

Збалансований розріз відслонення "Тартак" (Скибовий покрив Українських Карпат)

© М. В. Накапелюх¹, І. М. Бубняк², 2013

¹Інститут геофізики НАН України, Київ, Україна

²Львівський національний університет ім. І. Франка,
Львів, Україна

Надійшла 12 вересня 2012 р.

Представлено членом редколегії О. Б. Гінтовим

Представлены результаты комбинированного применения методов тектонофизических исследований и моделирования складчато-надвиговых структур на примере обнажения стрыйских отложений в с. Буковец, Скибовый покров Украинских Карпат. На основе тектонофизических исследований выявлены деформационные режимы и установлена последовательность их проявления. Эти исследования дополнены построением сбалансированного разреза обнажения и моделированием складчато-надвиговой структуры. Выделены три этапа образования структуры, на которых последовательно развивались складчатость, надвиги первого порядка, складки и надвиги второго порядка. Предлагается внести обнажение стрыйских отложений с. Буковец в реестр геологических памятников Украины.

We present the results of combined use of tectonophysical studies and modeling of thrust-fold structures on the outcrops of the Stryi deposits near village Bukivets', the Scyba nappe of the External Ukrainian Carpathians. Based on tectonophysical investigations the deformation regimes and their manifestation succession were distinguished. These investigations were complemented by balanced cross-section of an outcrop and modeling of fold-thrust structure. Three stages of the structure formation have been subdivided with successive development of folding; development of overthrusts of the first order; development of folds and overthrusts of the second order. It has been proposed to include the outcrop of the Stryi deposits near the village Bukivets' to the list of geological places of interest of Ukraine.

Вступ. В останні роки досягнуто значного прогресу у дослідженні складчасто-насувних структур в орогенних зонах, насамперед вивчені механізми утворення цих складних структур. Використання принципів механіки розвитку суцільного середовища значно поліпшило наше розуміння механізмів його формування. Фізичне моделювання також зробило внесок у розуміння еволюції як окремих структурних елементів, так і орогенних поясів. У вивченні складчасто-насувних поясів велику роль відіграє комп'ютерне моделювання (КМ). Комп'ютерні технології дають змогу швидко протестувати різноманітні гіпотези та теорії, візуалізувати результати досліджень, а також виконати значну кількість досліджень без великих матеріальних витрат.

У статті наведено результати вивчення складчасто-насувної структури флішової товщі Укра-

їнських Карпат на прикладі відслонення відкладів стрийської світи у с. Буківець. Продемонстровано використання комп'ютерних технологій на всіх етапах досліджень — від збору фактичного матеріалу до його опрацювання та подання.

Метою досліджень є побудова збалансованого геологічного розрізу відслонення та встановлення етапів його формування за допомогою відтворення залягання шарів порід до їх недеформованого стану (реконструкції розрізу) й визначення полів напружень, у яких розвивалася структура відслонення, із використанням тектонофізичних методів.

Геологічне положення. Район дослідження знаходиться в Українських Карпатах на лівому борті р. Сукіль, напроти приватного тартака в с. Буковець (рис. 1, а), у 18 км від м. Болехів. Довжина відслонення 57 м, висота 7,5 м.

У тектонічному відношенні район належить до Сколівської скиби Скибового покриву Українських Карпат [Тектонічна ..., 2007]. Породи, які тут відслонюються, складають верхньострийську підсвіту стрийської світи верхньої крейди — нижнього палеогену (рис. 1, б). Вони представлені флішовою товщею — перешаруванням пісковиків, алевролітів і аргілітів. Товщина пластів пісковиків 5—60, аргілітів — 1—8 см. Загальне падіння порід $225^{\circ}/20^{\circ}$ (азимут падіння/кут падіння), за нормального залягання.

Методи досліджень. Структури описано за морфометричними методами на основі азимутального ходу вздовж відслонення. Було заміряно поплатово увесь розріз і побудовано зведену літологічну колонку відслонення потужністю 6,62 м та геолого-структурний профіль. Відслонення закартовано в масштабі 1:200, пронумеровано всі пласти порід (рис. 2).

За тектонофізичними методами замірювали елементи тріщин і дзеркал ковзання у пластах. Заміри тріщинуватості проводили у чотирьох точках на різних рівнях розрізу та з урахуванням нумерації пластів. Загальна кількість виміряних тріщин 407, дзеркал ковзання — 30.

Методи обробки. Побудова розрізу відслонення у програмі CorelDraw. На основі даних — елементів залягання пластів, їх товщини, геометричних характеристик насувів, побудовано вихідний геологічний розріз у масштабі 1:200 (рис. 2), що є основою для побудови збалансованого розрізу. Дані, отримані на цьому етапі дослідження, були використані в програмі Move.

Побудова збалансованого розрізу відслонення у програмі Move. Побудову такого розрізу здійснюють у декілька етапів, при цьому він має відповідати декільком критеріям. Поряд із звичним розрізом будують реконструйований розріз, що відображає ситуацію структури до деформованого стану. Найважливіші критерії збалансованих розрізів — довжина структурних ліній (наприклад, стратиграфічних меж) і площа стратиграфічних підрозділів у перетині профілю — мають відповідати недеформованому стану. Це стосується і тривимірного простору. При цьому слід урахувувати процеси ущільнення порід та деформаційні перетворення [Dahlstrom, 1969; Hossack, 1979; Suppe, 1985; Price, 1986; Mitra, Namson, 1989; Woodward et al., 1989].

