

УДК [551.242.1.03+622.831.1](477.6)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.09>

Олександр НІКІТЕНКО, асп., провід. геолог
ORCID ID: 0000-0001-7911-0760
e-mail: paleontologist78@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
ТОВ "Бренд-Вік ЛТД", Київ, Україна

ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ ТА ГЕОЛОГІЧНА СТРУКТУРА ЗАХІДНОГО ЗАМИКАННЯ ГОРЛІВСЬКОЇ АНТИКЛІНАЛІ ДОНБАСУ ЧАСТИНА 2. ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. В.А. Михайловим)

Вступ. Горлівська антикліналь Донбасу як об'єкт тектонофізичних досліджень становить інтерес не тільки з позиції геологічної будови, механізму формування і просторового розташування тектонічних дислокацій, але й з позиції впливу цих чинників на умови розробки вугільних родовищ. Метою цього дослідження є аналіз геологічної будови, полів напружень і деформацій західного замикання Горлівської антикліналі для прогнозування гірничо-геологічних умов проведення гірничих робіт.

Методи. Реконструкція полів тектонічних напружень виконувалася за всією сукупністю орієнтирних і кінематичних даних з використанням кінематичного методу Гуценка, який ґрунтується на аналізі векторів тектонічних зміщень по дзеркалах ковзання. Параметри полів напружень мезорегіонального рівня реконструйовано шляхом статистичного опрацювання локальних стереографічних розв'язань. Відносну вікову хронологію і стадійність тектонічних напружень було визначено за допомогою методу стрес-моніторингу. Параметри головних осей сумарного поля деформацій оброблено за допомогою програмного забезпечення GEOS.

Результати. Реконструйоване поле тектонічних напружень характеризується субгоризонтальною віссю максимальних головних напружень, орієнтованою з північного заходу на південний схід, і субгоризонтальною віссю мінімальних головних напружень, орієнтованою з північного сходу на південний захід (зсувне поле). За часом свого прояву такий тип поля напружень ототожнюється з альпійським тектогенезом і є наймолодшим для Донецького басейну. Еволюція умов тектонічного навантаження досліджуваної структури характеризується деформаційним рядом з шести напружених станів – від найдавнішого скидового до наймолодшого зсувного, останній з яких за своїми параметрами синхронізується з наймолодшим, реконструйованим для Донбасу і Приазов'я альпійським полем напружень. Вісь видовження еліпсоїда деформації має північно-західну – меридіональну орієнтацію, вісь укорочення – північно-східну, майже ортогональну до осі антикліналі. На більшій частині досліджуваної території процес деформування гірського масиву контролювався переважно зсувним і перехідними скидо- і підкидо-зсувними механізмами. Відповідно до значень коефіцієнта Лодє–Надаї деформації відбувалися за умов, близьких до зсувних.

Висновки. Наведені приклади просторових взаємовідносин реконструйованого поля напружень з набором зазначених деформаційних елементів західного замикання Горлівської антикліналі (система спряжених сколів зсувної зони, брахіантиклінальна складка з насувами у її крилах) дають змогу розглядати останні як елементи структурного парагенезису, утворення якого було спричинене правозсувними горизонтальними переміщеннями вздовж системи поздовжніх зсувів приосьової частини Горлівської антикліналі, а фрагменти взаємної симетричності поля напружень і поля деформацій можуть розглядатися як доказ їх генетичного споріднення.

Ключові слова: геологічна структура, сколові деформації, кінематичні індикатори, поле напружень, поле сумарних крихких деформацій, кінематичний метод, коефіцієнт Лодє–Надаї.

Вступ

Одним з ефективних напрямів досліджень, що дають змогу оцінити напрями активних тектонічних зусиль, що сформували геологічну структуру, поля напружень, які існували під час її формування, і розподіл деформацій усередині неї є тектонофізичні дослідження, загальна задача яких полягає у визначенні закономірностей розподілу напружень і розвитку тектонічних деформацій, що виникають у земній корі. Дані польової тектонофізики можуть вносити істотні доповнення до результатів різних видів моделювання, які у теперішній час широко використовуються для розв'язання таких задач. Сприятливі умови для таких спостережень створюються під час кар'єрної і підземної розробки пластів родовищ, коли здійснюється суцільна виїмка корисних копалин з детальним геологічним документуванням, завдяки чому можна безпосередньо вивчати геологічні структури різного рівня в реальному масштабі і фіксувати зміни морфології по площі і в розрізі.

Аналіз попередніх досліджень. Реконструкціям полів напружень і механізму утворення західної частини Горлівської антикліналі Донбасу присвячені дослідження А.А. Бабиця, Ю.В. Буцика, А.М. Добрянського, В.С. Ємця, В.О. Корчемагіна, В.Ф. Приходченка, Ю.С. Рябоштан, В.С. Токовенка. Особливості просторового орієнтування осей головних нормальних напружень вказують на те, що

вони є наслідком стискання, напрямом якого спочатку був поперечним до шарніру Горлівської антикліналі, а потім діагональним до нього. Формування Горлівської антикліналі і деформаційних елементів, які ускладнюють її структуру, зокрема різнорангових розривів і складок другого порядку, відбувалося у два етапи: перший, власноскладчастий, який пов'язується із заключними фазами герцинського орогенезу, і другий, післяскладчастий, пов'язаний із заключними фазами альпійського орогенезу. Так, просторове співвідношення напрямку дії головних нормальних напружень з деформаційними елементами Микитівського рудного поля визначається діагональним положенням осей цього поля до деформаційних осей головної рудоконтролюючої структури (Горлівської антикліналі) і симетричним – до складчастих структур другого порядку склепіння головної структури: близгоризонтальні осі максимального (σ_3) і мінімального (σ_1) стискання орієнтовані впоперек простягання купольних складок і паралельно положенню їх шарнірів відповідно. За значеннями коефіцієнта Лодє–Надаї (μ_0) напружений стан гірських порід варіював у широких межах від одновісного стиснення до одновісного розтягування. Це поле напружень є наймолодшим для Донбасу і датується ларамійською фазою альпійського тектогенезу (Гинтов, 2005; Корчемагин, 1970; Корчемагин, & Емец, 1987; Корчемагин, & Рябоштан, 1987; Корчемагин і др., 2005; Saintot et al., 2013; Sim et al., 1999). З урахуванням

