

## Поля напружень і деформаційні режими в межах української частини Східних Карпат за тектонофізичними даними

А. Муровська<sup>1</sup>, Т. Амашукелі<sup>1</sup>, В. Альохін<sup>2</sup>, 2019

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Донецький національний технічний університет, Покровськ, Україна

Рассмотрены материалы полевых тектонофизических наблюдений 2013—2018 гг. и переинтерпретированные полевые данные 1990—1995 гг. Для определения тензора напряжения применялись структурно-парагенетический и кинематический методы тектонофизики. Использование процедуры оптимизации, реализованной в программе Вин Тензор, позволило учесть борозды скольжения без установленных кинематических типов, которые не вошли в предыдущие обработки. Определяющую роль в формировании и развитии Украинских Карпат играли тектонические силы юго-западного (220°) направления. При образовании хрупких разрывов существенно преобладали сдвиговые деформационные режимы, а в условиях взбросового деформационного режима происходила пластическая деформация (формировалось складчато-надвиговое сооружение Украинских Карпат). В Раховском массиве и юго-восточной части зоны Пьенинских скал ориентирование осей сжатия регионального поля напряжений изменилось на субширотное. Впервые поле растяжения юго-западного направления было связано со сбросовыми разломами фундамента. Восстановлено также поле напряженности с субмеридиональной осью сжатия. Выделены две стадии развития Карпатского орогена: на раннеорогенной стадии складчато-надвиговые деформации достигали своего максимума в условиях взбросового деформационного режима; на позднеорогенной стадии ускорилось поднятие Карпатского сооружения вследствие изостазии, произошло его расчленение диагональными, поперечными и продольными смещениями. В современный период обстановка тангенциального сжатия в Карпатах сохраняется, о чем свидетельствуют поля сжатия по тектонофизическим и сейсмологическим данным, но в верхней части коры накладывается растяжение под действием гравитационных сил.

**Ключевые слова:** Украинские Карпаты, зеркала скольжения, кинематический метод, поле напряжений, деформационный режим, геодинамика.

**Вступ.** Українська частина Карпат охоплює північно-західну частину Східних Карпат, що є гілкою Альпійсько-Карпатської дуги Середземноморського складчастого поясу. Сучасний тектонічний поділ Українських Карпат ґрунтується на роботах В. В. Глушка і С. С. Круглова [Глушко, Круглов, 1971; Круглов, Цыпко, 1988; Тектоническая..., 1986; Тектонічна..., 2007]. Карпати традиційно поділяють на дві основні тектонічні одиниці, які різняться за часом складчастості: Внутрішні та Зовнішні Карпати, межею яких є протяжна вузька зона П'єнінських скель. Зовнішні (Флішові) Карпати формують безкореневу

складчасто-насувну споруду, складену крейдяно-міоценовим флішем і, частково, неогеновою моласою, що насунута на Європейську плиту. Перед фронтом Карпат, на крайовій частині Європейської плити розміщується Передкарпатський прогин, заповнений потужними неогеновими моласами.

Незважаючи на значні досягнення останніх десятиліть у вивченні тектоніки і геодинаміки Українських Карпат, ще залишається багато питань, що потребують свого вирішення, ілюстрацією чого є існування різних геодинамічних моделей регіону, критично розглянутих у публікації

[Тектонічна..., 2007]. Новий масив геолого-геофізичних даних, поява сучасних підходів, зокрема методів тектонофізики, комп'ютерних технологій обробки даних, створили нові можливості для вирішення проблемних питань.