Розріз побудовано в інтерактивному режимі: форми залягання горизонтів і насувів корегували у такий спосіб, щоб вони відповідали законам (алгоритмам) переміщення по розломах під час їх відновлення до додеформованого стану.

Обробка тектонофізичних даних мезо-структур (тріщин, дзеркал ковзання) у програмах StereoNet, Fabric8 та WinTensor. Для опрацювання тріщин у програмі StereoNet були побудовані контурні діаграми та рози-діаграми тріщин, розвинутих у пластах. Детальний опис аналізу мезоструктур та їх використання для тектонофізичних досліджень наведено у роботах вітчизняних і закордонних дослідників [Wallbrecher, 1986; Аронский и др., 1995; Delvaux, Sperner, 2003; Гинтов, 2005; Гинтов и др., 2011].

Після опрацювання даних та їх ротації було встановлено, що більшість тріщин (90 %) є катетальними, тобто перпендикулярними до напластування. Це засвідчує, що тріщини виникли на ранніх стадіях утворення структури за відносно невеликий інтервал часу.

Відсутність скісних тріщин щодо напластування та вертикальних у сучасному положенні може вказувати на те, що товща не реагувала на молодші поля напруження або кут нахилу орієнтації σ_1 збігався з кутом нахилу напластування, в результаті чого утворювалися тільки катетальні тріщини.

Кожну точку спостереження опрацьовували окремо. За використання парагенетичного методу аналізу тріщинуватості було виявлено два поля напруження у кожній точці. В токах 1 і 5 було встановлено три поля напруження (рис. 3, а).

Точки спостережень (місця замірів) знаходяться в межах відслонення завдовжки 50 м, однак результати інтерпретації тріщинуватості у кожній з них відрізняються. Локальні поля напруження відображаються в усіх точках, тоді як регіональні (планетарні — широтні та меридіональні) проявились у тріщинуватості лише у точках 5 та 10.

Результати досліджень. Результати опрацювання тріщин і дзеркал ковзання. За аналізом тріщинуватості структурно-парагенетичним методом — накладенням стереограм одну на одну, було встановлено п'ять головних (великих) груп полів палеонапружень із азимутами орієнтації головної осі напруження: 100° , 131° , 159° , 195° , 227° (рис. 3, б).

За результатами аналізу дзеркал ковзання на основі кінематичного методу за програмою WinTensor виділено локальні поля напруження: 1) карпатське стиснення 191/11, R : 0,21; 2) антикарпатське стиснення 133/21 R : 0,28; 3) карпатське розтягнення 031/04, R : 0,5 (рис. 3, в).

Результати моделювання за програмою Move. На основі отриманих даних побудовано збалансований розріз відслонення за програмою