реконструйованих параметрів полів напружень, кінематики розривів і орієнтування структурних деформаційних елементів було наведено механізм структуроутворення Головної антикліналі Донбасу як надрозломної складки, який передбачає, що структура склепіння Горлівської антикліналі і Микитівського рудного поля була сформована у результаті правобічних зсувних поздовжньо-зональних рухів по зоні Центральнодонецького глибинного розлому, де всі відомі деформаційні елементи рудного поля являють собою елементи структурного парагенезису правозсувної зони, що сформувалися за один етап за незмінного напрямку осей загального поля напружень (Емец і др., 1986; Корчевагин, 1970, 1984; Корчевагин, & Емец, 1987; Корчевагин, & Рябоштан, 1987; Никольский і др., 1991).

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Геологічна структура західного периклінального замикавання Горлівської антикліналі на відміну від її крил і склепінної частини залишалася меншою мірою вивченою, проте в міру розвитку гірничих робіт у межах поля шахти "Новодзержинська", розташованої на самому периклінальному замиканні антикліналі, з'явилася можливість провести структурно-тектоніфізичні дослідження, завдяки яким за новими даними про кінематику розривів було здійснено реконструкцію основних параметрів тектонічного поля напружень і поля сумарних крихких деформацій для цієї ділянки Горлівської антикліналі.

Формулювання цілей статті. Основною метою досліджень є вивчення структурно-тектоніфізичних особливостей і закономірностей формування геологічної структури і тектонічних розривів західного периклінального замикавання Горлівської антикліналі для прогнозу гірничо-геологічних умов розробки вугільних родовищ. Основним завданням є реконструкція основних параметрів полів деформацій, тектонічних напружень локального і мезорегіонального рівнів.

Методи

Тектонічні напруження вивчалися кінематичним методом О. Гуценка, сутність якого полягає в знаходженні за допомогою різномасштабних тріщин, розломів зі слідами руху блоків такого орієнтування осей поля напружень, за якого найбільша кількість напрямків відносного переміщення блоків відповідатиме певній теоретичній номограмі (Гинтов, 2005). Реконструкції параметрів тектонічних напружень у локальних об'ємах гірського масиву було здійснено з використанням усієї сукупності заміряних тектонічних сколів і встановлених на їх стінках векторів зміщення. Параметри полів мезорегіонального рівня (для окремих блоків і шахтного поля у цілому) відновлювалися як через статистичне оброблення на стереографічній сітці даних локальних реконструкцій, так і аналітично. У цій статті осі головних нормальних напружень – алгебраїчно мінімального стиснення (σ_1) будуть далі іменуватися віссю розтягування, алгебраїчно максимального стиснення (σ_3) – віссю стиснення.

Відносну часову послідовність полів напружень досліджено методом тектонічного стрес-моніторингу. Зважаючи на передумову про безперервність траєкторій головних напружень у часі та просторі й успадкований характер розвитку деформаційного процесу, він забезпечує можливість виділення синхронізованих між собою безперервних рядів тектонічних напружень, де кожен із членів деформаційного ряду описує сукупність різновікових, але однотипних полів напружень в останньому для дослідженого обсягу деформаційному циклі (Гущенко і др., 2001). Характеристики головних осей поля сумарних крихких деформацій було оброблено за допомогою

спеціалізованого програмного забезпечення GEOS. Реконструкція здійснювалася за всією сукупністю заміряних сколових зміщень (з урахуванням їх знаку), об'єднаних у групи спостережень в окремих локальних об'ємах гірського масиву, у створеній рівномірній мережі пунктів спостережень (згладжене поле деформацій).

Результати

Поле напружень. Польові тектонофізичні дослідження тектонічної тріщинуватості і розривів з елементами кінематики на різних ділянках шахтного поля дали змогу реконструювати параметри тектонічних полів напружень більш ніж у 60 локальних об'ємах гірського масиву на різних пластах і горизонтах шахтного поля.

Враховуючи те, що між орієнтуваннями осей напружень локального рівня і осями наступних структурних рівнів існує закономірний зв'язок, зумовлений ієрархічною природою полів напружень, для переходу до полів мезорегіонального рівня було здійснено статистичне оброблення даних про локальні поля напружень. Зведені стереограми були складені для двох структурних блоків і для всієї шахти в цілому. При підсумовуванні орієнтувань осей нормальних напружень у межах блоків формувалися самостійні зони розподілу, причому зона розподілу для осі стиснення σ_3 формувалася у периферичних частинах навхрест розташованих північно-західному і південно-східному квадрантах діаграм, тоді як осями розтягування σ_1 підперезалася вся площа двох других квадрантів: північно-східного і південно-західного (рис. 1а-г).

Сумарне поле напружень незначно відрізняється для першого і другого структурних блоків шахтного поля. У другому блоці осі головних нормальних напружень мають такі елементи залягання: вісь σ_1 – аз. пад. $232^\circ \angle 30^\circ$, вісь σ_3 – аз. пад. $140^\circ \angle 5^\circ$, і лежать в усередненій площині нашарування для цього крила (рис. 1в). У східній частині першого блоку осі орієнтовано таким чином: σ_1 – аз. пад. $65^\circ \angle 24^\circ$, σ_3 – аз. пад. $330^\circ \angle 20^\circ$, де вони також лежать близько до усередненої площини нашарування для цього блоку (рис. 1а). У зоні Осьового насуву (західна частина першого блоку) осі мають таке орієнтування: σ_1 – аз. пад. $230^\circ \angle 28^\circ$, σ_3 – аз. пад. $330^\circ \angle 18^\circ$; вісь стиснення розташована близько до площини нашарування, а вісь розтягнення лежить у площі Осьового насуву (рис. 1б). Загалом для всього шахтного поля воно характеризується такими параметрами: вісь стиснення σ_3 – $141^\circ \angle 5^\circ$, вісь розтягування σ_1 – $231^\circ \angle 20^\circ$; вид напруженого стану близький до чистого зсуву ($\mu_0 = \pm 0$) (рис. 1г) (Павлов, Никитенко, & Ткаченко, 2011; Nikitenko, & Chernysh, 2015; Volkova, Nikitenko, & Chernysh, 2016).