У питання геодинаміки Українських Карпат вагомий внесок зроблений тектонофізичними дослідженнями, розпочатими під керівництвом О. Б. Гінтова [Аронский и др., 1995; Гинтов, 2005 та ін.]. З появою сучасного комп'ютерного забезпечення у геології стало можливим проводити тектонофізичні дослідження на новому рівні. Завдяки роботам [Гинтов и др., 2011, 2013, 2014; Бубняк та ін., 2013; Віхоть та ін., 2011; Муровская и др., 2016, 2018; Малицький та ін., 2017, 2018] в Українських Карпатах відновлено дослідження сучасних напружень і палеонапружень в межах Передкарпатського прогину, Скибового покриву, зоні Пенінських скель і Закарпатського прогину. З 2013 р. група українських дослідників (І. Бубняк, М. Накапелюх та ін.) запроваджує методику балансування розрізів з використанням комп'ютерного забезпечення Midland Valley (пакет програми Move) [Бубняк, Накапелюх, 2013; Гинтов и др., 2014; Nakapeliukh et al., 2017, 2018]. У піонерних роботах [Nakapeliukh et al., 2017, 2018] узагальнено результати палінспастичних досліджень західного і двох східних перетинів Українських Карпат з результатами фішен-трек аналізу.

Незважаючи на багаторічне вивчення регіону тектонофізичними методами, залишилися невирішеними питання, які можна сформулювати таким чином: узагальнення тектонофізичних досліджень різних років у рамках єдиної методики та їх інтерпретація у контексті сучасних досягнень і поглядів на розвиток Панкардії.

**Методика й дані.** При визначенні головних осей тензора напруження було застосовано кінематичний метод при опрацюванні тектонічних дзеркал з борознами ковзання та структурно-парагенетичний метод при вивченні розривів без слідів переміщення. Вперше застосували кінематичний метод у сейсмологічних досліджен-

нях Д. П. Маккензі, С. Б. Батдорф і Б. К. Бундьянський. Розробка та запровадження кінематичного методу в практику польових тектонофізичних належать О. І. Гуценку та Ж. Анжельє [Гінтов, 2005]. Польові заміри дзеркал ковзання були опрацьовані та проінтерпретовані за допомогою програми Win-Tensor v.4.0.4 [Devlaux, Sperner, 2003], що базується на методі правої дигетри та реконструює поле напружень для сукупності дзеркал ковзання.

Структурно-парагенетичний метод ґрунтується на вивченні геометричних співвідношень між структурами, які виникають у ході єдиного деформаційного процесу. Для визначення поля напружень у сукупності крихких тріщин без слідів переміщення використано модель розломної зони Стоянова—Гінтова [Гінтов, 2005]. Найхарактернішими розривами у цій моделі, що виникають при деформаціях суто зсуву, є сполучені  $R$  і  $R'$ -сколи, або сколи Ріделя. Кут між цими тріщинами — гострий:  $\theta=50\div 70^\circ$ . Поряд зі сколами Ріделя у тому самому полі напружень виникають ортогональні  $L$ - та  $L'$ -сколи, субпаралельні площинам максимальних дотичних напружень  $\tau_{\max}$ , що перетинаються по осі  $\sigma_2$  і орієнтовані під кутом  $45^\circ$  до головних осей  $\sigma_1$  та  $\sigma_3$  тензора напружень (віссю розтягу є вісь мінімального стиску  $\sigma_3$ , а віссю стиску — вісь максимального стиску  $\sigma_1$ ). Для опрацювання матеріалів польових досліджень тріщинуватості використано програму Stereo32. Кожну тріщину зображено полюсом, що є точкою виходу на нижню півсферу нормалі до площини тріщини. Полюси всіх тріщин в межах кожного відслонення узагальнено на контурній діаграмі, яка демонструє кількість полюсів тріщин певних напрямків в ізолініях.