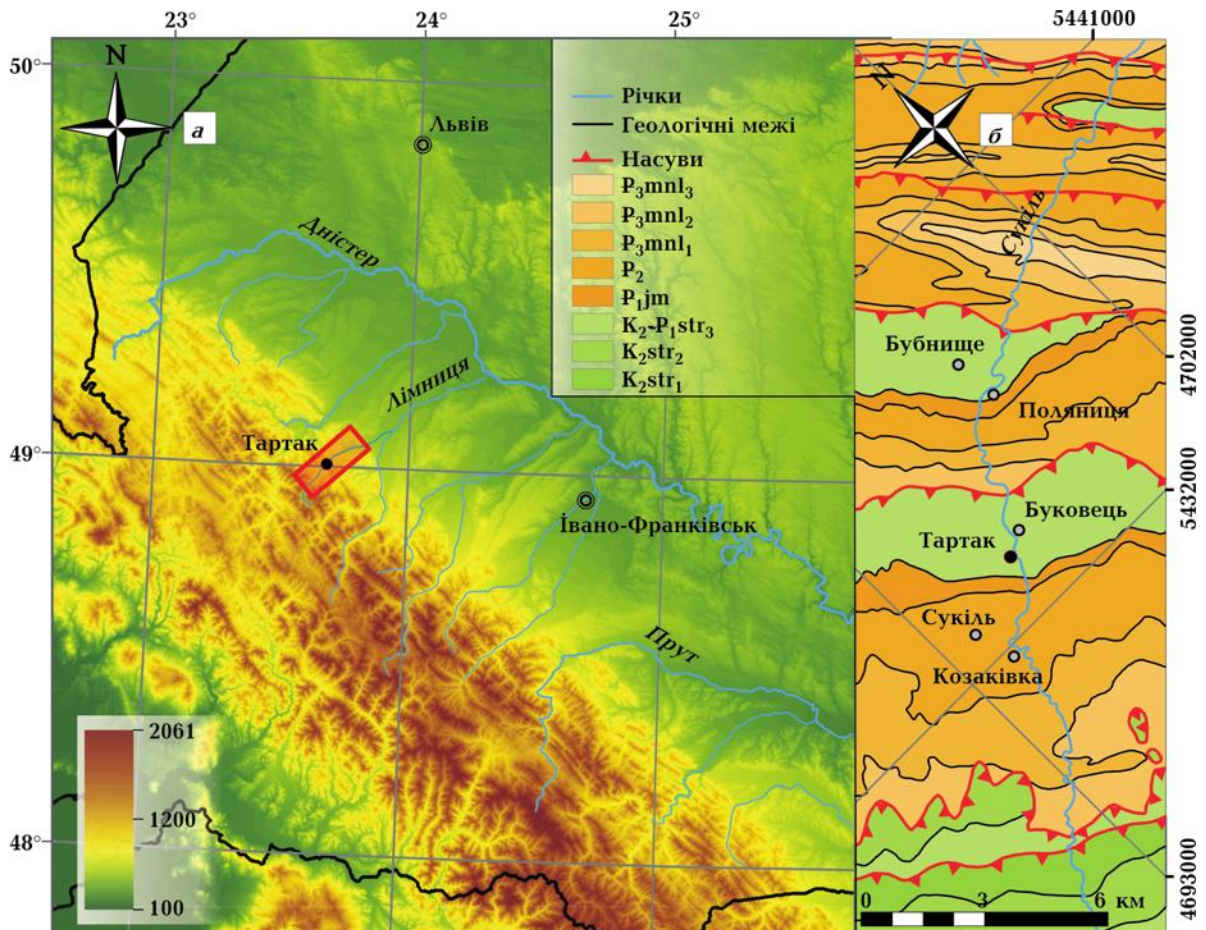


Рис. 1. Положення досліджуваного району (а) і фрагмент геологічної карти Українських Карпат [Геологічна ..., 2007], на якому показано місце знаходження відслонення "Тартак" (б).

Move. Цей розріз використано у моделюванні механізму утворення спостережених структур.

Під час моделювання досліджуваної структури були застосовані алгоритми механізмів *простий зсув* (англ. simple shear), *переміщення, пов'язане з вигином пластів* (англ. flexural slip), для утворення складок і *паралельне переміщення по розлому* (англ. fault-parallel-flow) — алгоритм кінематичного відновлення, який використовують у прямому моделюванні надрозломних структур, у результаті переміщення по площині розлому. Алгоритм fault-parallel-flow дає змогу перемістити поверхню висячого крила так, щоб його частини рухалися паралельно прямим ділянкам розлому. Цей алгоритм є найкращим для прямого моделювання насувних структур, їх відновлення та утворення надрозломних складок (fault propagation fold) [Egan et al., 1997].

У процесі моделювання на цьому відслоненні виділено три етапи розвитку структури — розвитку складчастості, насувів першого порядку та складок і насувів другого порядку.

Етапи утворення структури відслонення "Тартак". Розвиток складчастості. Флішова товща досліджуваної ділянки утворилася внаслідок опускання її фундаменту (рис. 4. 1). Тонкими стрілками показано місця фіксації структури (pin) під час моделювання. Детальний розгляд механізму опускання не є завданням цього дослідження.

На етапі закладання та утворення складчастої структури спочатку закладаються антиклінали (рис. 4. 2). Формування складчастої структури пов'язане із розвитком всієї карпатської складчасто-насувної системи. Поля напружень, які діяли у цій системі на той час, сприяли розвитку пластичних деформацій — складчастості, та були надто малими для утворення тріщинуватості в замках складок і розривних порушень — насувів. Складчастості зазнала не вся товща: спочатку верхні шари, а саме А, Б, і частково шар В. Пласт Г не зазнав деформації. Крім того, закладалися місця утворення насувів різного порядку.

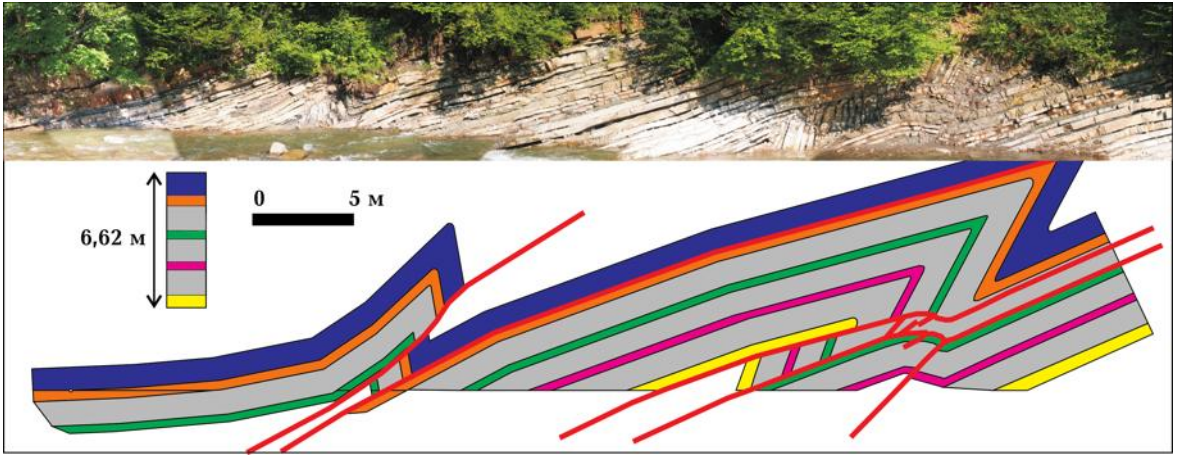


Рис. 2. Геологічний розріз відслонення "Тартак", побудований у програмі CorelDraw.