Відновленому полю напружень симетричні основні деформаційні елементи шахтного поля – спряжена пара зсувів (північно-західні праві і південно-східні ліві), що формують зсувну зону, широтні насиви і складчастість другого порядку.

Виходячи з важливої умови застосовності кінематичного методу про те, що штрихи ковзання відображають сліди останніх найбільш молодих тектонічних зміщень (сліди більш ранніх зміщень або стираються, або мають гіршу збереженість), які виникають по розривах під дією єдиного поля напружень, можна припустити, що посування за всією сукупністю розривів було пов'язане з дією зсувного поля напружень і підпорядковано генеральному правозсувному зміщенню породного масиву вздовж осі Горлівської антикліналі по площині основного розриву. Деформування відбувалося як за рахунок зміщень поверненнями тріщин (розривів), що формуються, так і за рахунок

зміщень по вже наявних ослаблених поверхнях різного віку і генезису.

Реконструйоване для західного периклінального замикавання Горлівської антикліналі поле напружень аналогічне полю, отриманому для Микитівського рудного поля (рис. 2д). Можна стверджувати, що характер поля напружень і тип дислокацій у склепінні Головної антикліналі витримані від східних меж Микитівського рудного поля до західного замикавання Горлівської антикліналі. За часом свого прояву подібний тип поля напружень ототожнюється з ларамійською фазою альпійського тектогенезу (Гинтов, 2005; Корчевагин, & Емец, 1987; Корчевагин, & Рябоштан,

1987; Корчевагин и др., 2005; Гончар, 2019). Відновлене поле напружень і, отже, всі відповідні йому деформації – наймолодші для Донецького басейну.

Еволюція тектонічного поля напружень може бути описана виділеними за процедурами тектонічного стрес-моніторингу просторово-часовим деформаційним рядом з шести однорідноосних напружених станів (фаз деформування) в останньому, наймолодшому для дослідженого об'єму деформаційному циклі – від найдавнішого (F) до наймолодшого (A). Основні параметри виділених фаз деформування наведено в табл. 1.

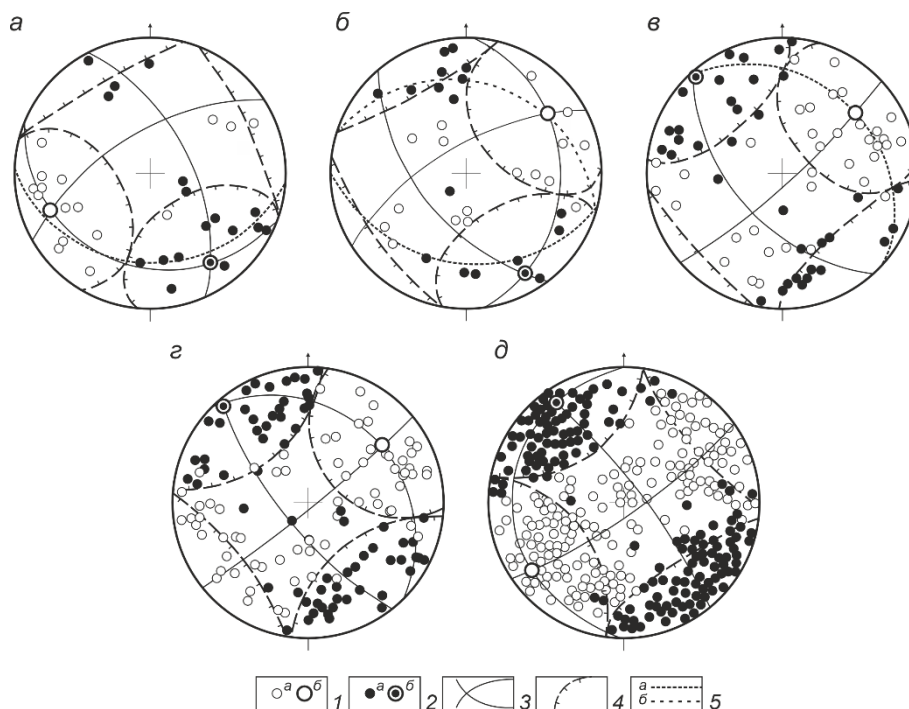


Рис. 1. Реконструкції поля тектонічних напружень для поля шахти "Новодзержинська":
перший блок – зсувна зона (а), зона Осьового насуву (б); в) другий блок; г) шахтне поле; д – Микитівське рудне поле.
1 – осі розтягування: а – локального рівня, б – мезорегіонального; 2 – осі стиснення: а – локального рівня, б – мезорегіонального; 3 – площини дії головних нормальних напружень; 4 – конічні поверхні, що обмежують зони розвитку осей одного знаку; 5 – площини: а – нашарування; б – осьового насуву.