Під час досліджень було використано матеріали польових тектонофізичних спостережень, виконаних авторами в 2013—2018 рр., а також переінтерпретований масив польових даних, отриманих в 1990—1995 рр. [Аронский и др., 1995]. Необхідність переінтерпретації пов'язана з появою нових технологій обробки та інтерпретації тектонофізичних даних, наприклад [De-

vlaux, Sperner, 2003]. Одна з досить важливих проблем кінематичного методу полягає у неоднозначності визначення напрямку переміщення по тектонічному дзеркалу. Неправильне визначення переміщення призводить до зміни орієнтування розрахованих головних осей тензора напружень до 90°. З урахуванням цього факту польові тектонофізичні вимірювання у 1990—1995 рр. проводили вкрай обережно, більшість борозн ковзання на тектонічних дзеркалах залишилися без визначення типу переміщень, тому їх попередньо не обробляли кінематичним методом. Поява процедури оптимізації, імплементованої в програму Win-Tensor, дала змогу при розрахунках тензора напружень враховувати борозни ковзання без кінематичних типів [Devlaux, Sperner, 2003].

Пункти спостережень (ПС), які увійшли до нової обробки, показано на рис. 1. Вони згруповані у п'ять доменів за принципом просторової близькості та оконтурені полігонами. У Закарпатському прогині та зоні П'єнінських скель ПС мають окрему нумерацію і позначені червоним кольором

(рис. 1). Перший домен охоплює басейни річок Стрий, Опір і верхню течію Латориці та представлений 12 відслоненнями, які розміщуються в межах Скибового, Кросненського, Дуклянського та Поркулецького покривів (рис. 1).

**Результати.** Для кожного ПС визначено одне чи декілька полів напружень, які продемонстровано на відповідних стереограмах (рис. 2, а). З лівого боку від кожної стереограми стрілками показано орієнтування відповідних осей стиснення або розтягу, а типи деформаційних режимів позначено різними кольорами, як у публікаціях [Bada et al., 2007; Heidbach et al., 2016]. У межах першої ділянки переважають деформаційні режими стиснення, для яких зліва синім кольором винесено осі стиснення. Зсувні режими визначено для чотирьох ПС, а вісь стиснення для них показано зеленим кольором. Скидові деформаційні режими виявлено на трьох відслоненнях, вісь розтягу для них показано червоним кольором. Для всіх визначень полів напружень осі стиснення винесено на загальну контурну діа-

