ДАНИМИ МАРКШЕЙДЕРСЬКИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ

**Назаренко Валентин Олексійович,**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-7704-9270

**Бруй Ганна Валеріївна,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-9527-8889

**Панасюк Андрій Вікторович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри маркшейдерії

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: 0000-0001-7468-2022

**Молокова Світлана Валеріївна,**

викладач кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0002-5579-4656

**Куницька Марина Сергіївна,**

старший викладач кафедри маркшейдерії

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-2649-0939

*Наведено результати дослідження параметрів процесу зрушення земної поверхні над гірничими роботами шах Західного Донбасу. Автори використовували графоаналітичний метод дослідження геометричних параметрів зрушення, отриманих методом натурних маркшейдерських інструментальних вимірювань на спеціальних спостережних станціях. Запропоновано вдосконалити методику прогнозування зрушень та деформацій земної поверхні при відпрацюванні вугільних пластів довгими стовпами в напрямку вхрест простягання пласта. Розглянуті питання зміни параметрів зрушення земної поверхні під час повторної підробки. На прикладі натурних спостережень за зрушенням земної поверхні в Західному Донбасі показано, що вони значно відрізняються від умов первинної підробки. Установлено, що в разі відпрацювання пластів довгими стовпами хрест простягання мульда зрушення в плані приймає «грушоподібну», а не еліптичну форму, через невідповідності напівмульд у головних перерізах за простяганням у зонах падіння й повстання пласта. Відмінність коефіцієнтів, що характеризують підробленість земної поверхні в основних перетинах по простягання на ділянці «плосьького дна» призводить до поступового зростання максимального осідання в бік повстання пласта. Істотна відмінність коефіцієнтів у зонах з боку падіння та повстання пласта призводить до зміни характеру розподілу зрушень та деформацій у межах напівмульд.*

*Установлені відмінності параметрів зрушення земної поверхні при первинній і повторній підробках властиві умовам підробки спостережної станції № 7. Але вони дають змогу зробити висновок, що подібні відмінності мають місце й вони на стільки істотні, що докорінно змінюють представлення про закономірності зрушення земної поверхні при веденні очисних робіт в умовах порушеного гірничими роботами породного масиву. Це, своєю чергою, указує на необхідність проведення системних досліджень процесу зрушення земної поверхні в Західному Донбасі з метою встановлення параметрів зрушення при повторній і наступних підробках.*

**Ключові слова:** підземні гірничі роботи, земна поверхня, мульда осідання, деформації, маркшейдерські інструментальні вимірювання.

**Nazarenko Valentin, Brui Hanna, Panasiuk Andrii, Molokova Svitlana, Kunytska Maryna. Improvement of the methodology for predicting the impact of mining cleaning works on the earth's surface using data from surveying instrumental measurement**

The results of a study of the parameters of the earth surface displacement process above mining works in the Western Donbas are presented. The authors used a graphoanalytical method to study the geometric parameters of displacement obtained by field surveying instrumental measurements at special observation stations. It is proposed to improve the methodology for predicting displacements and deformations of the earth's surface when mining coal seams with long pillars in the direction of the cross-strike of the seam. The issues of changes in the parameters of earth surface displacement during repeated mining are considered. Using the example of field observations of earth surface displacement in the Western Donbas, it is shown that they differ significantly from the conditions of primary mining. It has been established that in the case of longwall mining, the cross-section of the displacement mould takes on a "pear-shaped" rather than an elliptical form due to the mismatch of the half-moulds in the main cross-sections along the strike in the dip and rise zones of the seam. The difference in the coefficients characterizing the deformation of the earth's surface in the main cross-sections along the strike in the "flat bottom" area leads to a gradual increase in the maximum subsidence towards the rise of the seam. A significant difference in the coefficients in the zones on the dip and rise sides of the stratum leads to a change in the nature of the distribution of shifts and deformations within the half-moulds.

The established differences in the parameters of the earth's surface shift during primary and secondary undermining are characteristic of the conditions of undermining at observation station No. 7. However, they allow us to conclude that such differences do exist and are so significant that they radically change our understanding of the patterns of earth surface displacement during mining operations in rock masses disturbed by mining. This, in turn, points to the need for systematic research into the process of earth surface displacement in the Western Donbas in order to establish the parameters of displacement during repeated and subsequent undermining.