Таблиця 1

Фази деформування і відповідні їм характеристики напружень

Фаза	%	Тип поля	σ_1	σ_2	σ_3	μ_σ	μ_ϵ
A	34,4	зсувний	$257 \angle 3$	$154 \angle 77$	$348 \angle 13$	0,9	0,06
B	25,4	підкидовий	$219 \angle 67$	$79 \angle 18$	$344 \angle 14$	0,95	0,58
C	18,4	підкидовий	$187 \angle 75$	$347 \angle 14$	$78 \angle 5$	0,95	0,31
D	28,1	зсувний	$336 \angle 13$	$178 \angle 76$	$68 \angle 5$	-0,95	-0,11
E	22,8	скидовий	$350 \angle 15$	$260 \angle 1$	$166 \angle 75$	-0,95	-0,43
F	18,7	скидовий	$259 \angle 2$	$350 \angle 15$	$162 \angle 75$	-0,9	-0,44

Примітки: % – питома вага однорідної групи сколів у загальній вихідній генеральній вибірці; тип поля – геометричний тип поля напружень або тип деформаційного режиму (відповідно до величин кутів нахилу $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ головних осей $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ до горизонту): скидовий ($\alpha_1 \leq 30^\circ, \alpha_2 \leq 30^\circ$), зсувний ($\alpha_1 \leq 30^\circ, \alpha_2 \leq 30^\circ$), підкидовий ($\alpha_2 \leq 30^\circ, \alpha_3 \leq 30^\circ$); $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – орієнтування головних осей напружень (азимут і кут занурення); μ_σ – найбільш повторюване для виділеної стадії деформування значення коефіцієнта Лоде–Надаї (вид напруженого стану гірського масиву): -1 – однобічне розтягнення, +1 – однобічне стиснення; μ_ϵ – форма еліпсоїда сумарної розривної частини деформації (вид деформації гірського масиву): -1 – однобічне видовження, +1 – однобічне укорочення.

Розвиток найдавніших фаз деформаційного процесу F і E контролювався скидовим механізмом і відбувався за умов переважного видовження гірського масиву, що характеризуються величинами коефіцієнта Лоде–Надаї $\mu_\epsilon = -0,44$ і $-0,43$ відповідно. Скидовий механізм, контрольований субвертикальною орієнтацією осі стиснення σ_3 , визначав умови для зменшення амплітуди вертикальних тектонічних рухів і, відповідно, виникнення

локальних зон зниженої проникності в гірському масиві. Особливістю процесу деформації стала переорієнтація осі розтягування σ_1 з південного заходу на фазі (F) на північний захід на фазі (E).

На фазі D деформування земної кори кінематичний тип механізму процесу стає зсувним і супроводжується поспаленням процесу видовження гірського масиву ($\mu_\epsilon = -0,11$).

Вид напруженого стану для фаз F–D є близьким до одновісного розтягнення.

Процес деформування на фазах C і B характеризується зміною (1) кінематичного типу механізму деформації із зсувного на підкидковий і (2) процесу видовження гірського масиву процесом його наростаючого укорочення ($\mu_\epsilon = 0,31$ і $0,58$ відповідно). Підкидковий механізм, контрольований субвертикальною орієнтацією осі розтягування σ_1 , визначав появу умов для збільшення амплітуди вертикальних тектонічних рухів і, відповідно, виникнення локальних зон підвищеної проникності в гірському масиві (розвиток процесів флюїдо-масопереносу). У процесі деформації відбулася переорієнтація осі стиснення σ_3 з північного сходу на фазі C на північний захід на фазі B. Зростання укорочення (ущільнення) гірського масиву і нова орієнтація осі σ_3 могли сприяти формуванню вторинної складчастості в досліджуваній структурі. Напрямок простягання осьової поверхні вторинної складки, орієнтованої близнормально до осі σ_3 , може підтверджувати достовірність висновків про кінематику умов деформації гірського масиву на фазі B.

На заключній фазі A деформування кінематичний тип механізму процесу стає знову зсувним, але вже з іншою, зворотною порівняно з фазою D, орієнтацією головних напружень, і супроводжується різким ослабленням процесу укорочення гірського масиву ($\mu_\epsilon = 0,06$). Подією заключного процесу деформації став прояв правозсувних тектонічних рухів уздовж осі Горлівської антикліналі. Вид напруженого стану для фаз C–A є близьким до одновісного стиснення (Никитенко, 2014; Volkova, Nikitenko, & Chernysh, 2016).

Таким чином, спрямований і успадкований характер змінення умов тектонічного навантаження структури західного периклінального замикання Горлівської антикліналі характеризується послідовним змінням деформаційних режимів від найдавнішого скидового до наймолодшого – зсувного (рис. 2). Абсолютні часові інтервали дії цих фаз визначити складно, проте остання фаза A за своїми параметрами синхронізується з наймолодшим, реконструйованим для Донбасу і Приазов'я альпійським полем тектонічних напружень (Корчемагин, & Емец, 1987; Корчемагин, & Рябоштан, 1987).

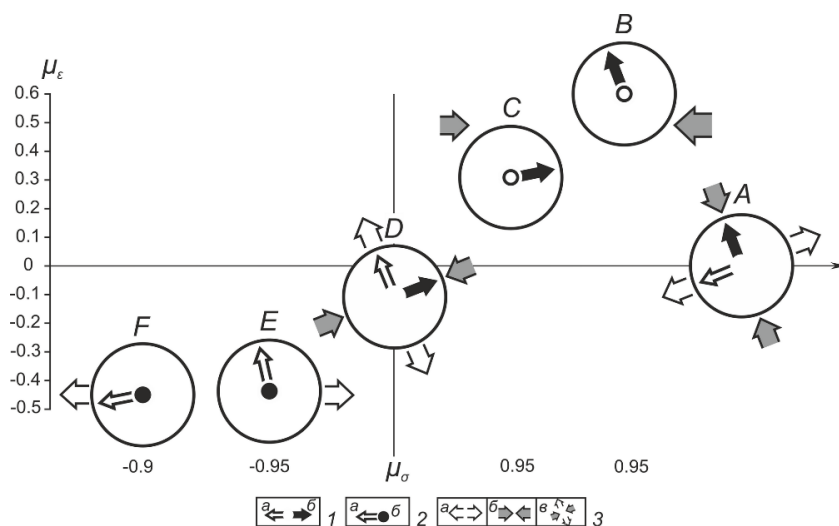


Рис. 2. Структура наймолодшого деформаційного циклу для західного периклінального замикання Горлівської антикліналі:

1 – проєкції осей головних напружень: а – σ_1 , б – σ_3 ; 2 – кут занурення осей напружень: а – похилі, б – круті; 3 – вид деформування гірського масиву: а – видовження, б – укорочення, в – зсув.