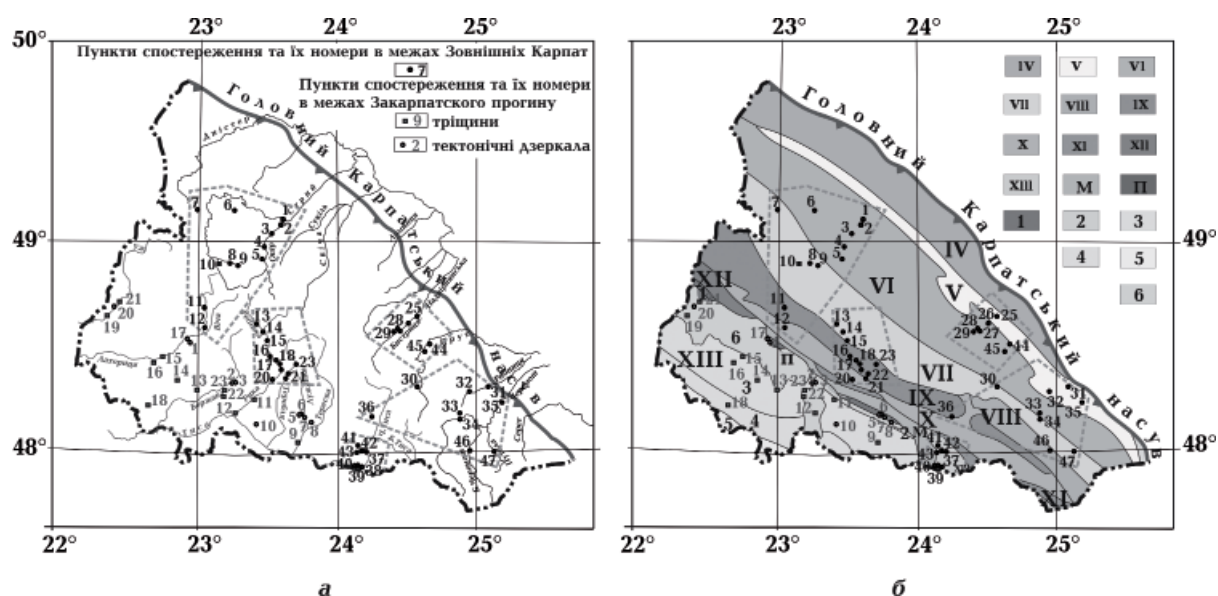


Рис. 1. Пункти тектонофізичних спостережень, згрупованих у п'ять доменів за принципом просторової близькості на фоні: а — річкової сітки; б — тектонічної схеми [Тектоническая..., 1986]. Покриви Зовнішніх Карпат: IV — Самбірський; V — Бориславо-Покутський; VI — Скибовий; VII — Кросненський; VIII — Чорногорський; IX — Дуклянський; X — Поркулецький; XI — Рахівський; XII — Магурський; XIII — Мармароський масив; М — зона Мармароських кліпів; П — зона П'єнінських кліпів; 1—6 — структурні одиниці в межах Закарпатського прогину (6 — Вигорлат-Гутинський вулканічний комплекс).