**Key words:** underground mining works, earth surface, subsidence basin, deformations, surveying instrumental measurements.

**Вступ.** Сучасні технології видобутку корисних копалин дають змогу відпрацьовувати пологі вугільні пласти лавами за напрямом падіння (повстання). Дослідження зрушення земної поверхні при відпрацюванні довгих виїмкових стовпів ухрест простягання показують, що на поверхні утворюється мульда зрушення, характер розподілу деформацій, у якій відрізняється від випадку відпрацювання лав за простяганням. Це пояснюється значним перепадом глибин ведення гірничих робіт у межах однієї очисної виробки (зміна глибини залежить від кута падіння пласта, що розробляється, і довжини виїмкового стовпа). У нормативній методиці визначення очікуваних зрушень та деформацій земної поверхні [1] варіант відпрацювання лав хрест простягання не розглядається, а розрахунки деформацій, виконані за традиційною схемою, можуть призвести до суттєвих похибок прогнозування. Розглянемо наведену в «Правилах підробки...» [1] методику розрахунку очікуваних зрушень для умов відпрацювання вугільних пластів довгими стовпами вхрест простягання.

**Методи та методики дослідження.** Під час виконання роботи застосовано графоаналітичний метод дослідження геометричних параметрів зрушення земної поверхні над очисними виробками шахт Західного Донбасу, отриманих методом натурних маркшейдерських інструментальних вимірювань на спеціальних спостережних станціях.

**Результати графоаналітичних досліджень.** Очікувані зрушення та деформації

розраховуються в межах напівмульд: за падінням –  $L_1$ , за повстанням –  $L_2$  та за простяганням –  $L_3$ . Значення довжин напівмульд визначаються графічно на вертикальних розрізах, відповідних перерізам мульди. Напівмульди  $L_1, L_2$  обмежені з боку виробленого простору лініями, що проведені під кутами  $\psi_1, \psi_2$ , з боку масиву – кутами  $\phi_0, \beta_0, \gamma_0$ ; межі напівмульди  $L_3$  визначаються кутами  $\phi_0, \delta_0$  та  $\gamma_0$  (рис. 1). При повній підробці в напрямку вхрест простягання пласта (коефіцієнт, що характеризує підробленість земної поверхні вхрест простягання  $N_1 > 1$ ) у мульді зрушення між точками  $X_1$  і  $X_2$  формується плоске дно. До меж плоского дна примикають напівмульди  $L_1$  та  $L_2$ , довжини яких однозначно визначаються глибинами  $H_A$  і  $H_B$  відповідно.

Довжина напівмульди  $L_3$  – відстань у головному перерізі на розрізі по простяганням між краєм мульди і точкою перетину із земною поверхнею лінії, проведеної від межі виробки під кутом  $\gamma_0$ . Головним називається вертикальний перетин, що проходить через точку з максимальним осіданням земної поверхні.

Коефіцієнт  $N_2$ , що характеризує підробленість земної поверхні за простяганням, має функціональну залежність від глибини залягання пласта в головному перерізі за простяганням і впливає на величину максимального осідання  $\eta_m$ :

$$\eta_m = m q_0 N_1 N_2 \cos \alpha, \quad (1)$$

де  $m$  – потужність пласта;  $q_0$  – відносна величина максимального осідання;  $\alpha$  – кут падіння пласта;  $N_1$  та  $N_2$  – коефіцієнти.