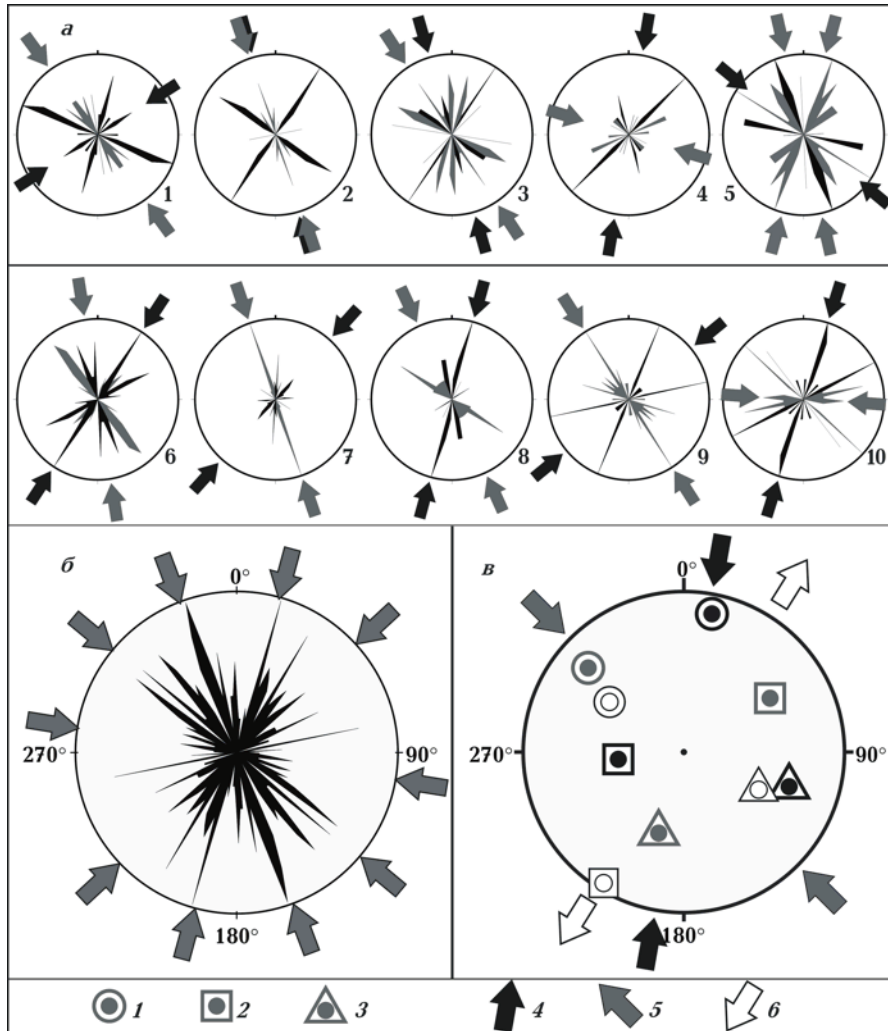


Рис. 3. Розі-діаграми тріщинуватості (а), які побудовано по 10 точках відбору, усереднені напрямки головного поля напруження (б) за структурно-парагенетичним методом і результати аналізу кінематичним методом (в): 1—3 — вісі напруження (1 — σ_1 , 2 — σ_2 , 3 — σ_3), 4 — головне (карпатське) стиснення, 5 — антикарпатське стиснення, 6 — карпатське розтягнення.

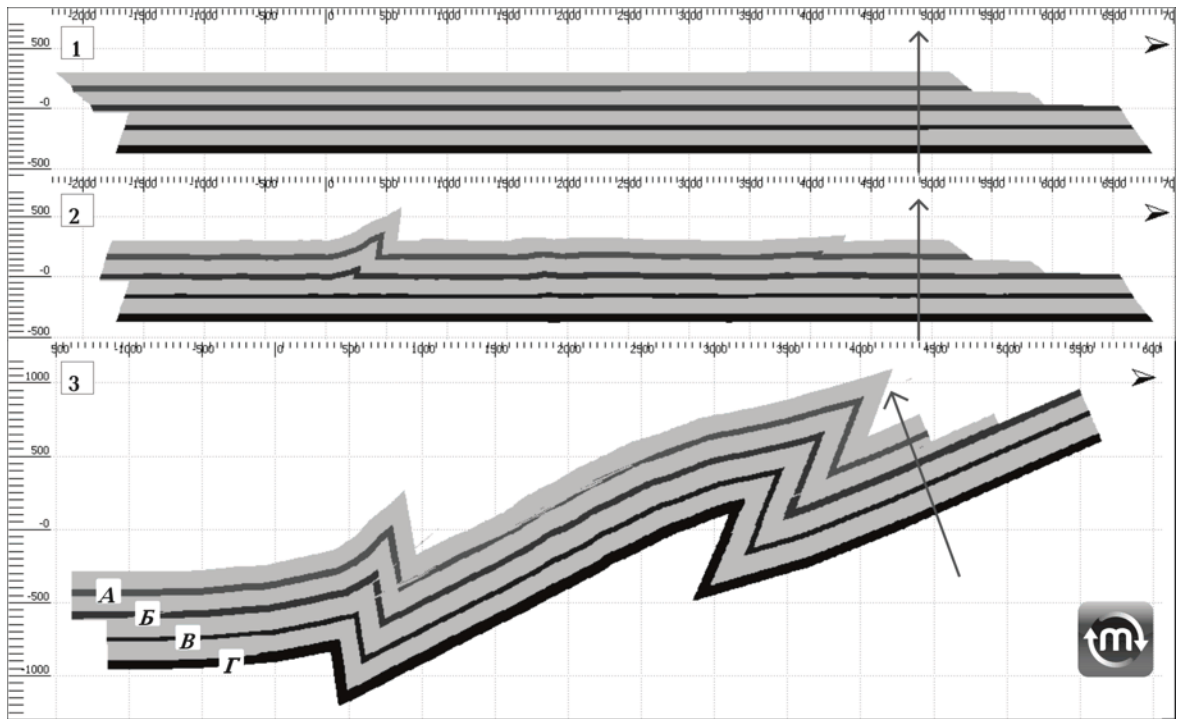


Рис. 4. Перший етап розвитку структури відслонення — розвиток складчастості.