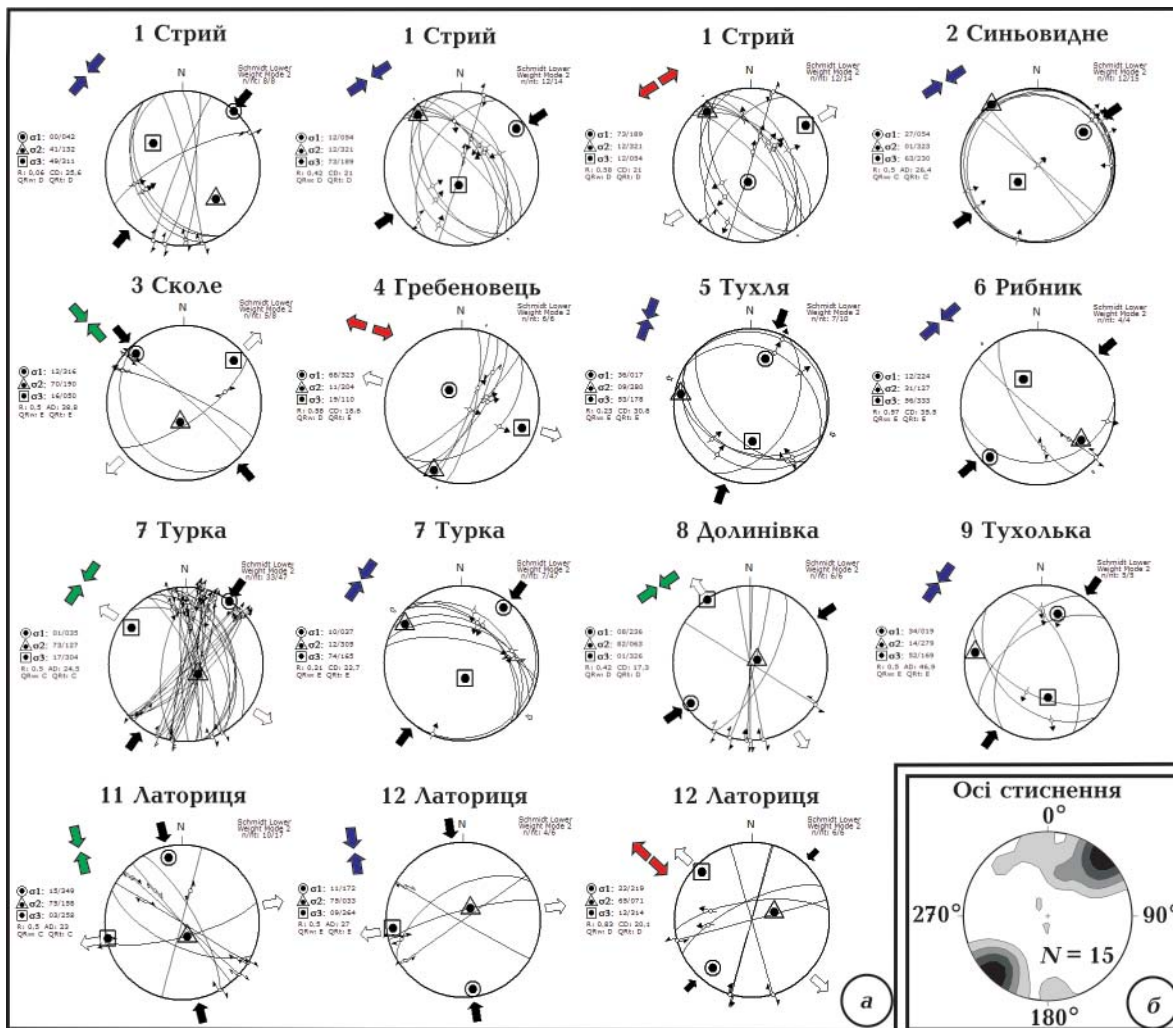


Рис. 2. Поля напружень на пунктах спостережень 1—12: а — кінематичні стереограми з номером і назвою ПС, деформаційний режим показано стрілками в лівому верхньому кутку (зелений — зсувний, синій — підкидовий, червоний — скидовий); б — узагальнення орієнтувань осей стиснення на ПС 1—12.

граму (рис. 2, б). Найбільший максимум концентрації тяжіє до осей стиснення, орієнтованих у південно-західному (220°) напрямку, ортогональному простягання Українських Карпат. Менш виразні максимуми належать до субмеридіональних осей стиснення, косих щодо простягання Українських Карпат та осей південно-східних напрямків, паралельних простягання регіону.

Друга ділянка охоплює відслонення 13—23 у верхній течії річок Ріка і Теремля в межах Кросненського, Дуклянського та Поркулецького покривів (рис. 3). Більшість полів напружень (8 визначень) належать до зсувного типу, три визначення репрезен-

тують підкидовий деформаційний режим. Статистичний аналіз орієнтувань осей стиснення в межах другої ділянки демонструє домінування південно-західних азимутів 220° (рис. 3, б), ортогональних простягання Українських Карпат. У меншій кількості поширені субмеридіональні й субширотні орієнтування осей стиснення, що є косими до карпатського простягання, та південно-східні напрямки, паралельні простягання регіону.

Третій домен охоплює відслонення в межах Бориславсько-Покутського та Скибового покривів, ПС 25—29 розташовані у долині р. Бистриця-Надвірнянська, а ПС 44—45 — у долині р. Прут (рис. 4).