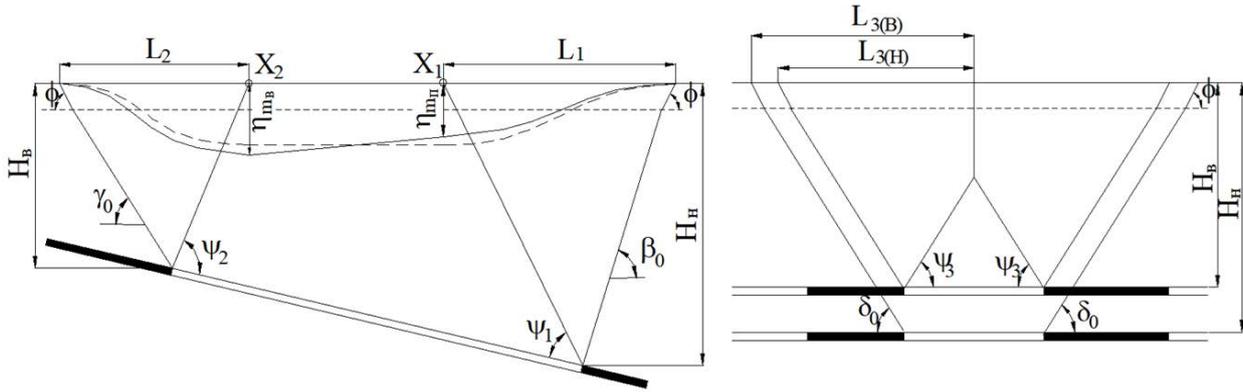


Рис. 1. Схема визначення довжин напівмульд для випадку відпрацювання лави вхрест простягання

Відповідно до вищесказаного виникає неоднозначність визначення величини  $\eta_m$ , тому що на ділянці плоского дна ( $X_1X_2$ ) головного перерізу вхрест простягання змінюється глибина розробки, а отже, змінюються довжина напівмульди за простяганням  $L_3$  і коефіцієнт  $N_2$ . Показник  $\eta_m$  є одним з основних при розрахунку очікуваних зрушень та деформацій і неоднозначність його визначення неминуче призведе до неоднозначності прогнозування впливу гірничих робіт на земну поверхню. Ба більше, залежно від коефіцієнта  $N_2$  вибираються відповідні функції розподілу зрушень і деформацій (типові криві) в напівмульді  $L_3$ , а оскільки  $N_2$  змінюється, то змінюватиметься і характер розподілу зрушень та деформацій на ділянці плоского дна. Це суперечить основним прийнятним положенням методики [1].

Напрошується висновок про непостійність осідань земної поверхні на ділянці плоского дна в головному перерізі вхрест простягання пласта при відпрацюванні пологих вугільних пластів лавами за повстанням (падінням). Це підтверджується даними натурних спостережень [2–4]. Для умов, що розглядаються, потрібно уточнити поняття «плоське дно», яке слід розглядати як ділянку мульди осідання, обмежену точками перетину земної поверхні лініями, проведеними від меж виробки під кутами  $\psi_1$  та  $\psi_2$ , і на якому осідання досягли максимально можливих (але не постійних) значень для даних умов підробки земної поверхні.

Максимальне осідання в  $i$ -му перерізі на ділянці  $X_1X_2$  можна обчислити за формулою (1), підставивши значення коефіцієнта  $N_2$ , що визначається відповідно до [1; 3], але залежно від глибини  $H_i$  для такого перерізу.

Простежимо розподіл осідань на ділянці  $X_1X_2$ , досліджуючи залежність максимальних осідань  $\eta_m$  від глибини  $H_i$ . Відомо, що коефіцієнт  $N_2$  пов'язаний із глибиною  $H$  виразом

$$N_2 = \sqrt{0,9 \frac{D_2}{H_i}}, \quad (2)$$

де  $D_2$  – довжина лави в напрямку вхрест простягання пласта.

При постійному куті падіння пласта  $\alpha$  на досліджуваній ділянці глибина  $H_i$  у точці на деякій відстані  $y$  від т.  $X_1$  визначається як

$$H_i = H_B + y \sin \alpha. \quad (3)$$

Тоді формула (1) з урахуванням (2) та (3) запишеться у вигляді

$$\eta_{mi} = m q_0 N_1 \sqrt{0,9 \frac{D_2}{H_B + y \sin \alpha} \cos \alpha}. \quad (4)$$

Ураховуючи, що довжина напівмульди  $L_3$  не постійна, для визначення зрушень і деформацій можна виділити три зони I, II і III (рис. 2).