Поле деформацій. Поле сумарних крихких деформацій було реконструйовано за всією сукупністю замірних сколових зміщень з урахуванням знаку цих зміщень. Вид деформації (укорочення, видовження, зсув) гірського масиву визначався за величинами коефіцієнта Лодє–Надаї μ_ϵ , який описує характер деформування в рамках теорії пружності і виражається через головні значення тензора деформацій $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ (аналогічно до коефіцієнту μ_σ).

Результати реконструкції показали, що згладжене поле сумарних крихких деформацій у зоні західного замикання Горлівської антикліналі є неоднорідним, орієнтування осей поля і вид деформацій змінюються як за площею досліджуваного району, так і у межах великих структурних форм.

Вісь максимального видовження ϵ_1 у межах північного крила орієнтована переважно у південно-західному (північна частина) і субширотному (приосьова частина) напрямках. На ділянці, обмеженій Північним і Осьовим насувами, орієнтування осі ϵ_1 менш витримане, вона варіює від південно-західного до

субширотного і субмеридіонального. Кут нахилу осі змінюється від відносно крутого ($30\text{--}45^\circ$) у північній частині до крутого (до 60°) поблизу Північного насуву і похилого ($10\text{--}20^\circ$) у приосьовій частині антикліналі (рис. 3а, в). Осьова частина характеризується субширотним, близпаралельним до орієнтування Осьового насуву, і майже горизонтальним положенням осі ϵ_1 . На ділянці південного крила, яка обмежена Осьовим і Торецьким насувами, вісь орієнтована у південно-західному напрямку, дещо розгортаючись до субмеридіонального в перехідній від Торецького до Головного насувів зоні і субширотного напрямків з наближенням до Головного насуву, поздовжньо до орієнтування останнього. У межах південного крила вісь ϵ_1 займає переважно похиле ($10\text{--}30^\circ$) положення (рис. 3а, г).

Вісь максимального укорочення ϵ_3 на північному крилі орієнтована у північно-західному – південно-східному напрямку, займаючи субширотне і субмеридіональне положення з наближенням до Північного і Осьового насувів відповідно (рис. 3б, е). Нахил осі варіює від переважно похилого ($10\text{--}35^\circ$) до крутого (до 50°) з наближенням до

осьової частини антикліналі (рис. 3б, е). У межах південного крила при наближенні до зони Торецького насуву вісь ε_3 розгортається до субширотного і далі – до субмеридіонального–північно-західного напрямку, займаючи переважно круте (50–60°) положення. У перехідній від Торецького до Головного насуву зони вона певною мірою зберігає напрямок свого орієнтування, проте стає більш похилою (рис. 3б, е) (Volkova, Nikitenko, & Chernysh, 2016).

Найбільш витриманим у просторі є орієнтування осі максимального видовження ε_1 , яка на переважній частині досліджуваної площі займає похиле положення і орієнтована у південно-західному напрямку (рис. 3а, д). Орієнтування осі максимального укорочення ε_3 є менш витриманим, особливо за кутом нахилу – від горизонтального до субвертикального (рис. 3б, ж). За величинами коефіцієнта Лоде–Надаї вид деформування гірського

масиву у межах західного замикання Горлівської антикліналі змінюється в діапазоні від майже одновісного видовження до одновісного укорочення ($\mu_\varepsilon = \pm 0,9$). Деформування гірського масиву у північному крилі контролювалося зсувним, скидо- і підкидо-зсувним механізмами за умов, близьких до зсувних з певним укороченням ($\mu_\varepsilon = 0,1$ при варіюванні від $-0,7$ до $0,9$); у південному крилі – переважно скидовим і скидо-зсувним механізмом за умов, близьких до зсувних з певним видовженням ($\mu_\varepsilon = -0,2$ при варіюванні від $-0,9$ до $0,5$) (рис. 3а, б). Загалом для досліджуваної площі осі головних деформацій характеризуються такими усередненими параметрами: вісь ε_1 – аз. пад. $210^\circ \angle 19^\circ$, вісь ε_3 – аз. пад. $330^\circ \angle 34^\circ$, $\mu_\varepsilon = -0,03$. За параметрами свого орієнтування еліпсоїд сумарних деформацій є близьким до еліпсоїду напружень.