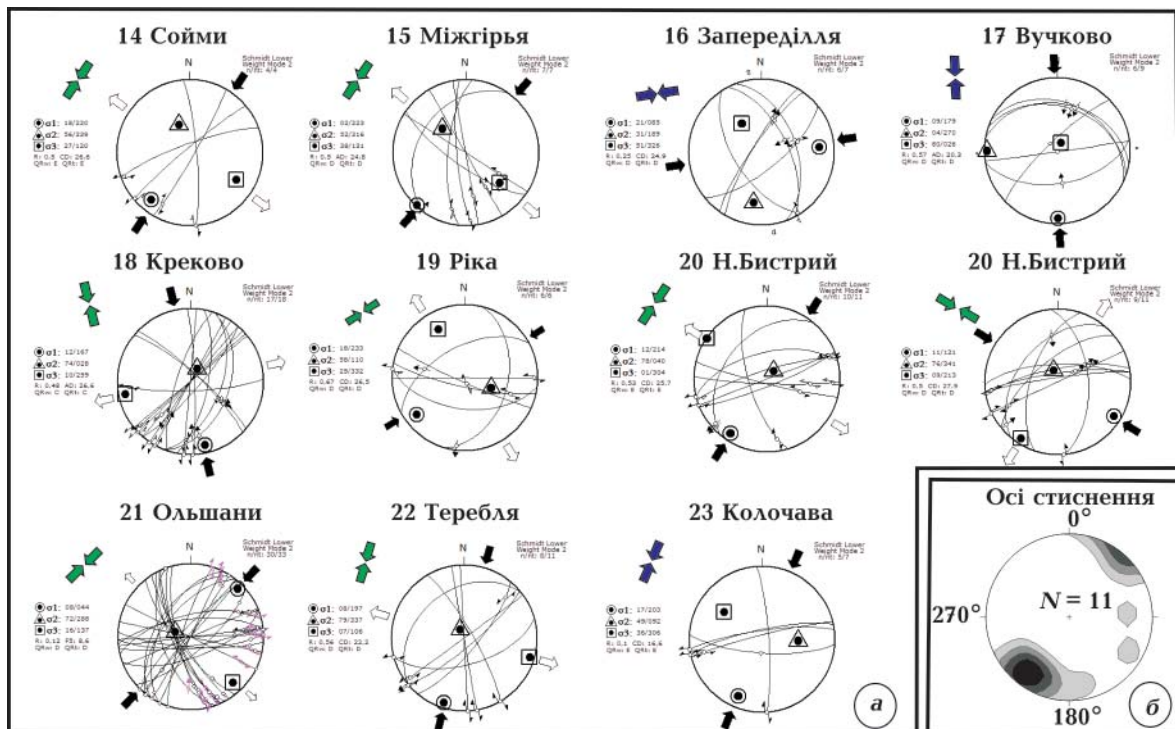


Рис. 3. Поля напруження на пунктах спостережень 14—23.