У результаті насувоутворення та формування скибової (насувної) будови Карпат змінювались елементи залягання товщі від початкового горизонтального до сучасного з азимутом падіння 200—230° і кутами падіння від 10—28° та частково до субгоризонтального залягання (рис. 4, 3). Складчастості зазнала вже вся товща. Закладалися площини насувів на послаблених ділянках складчастої структури. Важливу роль при цьому відігравали замки антиклінальних складок та характер співвідношення крил складок південно-західного падіння, по площинах яких відбувалось переміщення, з розривом крил північно-східного падіння.

Аналіз форми складок виконано у програмі Fabric8 (рис. 5). Ця програма описує форму складки за допомогою коефіцієнта Фур'є [Ramsay, Hubert, 1987]. Профіль складки розглянуто як гармонічну хвилю, яку можна розкласти на її гармонічні компоненти за допомогою аналізу Фур'є. Загальна формула для опису випадкової гармонічної хвилі за допомогою коефіцієнта Фур'є має вигляд

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos 2\alpha + a_3 \cos 3\alpha + \dots \\ \dots + b_1 \sin \alpha + b_2 \sin 2\alpha + b_3 \sin 3\alpha + \dots$$

За класифікацією Фур'є, всі складки належать до поля F3, що відповідає шевронному ти-

пу. Це свідчить про однакові умови утворення складок.

Унаслідок складчастості товща скоротилася на 20,2 м — з 90,6 до 70,4 м, тобто на 22,3 % від початкової довжини.

Розвиток насувів першого порядку. На цьому етапі утворилися чотири насуви, які ускладнюють структуру відслонення. Насуви відбулися між шарами пісковиків по шару аргілі-

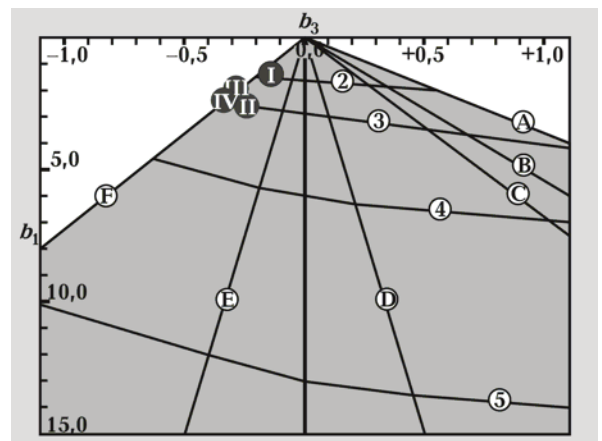


Рис. 5. Діаграма аналізу складок за класифікацією Фур'є.