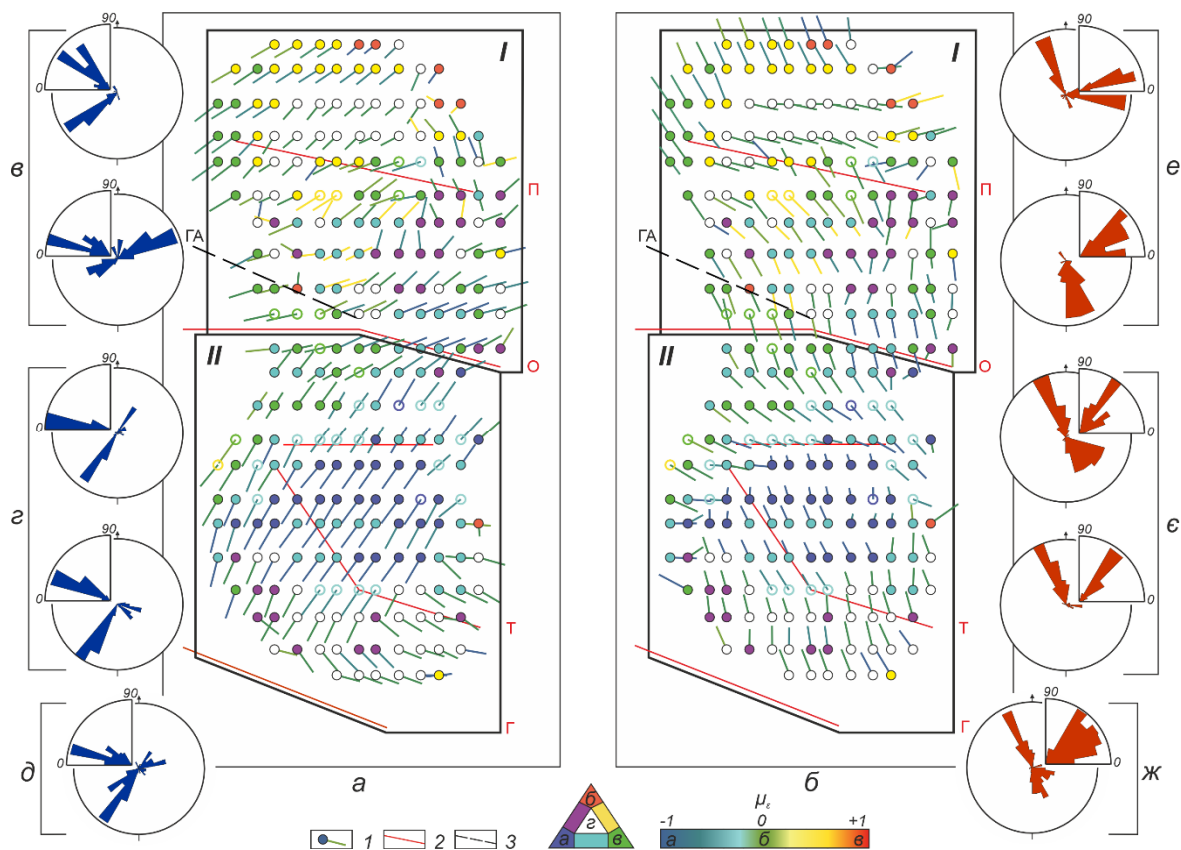


Рис. 3. Поле сумарних крихких деформацій для західного замикання Горлівської антикліналі:

Орієнтування головних осей еліпсоїду крихких деформацій: а – вісь максимального видовження ε_1 ;

б – вісь максимального укорочення ε_3 .

1 – пункти розрахунку параметрів поля деформацій з напрямком однієї з осей (довжина горизонтальної проекції відображає кут нахилу осі: коротша проекція – крутіший кут нахилу; занурення осі спрямовано від точки);

2 – лінії розривів (зображено схематично): П – Північний насув, О – Осьовий насув, Т – Торецький насув, Г – Головний насув;

3 – вісь Горлівської антикліналі (ГА).

Діаграми напрямку і кута занурення осей ε_1 (ліворуч) і ε_3 (праворуч) еліпсоїду крихких деформацій:

е, е – північне крило, з, е – південне крило, д, ж – зведена.

Геометричний тип поля деформацій (відповідно до величин кутів нахилу $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ головних осей $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ до горизонту):

а – скидовий ($\varepsilon_1 \leq 30^\circ, \varepsilon_2 \leq 30^\circ$), б – підкидовий ($\varepsilon_2 \leq 30^\circ, \varepsilon_3 \leq 30^\circ$), в – зсувний ($\varepsilon_1 \leq 30^\circ, \varepsilon_2 \leq 30^\circ$), г – "октаедричний" ($\varepsilon_1 > 30^\circ, \varepsilon_2 > 30^\circ, \varepsilon_3 > 30^\circ$).

Вид деформації гірського масиву (за даними визначення коефіцієнта Лоде–Надаї μ_ε):

а – одновісне видовження ($\mu_\varepsilon = -1$), б – зсув ($\mu_\varepsilon = 0$), в – одновісне укорочення ($\mu_\varepsilon = +1$).

З урахуванням реконструйованих полів напружень і деформацій можна припустити, що описана зсувна зона у східній частині першого блоку є безпосереднім продовженням регіонального правого зсуву приосьової частини Горлівської антикліналі, де реалізація правозсувних зміщень на завершальних фазах альпійського тектогенезу призвела до утворення спряженої пари зсувів, які були

закатовані в самій зсувній зоні. Горизонтальні зміщення мас у північно-західному – південно-східному напрямку у її південному крилі супроводжувалися стисненням у близгоризонтальній площині, що призводило до поздовжнього вигину шаруваті товщі з утворенням брахіанткліналі з поздовжніми субширотними насувками, що ускладнюють її крила. Горизонтальні зміщення в крилах насувів, що

формуються, за похилого залягання товщі призводили до утворення систем скидо-зсувів. Отже, весь набір зазначених деформаційних елементів західного замикавання Головної антикліналі можна розглядати як єдиний структурний парагенезис, утворення якого було спричинене правозсувними горизонтальними переміщеннями вздовж системи поздовжніх зсувів приосьової частини Головної антикліналі.

Дискусія і висновки

Встановлено, що реконструйоване для окремих ділянок району досліджень поле тектонічних напружень є зсувним з близгоризонтальним орієнтуванням осей головних нормальних напружень: вісь σ_1 – аз. прост. $50\text{--}60^\circ$ ($230\text{--}240^\circ$), вісь σ_3 – аз. прост. $320\text{--}330^\circ$ ($140\text{--}160^\circ$); для всього району досліджень воно характеризується такими параметрами: вісь σ_1 – аз. пад. $231^\circ \angle 20^\circ$, вісь σ_1 – аз. пад. $141^\circ \angle 5^\circ$. Це поле напружень за своїми параметрами є аналогічним до поля напружень, отриманого для Микитівського рудного поля, тобто є наймолодшим для Донецького басейну і датується ларамійською фазою альпійського тектогенезу. Спрямований і успадкований характер змінення умов тектонічного навантаження структури західного периклінального замикавання Горлівської антикліналі характеризується деформаційним рядом з шести напружених станів – від найдавнішого скидового (F) до наймолодшого зсувного (A), останній з яких за своїми параметрами синхронізується з наймолодшим, реконструйованим для Донбасу і Приазов'я альпійським полем напружень. Для поля сумарних крихких деформацій характерне таке просторове орієнтування головних осей: ε_1 – аз. пад. $210^\circ \angle 19^\circ$, вісь ε_3 – $330^\circ \angle 34^\circ$. Процес деформування гірського масиву контролювався переважно зсувним і перехідними скидо- і підкидо-зсувними механізмами. Деформації відбувалися за умов, близьких до зсувних з певним укороченням ($\mu_c = 0,1$) у північному і видовженням ($\mu_c = -0,2$) у південному крилах антикліналі.