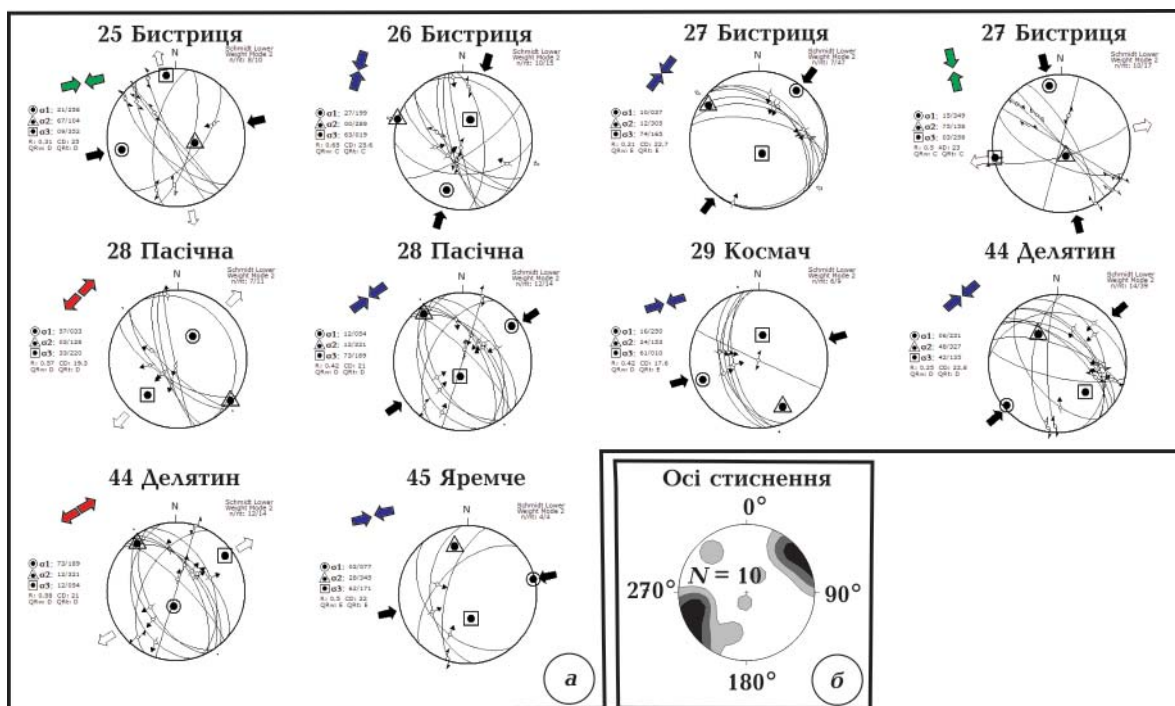


Рис. 4. Поля напруження на пунктах спостережень 25—45.

Серед типів деформаційних режимів переважають підкидові (6 визначень), зсувні та скидові режими (по 2 визначення). Статистичний аналіз орієнтувань

осей стиснення демонструє домінування  $Z\alpha\Pi\Delta Z\alpha$   $260\text{—}220^\circ$  азимутів, ортогональних та косих до простягання Українських Карпат.