Для зон I та II при розрахунку зрушень та деформацій пропонується використовувати напівмульди по простяганням відповідно  $L_{1(n)}$  і  $L_{2(b)}$ . Довжини напівмульд визначаються в перерізах, що проходять через точки  $X_1$  і  $X_2$ . Так, буде враховано фактор зміни глибини за повстанням і падінням пласта. У кожній із цих зон матиме місце свій коефіцієнт, що характеризує підробленість земної поверхні: у зоні I –  $N_{2(n)}$ , у зоні II –  $N_{2(b)}$  та відповідні значення максимального осідання:  $\eta_{m(n)}$  и  $\eta_{m(b)}$ .

Район Центрального Донбасу	
Розмір лави вхрест простягання, $D_2$ , м	1000
Розмір лави за простяганням, $D_1$ , м	200
Кут падіння пласта, град.	10
Глибина над центром лави, м	300
Потужність пласта, м	0,8
Потужність наносів, м	25
Підробка первинна	
Лава з усіх боків обмежена масивом	

У зоні III для розрахунку зрушень та деформацій у кожному конкретному перерізі, що проходить через відповідну точку на прямій  $X_1X_2$ , приймається напівмульда  $L_{3(i)}$ , яка визначається з урахуванням глибини в цій точці. Якщо кут падіння пласта в межах очисної виробки не змінюється,  $L_{3i}$  можна визначити графічно (рис. 2).

Нижче наведено результати порівняння розрахунків зрушень та деформацій земної поверхні, виконані за нормативною методикою [1] та з урахуванням викладених пропозицій щодо її уточнення. Розрахунки виконані для наступних гірничо-геологічних умов відпрацювання лави в напрямку вхрест простягання.

Розрахунок виконаний у головних перерізах за простяганням, що проходять через точки  $X_1$  і  $X_2$  (рис. 1). Результати розрахунку зведені в табл. 1.

Для кількісної оцінки обчислені абсолютні та відносні відхилення зрушень і деформацій земної поверхні за відповідними точками досліджуваних ліній (перетинів) (табл. 2).

**Результати досліджень натурних маркшейдерських інструментальних вимірювань.** Розглянемо питання зміни параметрів зрушення

земної поверхні під час повторної підробки. Аналіз результатів вивчення зрушення земної поверхні на вугільних родовищах показує, що параметри її зрушення при повторній підробці відрізняються від таких при первинній підробці. Такий же висновок можна зробити й із загальних закономірностей формування зони впливу гірничих розробок на земну поверхню [5–7]. Залежності кутових параметрів від показників міцності гірських порід описують формулами:

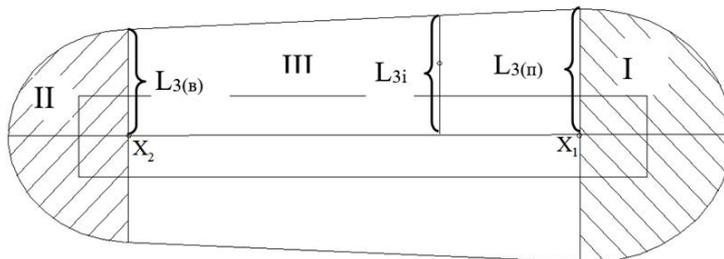
$$\delta_0 = 90^\circ - \arctg \sqrt{\frac{\mu}{1-\mu}};$$

$$\beta_0 = (90^\circ - \alpha) - \left( \cos^2 \alpha - \frac{\mu}{1-\mu} \sin^2 \alpha \right) (90^\circ - \delta_0);$$

$$ctg \delta_0 = ak_0 H \gamma \sigma_0^{-1},$$

де  $\beta_0$ ,  $\delta_0$  – кутові параметри:  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона для гірських порід;  $\sigma_0$  – міцність порід на одноосьовий стиск;  $a$ ,  $k_0$  – коефіцієнти пропорційності.