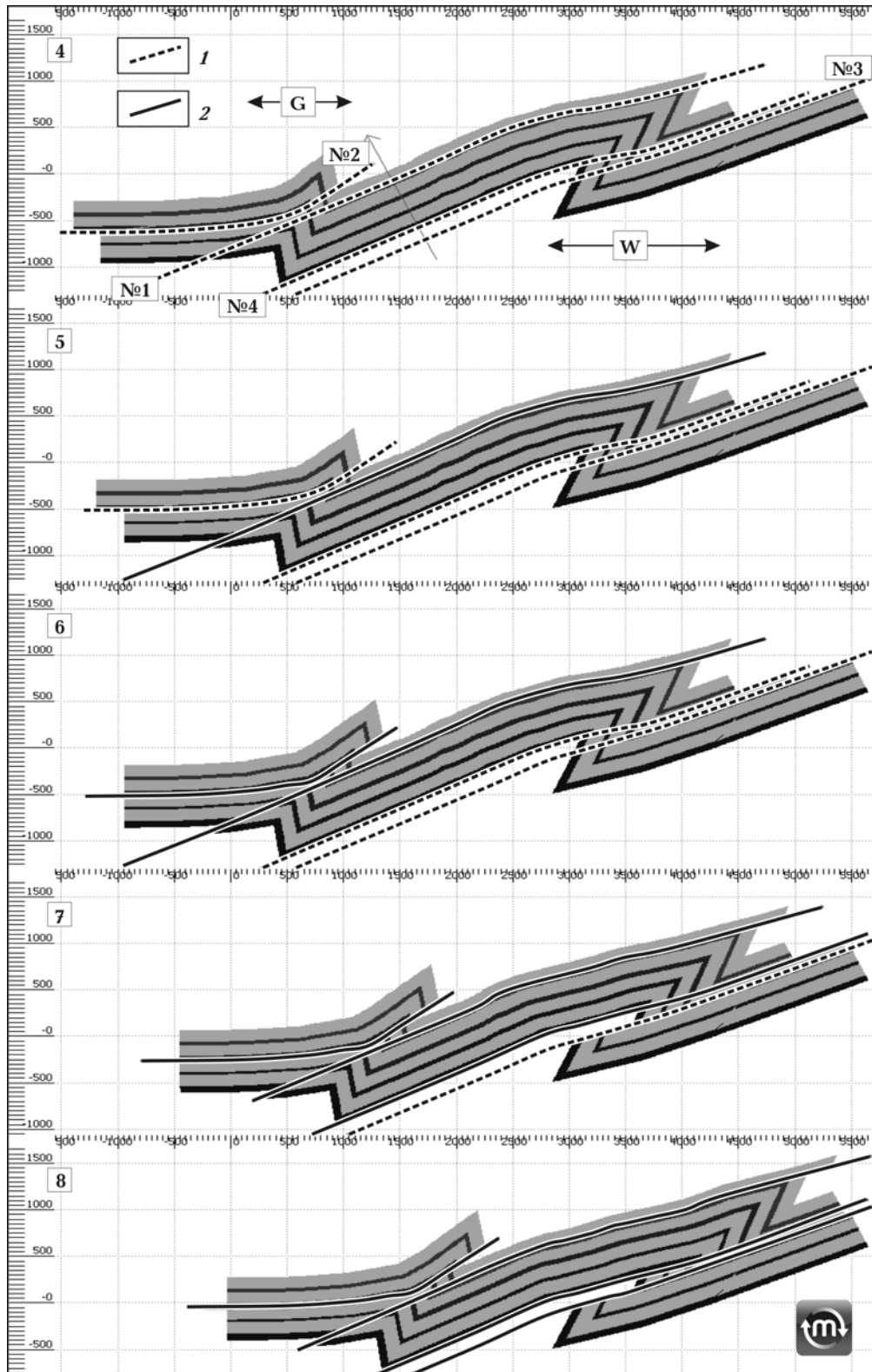


Рис. 6. Другий етап розвитку структури відслонення — розвиток насувів першого порядку:
 1 — місце закладання насуву, 2 — активний насув.

ту, утворивши глинку тертя у ньому (рис. 6. 4, штрихові лінії).

Насув № 1 знаходиться у покрівлі пласта А (рис. 6. 5). Над цим пластом залягає пласт потужністю 1 м. Використавши аргілітовий шар ($P = 5$ см) між цими двома пластами як своєрідне мастило, верхній (потужний) шар перемістився, утворивши площину насуву, яка порушила структуру складки G і перетнула крила під кутами 90° та 52° . Амплітуда переміщення по площині насуву 2,3 м. Кут падіння площини насуву 28° та 17° .

Насув № 2 знаходиться у підшві пласта Б (рис. 6. 6). У результаті переміщення по площині зміщувача амплітудою 2,4 м насув розривав крило складки G під кутом 62° , змінивши при цьому кут падіння площини від $2-15^\circ$ до 37° .

Насув № 3 знаходиться у покрівлі пласта Б (рис. 6. 7). Насув розриває складку W під кутом 54° відносно крутопадаючого крила та використовує послаблену ділянку замка складки пласта Б. Амплітуда переміщення 5,6 м.

Насув № 4 знаходиться у підшві пласта Г і розвивається паралельно насуву № 3 через послаблену ділянку замка складки пласта Г (рис. 6. 8). Амплітуда переміщення 4,7 м.

Унаслідок насуютворення шар завтовшки 70,4 м скоротився на 13,8 м — до 56,7 м (по горизонталі), що становить 19,4 % стосовно довжини відслонення до насуютворення.

Розвиток складок і насувів другого порядку. Після етапу насуютворення товща зазнала пластичної деформації, внаслідок чого відбулося флексуроподібне вигинання площин насувів № 1, 3, 4 і шарів порід (рис. 7. 9). Таку деформацію могли спричинити нові складчасто-насувні процеси. Відбулося закладання насувів другого порядку — № 5.

Завершальний етап розвитку структури — формування системи насувних порушень у місці утворення флексури з амплітудою переміщення перші сантиметри. Репрезентативним є насув № 5. Він розвивається у зоні деформації флексури і порушує лише товщу, що залягає нижче насуву № 3. Амплітуда насуву № 5 50 см.

Обговорення результатів. Дослідження мезоструктур — складок, насувів, тріщин, дзеркал ковзання та інших — дає змогу оперувати даними, які одержані безпосередньо у відслоненні, та використовувати їх під час детальних структурних побудов. За результатами детальних досліджень у масштабі відслонення бу-