Наведені вище приклади просторових взаємовідносин реконструйованого поля напружень з набором зазначених деформаційних елементів західного замикавання Горлівської антикліналі дають змогу розглядати останні як елементи структурного парагенезису, утворення якого було спричинене правозсувними горизонтальними переміщеннями вздовж системи поздовжніх зсувів приосьової частини Горлівської антикліналі, а фрагменти взаємної симетричності поля напружень і поля деформацій можуть розглядатися як доказ їх генетичного споріднення.

Список використаних джерел

- Гинтов, О. Б. (2005). *Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины*. Феникс.
- Гончар, В. В. (2019). Тектоническая инверсия Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса (модели и реконструкции). *Геофизический журнал*, 41(5), 47–86.
- Гущенко, О. И., Гущенко, Н. Ю., Мострюков, А. О., Кузнецов, В. А., Сергеев, А. А., Петров, В. А., Ильин, А. В., Расцветаев, Л. М., Тверетина, Т. Ю., Сим, Л. А., Корчемagin, Д. В., Васильев, Н. Ю., Дудник, В. А., & Корчемagin, В. А. (2001). Тектонический стресс-мониторинг и поля напряжений Причерноморского региона. *Научные работы Донецкого национального технического университета. Серия: Гірничо-геологічна*, 32, 104–117.
- Емец, В. С., Никольский, И. Л., Корчемagin, В. А., & Купенко В. И. (1986). Механизм образования структуры Никитовского рудного поля (Донбасс) по данным тектонофизических реконструкций и экспериментального моделирования. *Геологический журнал*, 46(1), 21–27.
- Корчемagin, В. А. (1970). *Трещинная тектоника и история развития структуры Никитовского рудного поля* [Дис. ... канд. геол.-минералог. наук, Донецк], ДПИ.
- Корчемagin, В. А. (1984). *Геологическая структура и поля напряжений в связи с эволюцией эндогенных режимов Донбасса* [Дис. ... д-ра геол.-минералог. наук. Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР].
- Корчемagin, В. А., & Емец, В. С. (1987). Особенности развития тектонической структуры и поля напряжений Донбасса и Восточного Приазовья. *Геотектоника*, 3, 49–55.

Корчемagin, В. А., & Рябоштан, Ю. С. (1987). Тектоника и поля напряжений Донбасса. В В.Ю. Буланже (Ред.) *Поля напряжений и деформаций в земной коре* (с. 164–170). Наука.

Корчемagin, В. А., Дудник, В. А., Панов, Б. С., & Алехин, В. И. (2005). О связи тектонических деформаций и напряжений с рудоносностью в Донбассе. *Геофизический журнал*, 27(1), 97–109.

Никитенко, А.В. (2014). Поля напряжений западного замыкания Горловской антиклинали Донбасса и стадийность их развития. *Научные работы Донецкого Национального технического университета. Серия Гірничо-геологічна*, 1(20), 113–121.

Никольский, И. Л., Корчемagin, В. А., Емец, В. С., & Кледич, О. (1991). Тектоника Никитовского рудного поля. В А. Иванова и А. Оболенский (Ред.) *Условия локализации сурьмяно-ртутного и флюоритового оруденения в рудных полях* (с. 30–37). Наука, Сиб. отд.-ние.

Павлов, И. О., Никитенко, А. В., & Ткаченко, В. В. (2011). Кинематика разрывов и поля напряжений западного замыкания Главной антиклинали Донбасса. *Вугілля України*, 7, 43–45.

Nikitenko, O. V., & Chernysh, O. G. (2015). Use of the kinematic method for reconstruction of stress fields and mechanisms of the structure development in Donbas (on an example of the western closure of Horlivka anticline). *Геодинаміка*, 2(19), 47–54.

Saintot, A., Stephenson, R., Brem, A., Stovba, S., & Privalov, V. (2013). Paleostress field reconstruction and revised tectonic history of the Donbas fold and thrust belt (Ukraine and Russia). *Tectonics*, 22(5), 1059, <https://doi.org/10.1029/2002TC001366>

Sim, L., Korchemagin, V., Frischbutter, A., & Bankwitz, P. (1999). The neotectonic stress field pattern of the East European Platform. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 27(3–4), 161–181.

Volkova, T. P., Nikitenko, O. V. & Chernysh, O. G. (2016). Structural and tectonophysical aspects of the development of the western closure of the Horlivka anticline of the Donbas. *Научный вестник Национального гірничого університету*, 6, 5–13.