Очевидно, що в наведених виразах показники міцнісних властивостей порід виступають у ролі узагальнювальних показників властивостей підроблюваного породного масиву. Якщо



**Рис. 2. Зони розрахунку зрушень та деформацій при відпрацюванні вугільного пласта довгими стовпами вхрест простягання**

Таблиця 1

Параметр	За методикою «Правил підробки...» [1]		За новою методикою	
	Повстання	Падіння	Повстання	Падіння
$H$ , м	246	356	246	356
$L_3$ , м	209	209	189	229
$N_2$	0,866	0,866	0,947	0,8
$\eta_m$ , мм	512	512	560	473

Таблиця 2

**Відхилення обчислених параметрів зрушення**

Найменування параметра	Відхилення, %	
	Повстання	Падіння
Осідання	9	7
Нахил	28	20
Горизонтальна деформація	49	37
Кривизна	60	41
Горизонтальне зрушення	17	13

розглядати вже прироблений масив, то міцнісні властивості гірських порід «у куску» залишаються такими ж, як і до підробки, але масив загалом перетерпить істотні зміни і, з огляду на наведені вирази, варто очікувати зміни кутових параметрів зрушення земної поверхні.

До такого ж висновку приводить аналіз залежностей, що характеризують загальні закономірності формування мульди зрушення:

$$\eta_{(x)} = -\frac{\eta_0}{2} \left[ \Phi \left( \frac{D_p + x}{C_p H} \right) + \Phi \left( \frac{D_p - x}{C_p H} \right) \right];$$

$$\eta = \frac{k}{\pi c^2 z^2} \exp \left[ -\frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{c^2 z^2} \right],$$

де  $C_p$  і  $c$  – коефіцієнти, що залежать від фізико-механічних властивостей підроблюваної товщі.

Фізико-механічні властивості підробленого й непідробленого породного масиву різні, тому й коефіцієнти  $C_p$  і  $c$ , що їх характеризують, повинні відрізнятися. А це неминуче приведе до зміни закону розподілу зрушень і деформацій у мульді зрушення.

Цілеспрямовані натурні дослідження параметрів зрушення в умовах породного масиву, що порушений гірничими роботами, виконувалися на багатьох родовищах і, зокрема, на шахтах Донецького та Львівсько-Волинського басейнів. В узагальненому вигляді результати цих досліджень віддзеркалені в «Правилах підробки...» [1] і стосовно до основних показників зрушення земної поверхні зводяться до такого.

**Розподіл зрушень і деформацій земної поверхні в мульді зрушення.** У нормативному документі [1] вказується на зміну характеру розподілу й величин зрушень і деформацій земної поверхні та товщі при повторних підробках у зв'язку з активізацією процесу зрушення порівняно зі зрушеннями й деформаціями від одиночної виробки при первинній підробці. Загалом же, зміна характеру розподілу зрушень і деформацій поверхні при повторній підробці не відзначається.

**Кутові параметри зрушення земної поверхні.** Правила [1] регламентують зміну граничного кута  $\beta_0$ , що визначає границю впливу гірничих робіт на земну поверхню з боку падіння, при її повторній підробці. Ці зміни виражаються в зменшенні величин граничних кутів на  $5^\circ$  і стосуються районів Донбасу (за винятком Західного Донбасу) з марками вугілля: Д, ДГ, Г, ГЖ, ГЖО, Ж, ДО, КЖ, КС, ОС, Т, ТС. У районах залягання вугілля марки А при повторній підробці всі граничні кути ( $\beta_0$ ,  $\delta_0$ ,  $\gamma_0$ ) у корінних породах приймаються крутіше на  $5^\circ$ .

Зміни кутів зрушення  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$  при повторній підробці відзначені в антрацитових районах

Донбасу й у Львівсько-Волинському басейні, причому в останньому на  $5^\circ$  зменшується кут зрушення й у мезозойських відкладеннях  $\delta_m$ .

Відносна величина максимального осідання  $q_0$  при повторній підробці земної поверхні для умов Львівсько-Волинського басейну регламентується на 10 % більше, ніж при первинній підробці. При повторній підробці й кутах падіння від  $0^\circ$  до  $25^\circ$  у Донбасі відносна величина максимального осідання  $q'_0$  обчислюється за формулою:

$$q'_{0n} = q_0 \left[ 1 + (1 - q_0) \frac{H_1}{H} \right]$$

де  $q_0$  – відносна величина максимального осідання при первинній підробці.