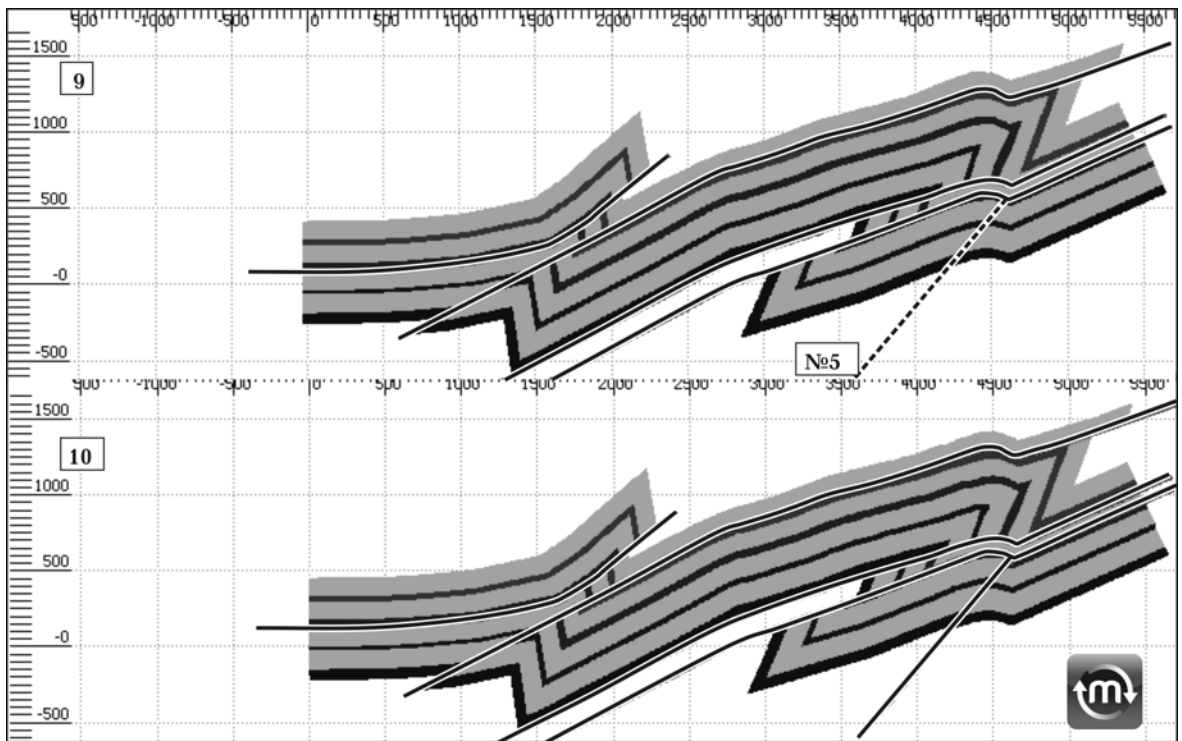


Рис. 7. Третій етап розвитку структури відслонення — розвиток складок і насувів другого порядку.

дують реальні геологічні об'єкти з дотриманням усіх пропорцій у розташуванні ключових елементів, які необхідні для подальшої їх обробки та моделювання.

Дані, заміряні компасом і мірною стрічкою безпосередньо на відслоненні, мають високий ступінь достовірності, на відміну від інших джерел інформації (геофізичних, непрямих), що підвищує якість вимірjувальних робіт. Дослідження у масштабі відслонення показують достовірні результати, які можна застосовувати під час інтерпретації розвитку структур вищого порядку.

Перший і необхідний етап — виявлення парагенезисів мезоструктур у досліджуваному регіоні для їх подальшого використання при виборі алгоритмів для моделювання структурних елементів.

За результатами наших досліджень, наслідки дії полів палеонапружень, а саме тріщинуватість, проявляються по-різному навіть в межах одного відслонення. Пласти порід "запам'ятовують" локальне палеонапруження певного напрямку парагенезами орієнтацій тріщин, і цих напрямків може бути декілька.

З часу свого утворення товща постійно перебуває під дією поля напруження, яке змінюється у часі й просторі. Характерним є те, що в одній точці можуть проявлятися два, рідше три напрямки орієнтації палеонапруження. Таких головних груп напрямків виявлено п'ять:

Поле	Орієнтація σ_1 , градуси
Головне (Карпатське)	225, 195
антикарпатське	159, 131
субширотне	100

З урахуванням того, що 90 % тріщин є катальними, можна допустити, що вони утворилися на ранніх стадіях розвитку структури, коли товща залягала субгоризонтально. Отже, поля, які одержано за структурно-парагенетичним методом, діяли на доскладчасто-насувному етапі розвитку Українських Карпат.

За результатами аналізу кінематичним методом дзеркал ковзання виділено три поля напруження: карпатське стиснення 191/11, $R : 0,21$; антикарпатське стиснення 133/21 $R : 0,28$; карпатське розтягнення 031/04, $R : 0,5$.

У процесі розвитку складчасто-насувної структури досліджуваного відслонення діяли перші два поля — карпатське та антикарпатське.

Поля розтягнення можуть бути пов'язаними з розтягом палеобасейну осадоагромаджен-

ня на пізніших етапах розвитку території, де в уже сформованій товщі стрийської світи вони проявилися як скиди в межах певного пласта.

Отримані дані дуже добре відповідають даним регіональних полів напружень, що були виявлені попередніми дослідженнями у Зовнішніх Українських Карпатах [Гинтов и др., 2011; Аронский и др., 1995; Бубняк та ін., 2001; Віхоть та ін., 2011].

Побудова збалансованого розрізу та відтворення етапів розвитку структури мають важливе значення для розуміння динамічних процесів, які сформували структуру.

Необхідними даними для побудови моделі розвитку структури є інформація про просторове розміщення всіх елементів розрізу стосовно один одного. Часто за браком інформації доводиться відтворювати певну частину розрізу за допомогою прямого моделювання. Усі етапи моделювання ґрунтуються на декількох алгоритмах переміщення та алгоритмі unfolding.

Результатом побудови і відтворення збалансованого розрізу відслонення є товща завдовжки 90,6 м. Під час моделювання було встановлено три етапи його розвитку: складчастості, насувів першого порядку, складок і насувів другого порядку.

Використання результатів аналізу палеонапружень разом з моделюванням дає можливість одержати повнішу картину розвитку структури й створити таку модель, яка б максимально відповідала геологічній ситуації. З переходом на тривимірний простір моделювання інформація щодо напрямку просторового переміщення, яку одержують за результатами тектонофізичних досліджень, стає незамінною під час моделювання.

Висновки. Поля напружень, що встановлені на основі КМ з орієнтаціями головних діючих осей (карпатське стиснення 191/11, $R : 0,21$; антикарпатське стиснення 133/21 $R : 0,28$; карпатське розтягнення 031/04, $R : 0,5$), дають інформацію про складчасто-насувний етап розвитку.