References

- Emets, V. S., Nikolskii, I. L., Korchemagin, V. A., & Kупенко, V. I. (1986). The mechanism of formation of the structure of the Nikitovka ore field (Donbas) according to tectonophysical reconstructions and experimental modeling. *Geological journal*, 46(1), 21–27 [in Russian].
- Gintov, O.B. (2005). *Field tectonophysics and its application to the study of deformations of the Earth's crust of Ukraine*. Phoenix [in Russian].
- Gonchar, V. V. (2019). Tectonic inversion of the Dnieper-Donets Basin and Donbas (models and reconstructions). *Geophysical journal*, 41(5), 47–86 [in Russian].
- Gushchenko, O. I., Gushchenko, N. Yu., Mostriukov, A. O., Kuznetsov, V. A., Serheiev, A. A., Petrov, V. A., Ilin, A. V., Rastvetaiev, L. M., Tveretina, T. Yu., Sim, L. A., Korchemagin, D. V., Vasyliov, N. Yu., Dudnik, V. A., & Korchemagin, V. A. (2001). Tectonic stress monitoring and stress fields in the Black Sea region. *Scientific Bulletin of Donetsk National Technical University. Mining and geological series*, 32, 104–117 [in Russian].
- Korchemagin, V. A. (1970). Joint tectonics, mechanism, and history of structure formation of the Nikitovka ore field. [Candidate dissertation (Geol.-Min. Sci), Donetsk], DPI [in Russian].
- Korchemagin, V. A. (1984). *Geological structure and stress fields in relation to evolution of endogenous regimes in the Donbas* [Doctoral dissertation (Geol.-Min. Sci), Schmidt Institute of Earth Physics of the Academy of Sciences of the USSR] [in Russian].
- Korchemagin, V. A., & Emets, V. S. (1987). Characteristics of development of tectonic structure and stress field of Donbas and Eastern Priazovye. *Geotectonics*, 3, 49–55 [in Russian].
- Korchemagin, V. O., & Riaboshan, Yu. S. (1987). Tectonics and stress fields of the Donbas. In Yu. Bulanzhe (Ed.), *Stress and strain fields in Earth's crust* (pp. 164–170). Nauka [in Russian].
- Korchemagin, V. A., Dudnik, V. A., Panov, B. S., & Alekhin, V. I. (2005). On the relationship between tectonic deformations and stresses and ore content in Donbas. *Geophysical Journal*, 27(1), 97–109.
- Nikitenko, O. V. (2014). Stress fields of western closure of Horlivka anticline of Donbas and staging of their development. *Scientific Bulletin of Donetsk National Technical University. Mining and geological series*, 1(20), 113–121 [in Russian].
- Nikitenko, O. V., & Chernysh, O. G. (2015). Use of the kinematic method for reconstruction of stress fields and mechanisms of the structure development in Donbas (on an example of the western closure of Horlivka anticline). *Geodynamics*, 2(19), 47–54.
- Nikolsky, I. L., Korchemagin, V. A., Emets, V. S., & Kledich, O. (1991). Tectonics of the Nikitovka ore field. In A. Ivanova and A. Obolensky (Eds.), *Conditions of localisation of antimony-mercury and fluorite mineralisation in ore fields* (pp. 30–37). Nauka, Siberian Branch [in Russian].
- Pavlov, I. O., Nikitenko, O. V. & Tkachenko, V. V. (2011). Kinematics of faults and stress fields of western closure of Main anticline of Donbas. *Coal of Ukraine*, 7, 43–45 [in Russian].
- Saintot, A., Stephenson, R., Brem, A., Stovba, S., & Privalov, V. (2013). Paleostress field reconstruction and revised tectonic history of the Donbas fold and thrust belt (Ukraine and Russia). *Tectonics*, 22(5), 1059, <https://doi.org/10.1029/2002TC001366>

Sim, L., Korchemagin, V., Frischbutter, A., & Bankwitz, P. (1999). The neotectonic stress field pattern of the East European Platform. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 27(3–4), 161–181.

Volkova, T. P., Nikitenko, O. V., & Chernysh, O. G. (2016). Structural and tectonophysical aspects of the development of the western closure of the

Horlivka anticline of the Donbas. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 6, 5–13.

Отримано редакцією журналу / Received: 12.08.23

Прорецензовано / Revised: 14.10.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Oleksandr NIKITENKO, PhD Student, Senior Geologist

ORCID ID: 0000-0001-7911-0760

e-mail: paleontologist78@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Brend-Vik LTD LLC, Kyiv, Ukraine

STRESS FIELDS AND GEOLOGICAL STRUCTURE OF WESTERN CLOSURE OF HORLIVKA ANTICLINE OF DONBAS PART 2. STRESS AND STRAIN FIELDS

Background. In tectonophysical studies, particular importance is placed on the mechanism of formation of large complex deformation structural elements, and the Horlivka anticline of the Donets Basin serves as such an example. Its importance lies not only in its complex structural composition and development mechanism but also in its potential impact on safe and efficient coal mining. This study aims to analyse the geological structure, stress and strain fields of the western closure of the Horlivka anticline that could be useful in forecasting geological factors for coal mining operations.

Methods. The paleostress analysis was performed on the collected fault orientation and kinematic data using Gushchenko's kinematic method based on the analysis of tectonic displacement vectors along slickensides. Mesoregional stress field characteristics were reconstructed by statistical processing of local stereographic solutions. The relative age chronology and staging of tectonic stresses were studied using the stress monitoring method. The characteristics of the principal axes of the total strain field were processed using the GEOS software.

Results. Mesoregional stress field is characterised by a subhorizontal NW–SE-oriented maximum principal stress axis and a subhorizontal NE–SW-oriented minimum principal stress axis. This stress regime is classified as a strike-slip regime and is the youngest one (Alpine orogeny) for the Donets Basin. The evolution of tectonic loading conditions of the studied structure is characterised by a deformation series of six stress regimes from the oldest (normal) to the youngest (strike-slip). Stretching axis of the strain ellipsoid is oriented NW and N–S, and shortening axis is oriented NE, nearly orthogonal to the anticline axis. Strike- and oblique-slip faulting regimes of the total strain field were determined for most of the study area, and the deformation has occurred under shear conditions, as indicated by the Lode–Nadai coefficient.

Conclusions. A structural pattern of deformation elements, including a conjugate strike-slip fault system of the shear zone, a dome-shaped fold, and longitudinal thrusts in its limbs, may be interpreted as a single pattern of structural paragenesis developed by right-lateral displacements along the longitudinal strike-slip fault system within the Horlivka anticline paraxial part. Fragments of mutual symmetry between the stress and strain fields can be taken as evidence of their genetic relationship.

Keywords: geological structure, shear deformation, kinematic indicator, stress field, brittle deformation field, kinematic method, Lode–Nadai.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.