На інших вугільних родовищах України зміна відносної величини максимального осідання при повторних підробках не відзначена.

Аналіз даних, наведених у Правилах [1], укажує на неоднозначне висвітлення залежності параметрів зрушення земної поверхні від умов її підробки. Очевидно, що в наведених даних відсутній загальний логічний зв'язок. Це виражається в тім, що ті самі параметри на різних родовищах по-різному змінюються при повторній підробці. На наш погляд, причина полягає не стільки в геологічних і геомеханічних розходженнях родовищ, скільки у відсутності відповідної інформації про закономірності зрушення земної поверхні в умовах повторної підробки [8–10]. А це, своєю чергою, є наслідком відсутності системних досліджень на родовищах, для яких у даний час не встановлені параметри зрушення в умовах породного масиву, що порушений гірничими роботами.

Як приклад розглянемо результати натурних спостережень за зрушенням земної поверхні в Західному Донбасі на шахті «Степова», де спостережна станція № 7 була підроблена лавами № 721, № 723 пласту  $c'_6$  і лавами № 621, № 623 пласту  $c_6$ . Глибина гірничих робіт під спостережною станцією по пласту  $c'_6$  становить 190 м, а по пласту  $c_6$  – 202 м. Границі гірничих робіт в обох пластах (623-й і 723-й бортові штреки) у плані збігаються і знаходяться під 27-м репером профільної лінії № 1 (рис. 3). Розрив у часі між підробками становить 2,5 року.

На рис. 4 наведені графіки осідань, нахилів і горизонтальних деформацій земної поверхні, отримані за спостереженнями переміщень реперів спостережної станції № 7 на моменти закінчення процесу зрушення після первинної підробки гірничими роботами по пласту  $c'_6$  і після повторної підробки пластом  $c_6$ . Аналіз графіків показує, що величини зрушень і деформацій