Головне (карпатське) поле з азимутом 195° , що виявлено за структурно-парагенетичним методом, добре корелюється зі стисненням 191/11, $R : 0,21$ за КМ, а антикарпатське поле 131° — з антикарпатським стисненням 133/21 $R : 0,28$. Наявність регіонального палеонапруження субширотної орієнтації визначено у двох точках — № 4 та 10. Ці поля добре узгоджуються з етапами розвитку структури, що отримані в результаті моделювання складчасто-насувної структури.

За результатами моделювання за програмою Move встановлено, що переміщення шарів по площині розлому відбувалось за алгоритмом Fault — Parallel — Flow, а розвиток складчастих структур — за алгоритмами Simple Shear та Flexural Slip.

Встановлено, що довжина відслонення у процесі складко- та насуювотворення скоротилася на 37,5 % від початкової довжини, а саме з 90,6 до 56,7 м. На 20,2 м (22,3 %) товща зменшилась внаслідок складчастості першого етапу, на 13,8 м (15,2 %) — внаслідок насуювотворення другого етапу. Третій етап розвитку не вплинув на розмір відслонення, а лише ускладнив його будову.

Результати дослідження відслонення стрийських відкладів можуть бути враховані під час

побудови регіональної геодинамічної моделі Скибової зони Українських Карпат. Дані цього дослідження будуть використані як ввідні параметри для моделювання флюїдного режиму флішової товщі Українських Карпат.

Відслонення "Тартак" є дуже добрим прикладом моделі розвитку Зовнішніх Карпат, по суті це Карпати в мініатюрі. Тому його необхідно внести до списку геологічних пам'яток України.

Подяки. Автори висловлюють подяку члену-кореспонденту НАН України професору О.Б. Гінтову за детальне обговорення результатів досліджень і зауваження.

Автори складають подяку розробнику програмного забезпечення Move — фірмі "Midland Valley".

Список літератури

- Аронский А.А., Беличенко П.В., Гинтов О.Б., Муровская А.В. Кинематические параметры деформирования верхних горизонтов земной коры Украинских Карпат в миоцен-плейстоценовую эпоху (по тектонофизическим данным). 1—3 // Геофиз. журн. — 1995. — **17**, № 3. — С. 58—68; № 5. — С. 11—19; № 6. — С. 43—57.
- Бубняк І., Бубняк А., Кілин І., Попп І. Структурно-седиментологічні дослідження добротівських відкладів Передкарпатського прогину (район Надвірної) // Праці Наук. тов-ва ім. Шевченка. Геол. зб. — 2001. — **5**. — С. 84—93.
- Віхоть Ю.М., Бубняк І.М., Накапелюх М.В. Результати тектонофізичних досліджень флішової товщі скибового покриву Українських Карпат у долині р. Бистриця Надвірнянська // Геол. журн. — 2011. — № 2. — С. 72—80.
- Геологічна карта Українських Карпат. — 1 : 100 000. Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська, Чернівецька області України / Склали В.В. Глушко, В.В. Кузовенко, В.Е. Шлапинський; ред. Ю.З. Крупський: Звіт ЗАТ "Концерн Надра". — Фонд ЗАТ "Концерн Надра". — Київ, 2007. — 228 с.
- Гинтов О.Б., Бубняк И.Н., Вихоть Ю.М., Муровская А.В., Накапелюх М.В. Эволюция напряженно-деформированного состояния и динамика Скибового покрова Украинских Карпат // Геофиз. журн. — 2011. — **33**, № 5. — С. 17—34.
- Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. — Киев: Феникс, 2005. — 572 с.
- Тектонічна карта України. — 1 : 1 000 000. Поясн. зап. Ч. 1/Під ред. Д.С. Гурського, С.С. Круглова. — Київ: УкрДГРІ, 2007. — 190 с.
- Dahlstrom C.D.A. Balanced cross sections // *Canad. J. Earth Sci.* — 1969. — **6**, № 4. — P. 743—757.
- Delvaux D., Sperner B. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program // *New Insights into Structural Interpretation and Modeling* / Ed. D. Nieuwland. — London: Geol. Soc. Spec. Publ., 2003. — V. 212. — P. 75—100.
- Egan S.S., Buddin T.S., Kane S.J., Williams G.D. Three-dimensional modeling and visualization in structural geology: New techniques for the restoration and balancing of volumes. *Proceed. of the 1996 // Geoscience Information Group Conf. Geol. Visualization: Electronic Geology.* — 1997. — V. 1. — P. 7, 67—82.
- Hossack J.R. The use balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: A review // *J. Geol. Soc. London.* — 1979. — **136**. — P. 705—711.
- Mitra S., Namson J.S. Equal-area balancing // *Amer. J. Sci.* — 1989. — **289**. — P. 563—599.

- Price R.A.* The southeastern Canadian Cordillera: thrust faulting, tectonic wedging and delamination of the lithosphere // *J. Struct. Geology*. — 1986 — **8**, № 3/4. — P. 239—254.
- Ramsay J.G., Hubert M.I.* The Techniques of Modern Structural Geology. — London: Acad. Press., 1987. — Vol. 2: Folds and Fractures. — 391 p.
- Suppe J.* Principles of structural geology. — New York: Prentice-Hall, 1985. — 337 p.
- Wallbrecher E.* Tectonische und gefugeanalytische Arbeitsweisen. — Stuttgart: Enke, 1986. — 244 s.
- Woodward N.B., Boyer S.E., Suppe J.* Balanced geological cross-sections: An essential technique in geological research and exploration // *Amer. Geophys. Union Short Course in Geology*. — 1989. — № 6. — 132 p.