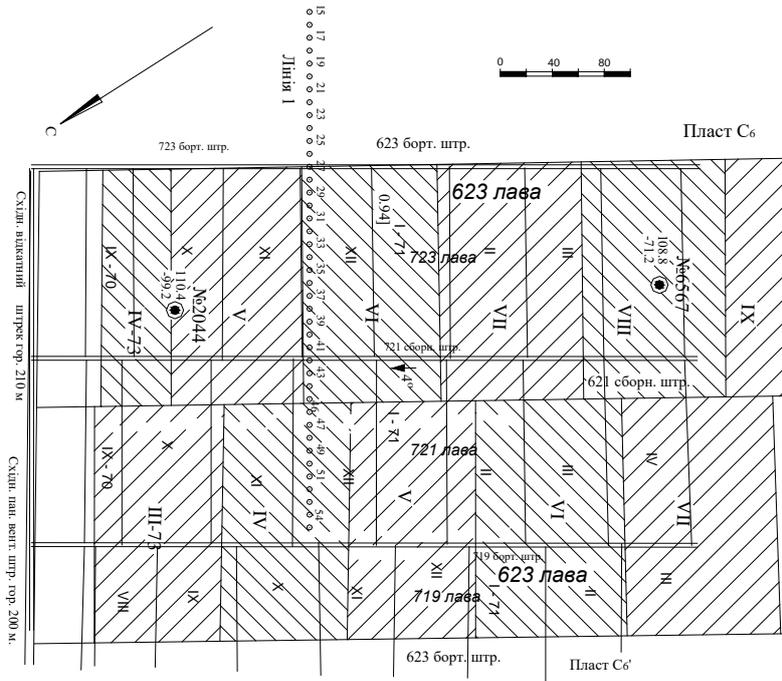


Рис. 3. Суміщений план гірничих робіт і спостережної станції № 7

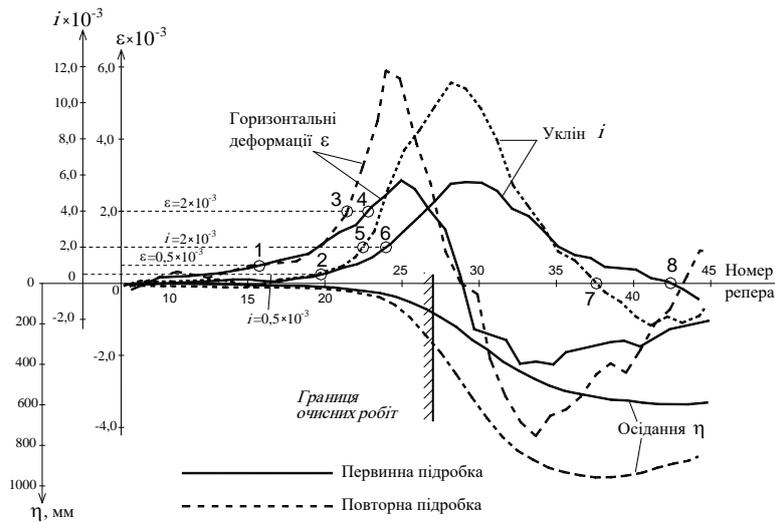


Рис. 4. Графіки зрушень і деформацій земної поверхні по профільній лінії спостережної станції № 7 після первинної і повторної підробок

земної поверхні після первинної та повторної підробок значно відрізняються. За майже однакової потужності пластів (для  $s'_6$   $m = 0,90$  м, для  $s_6$   $m = 0,94$  м) осідання при повторній підробці на 50 % більше, нахили й розтягання поверхні – удвічі більше, ніж при первинній підробці.

Границі впливу очисних робіт від обох пластів на земній поверхні збігаються. Це спостерігається як за критерієм розтягання земної поверхні  $\epsilon = 0,5 \cdot 10^{-3}$  (точка 1 на рис. 2), так і за критерієм нахилу  $i = 0,5 \cdot 10^{-3}$  (т. 2), але при

цьому точки 1 і 2 розташовані на відстані 40 м одне від одного. Границі небезпечного впливу за критеріями  $\epsilon = 2 \cdot 10^{-3}$  (точки 3 і 4) і  $i = 2 \cdot 10^{-3}$  (точки 5 і 6), рознесені уздовж профільної лінії, що свідчить про відмінність кутів зрушення  $\delta$  при первинній і повторній підробках.

Важливою особливістю, що не знайшла відображення в [1], є факт розбіжності точок початку плоского дна при первинній і повторній підробках (точки 7 і 8). Положення цих точок визначає значення кутів повних зрушень  $\psi$  і свідчить про

те, що при повторній підробці кут повних зрушень крутіше, ніж при первинній підробці.

**Висновки.** У разі відпрацювання пластів довгими стовпами хрест простягання:

1. Мульда зрушення у плані приймає «грушоподібну», а не еліптичну форму, через невідповідності напівмульд у головних перерізах за простяганням у зонах падіння і повстання пласта.

2. Відмінність коефіцієнтів, що характеризують підробленість земної поверхні  $N_2$  у основних перетинах по простяганням на ділянці «плоського дна» призводить до поступового зростання максимального осідання в бік повстання пласта.

3. Істотна відмінність коефіцієнтів  $N_2$  у зонах з боку падіння та повстання пласта (зони I та II) призводить до зміни характеру розподілу зрушень та деформацій у межах напівмульд.

4. Порівняльний аналіз показав, що значення зрушень та деформацій, обчислених за чинною методикою [1], дає дещо завищені величини з боку падіння пласта та занижені – з боку повстання.

Встановлені відмінності параметрів зрушення земної поверхні при первинній і повторній підробках властиві умовам підробки спостережної станції № 7. Але вони дають змогу зробити висновок, що подібні відмінності мають місце і вони настільки істотні, що докорінно змінюють представлення про закономірності зрушення земної поверхні при веденні очисних робіт в умовах порушеного гірничими роботами породного масиву. Це, своєю чергою, указує на необхідність проведення системних досліджень процесу зрушення земної поверхні в Західному Донбасі з метою встановлення параметрів зрушення при повторній і наступних підробках.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. ДСТУ 101.00159226.001-2003 Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. *Галузевий стандарт*. Київ : Мінпаливенерго України, 2004. 127 с.
2. Kuchin O. S., Chemakina M. V., Balafin I. E. Displacement of undermining rock mass above the moving longwall *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2017. № 1. P. 55–60.
3. Bazaluk O., Kuchyn O., Saik P., Soltabayeva S., Brui H., Lozynskyi V., Cherniaiev O. Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline. *Scientific Reports*. 2023. № 13. 19327. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46814-5>
4. Kuchin O., Brui H., Yankin O., Ishutina H. The relationship between lowering the Earth's surface and bearing pressure above the advancing longwall face. *JGD*. 2023. Vol. 1(34). P. 28–36. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.028>
5. Nazarenko V., Brui H., Kuchin O., Balafin I. Investigation of reused preparatory workings deformations of as a result of cleaning operations. *Mongolian Geoscientist*. 2025. № 30(60). P. 1–9. <https://doi.org/10.5564/mgs.v30i60.3592>
6. Sakhno I., Sakhno S., Vovna O. Surface Subsidence Response to Safety Pillar Width Between Reactor Cavities in the Underground Gasification of Thin Coal Seams. *Sustainability*. 2025. № 17(6). 2533. <https://doi.org/10.3390/su17062533>
7. Sakhno I., Sakhno S., Petrenko A., Barkova O., Kobylanskyi B. Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2023. № 1254, 012057. <https://doi.org/10.3390/app14135733>
8. Bubnova O. Regularities of subsidence development during multiple underworking of the earth's surface in the Lviv-Volyn coal basin conditions *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2024. № 1348. 012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012065>
9. Zberovskyi V., Bubnova O., Babii K. Specifics of hydro-loosening of coal seams with account of rocks displacement parameters *Ukrainian School of Mining Engineering*. 2018. № 60 (00025). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000025>
10. Chetveryk M., Bubnova O., Babiy K. The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface *Mining of Mineral Deposits*. 2017. № 11(1). P. 57–64. <https://doi.org/10.15407/mining11.01.057>

#### REFERENCES:

1. SSTU 101.00159226.001-2003. Pravyla pidrobky budivel, sporud i pryrodnykh ob'ektiv pry vydobuvanni vuhillia pidzemnym sposobom [Rules for tampering with buildings, structures and natural objects during underground coal mining]. *Industry standard Ministry of Energy of Ukraine*, 2004, 127 p. [in Ukrainian].
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, 55–60.

3. Bazaluk, O., Kuchyn, O., Saik, P., Soltabayeva, S., Brui, H., Lozynskyi, V., & Cherniaiev, O. (2023). Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline. *Scientific Reports*, (13), 19327. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46814-5>
4. Kuchin, O., Brui, H., Yankin, O., & Ishutina, H. (2023). The relationship between lowering the Earth's surface and bearing pressure above the advancing longwall face. *JGD*, 1(34), 28–36. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.028>
5. Nazarenko, V., Brui, H., Kuchin, O., & Balafin, I. (2025). Investigation of reused preparatory workings deformations of as a result of cleaning operations. *Mongolian Geoscientist*, 30(60), 1–9. <https://doi.org/10.5564/mgs.v30i60.3592>
6. Sakhno, I., Sakhno, S., & Vovna, O. (2025). Surface Subsidence Response to Safety Pillar Width Between Reactor Cavities in the Underground. *Gasification of Thin Coal Seams. Sustainability*, 17(6), 2533. <https://doi.org/10.3390/su17062533>
7. Sakhno, I., Sakhno, S., Petrenko, A., Barkova, O., & Kobylanskyi, B. (2023). Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1254, 012057. <https://doi.org/10.3390/app14135733>
8. Bubnova, O. (2024) Regularities of subsidence development during multiple underworking of the earth's surface in the Lviv-Volyn coal basin conditions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1348, 012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012065>
9. Zberovskyi, V., Bubnova, O., & Babii, K. (2018). Specifics of hydro-loosening of coal seams with account of rocks displacement parameters. *Ukrainian School of Mining Engineering*, 60 (00025). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000025>
10. Chetveryk, M., Bubnova, O., & Babiy, K. (2017). The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface. *Mining of Mineral Deposits*, 11(1), 57–64. <https://doi.org/10.15407/mining11.01.057>



Стаття поширюється на умовах  
ліцензії відкритого доступу  
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 29.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.12.2025  
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026