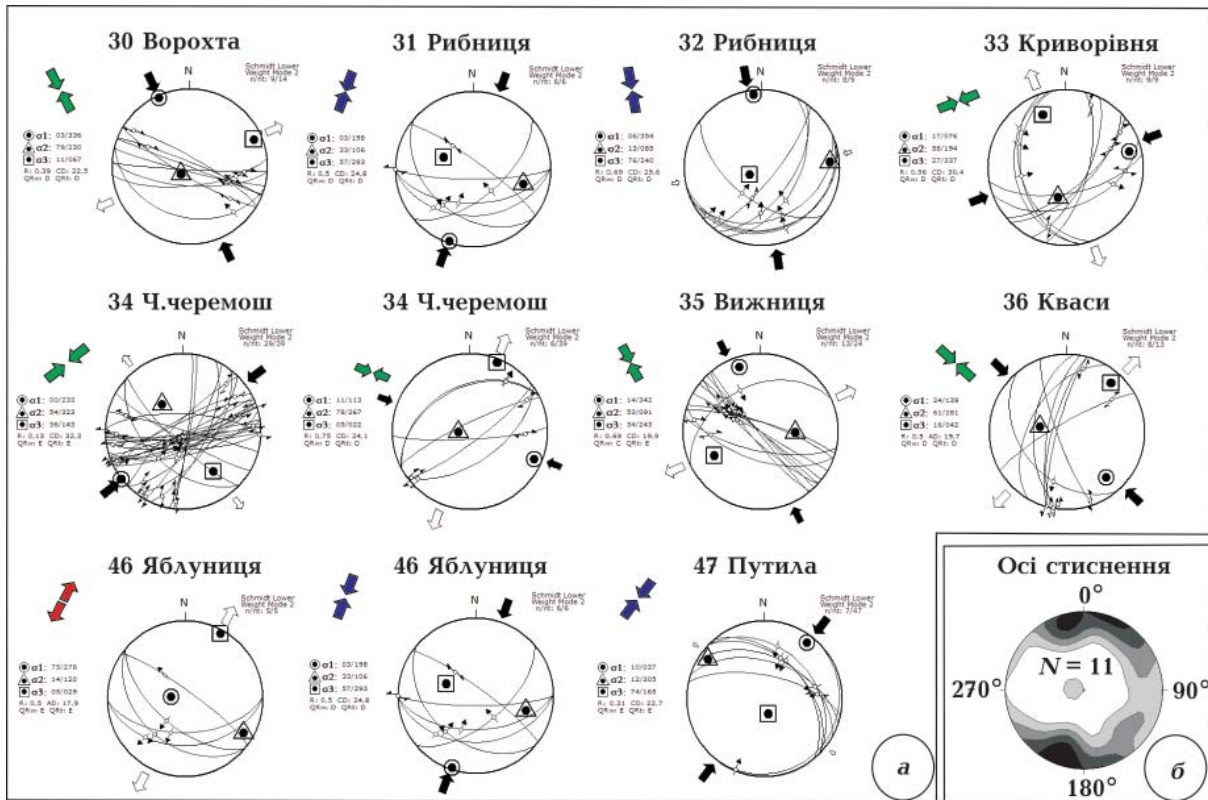


Рис. 5. Поля напруження на пунктах спостережень 30—36 та 42—47.

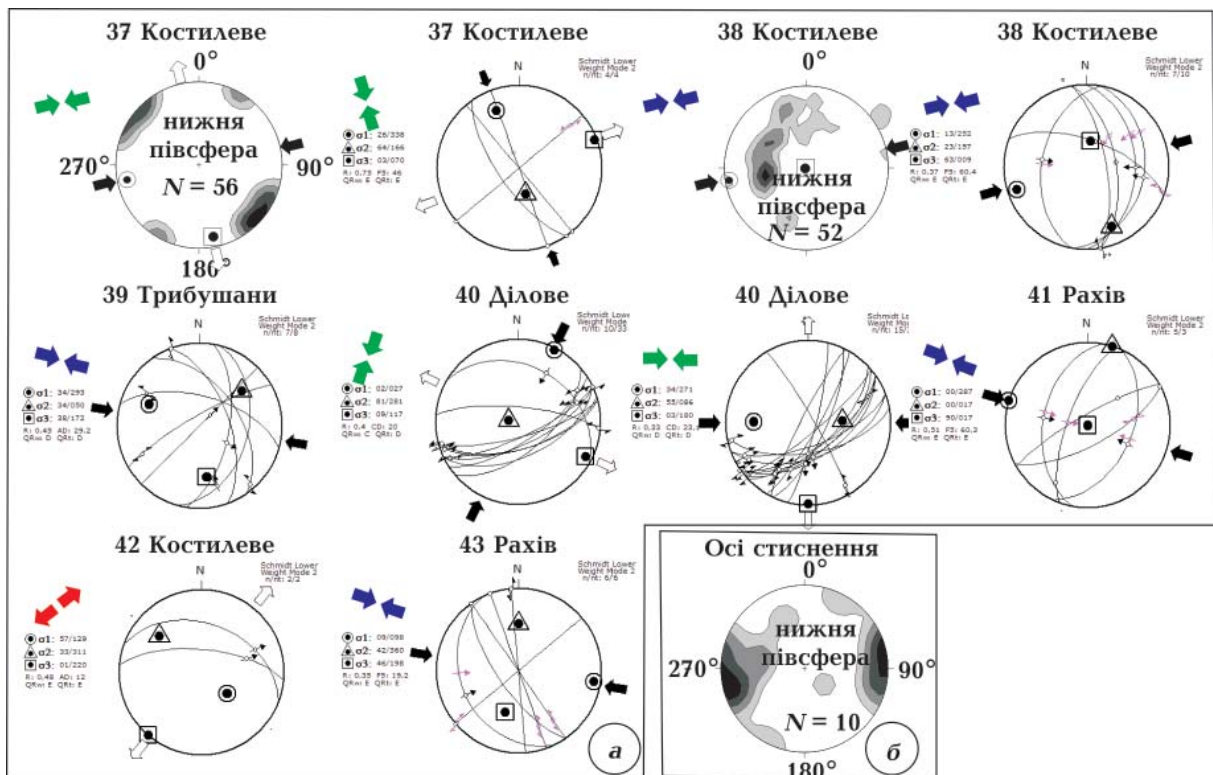


Рис. 6. Поля напруження на пунктах спостережень 37—43 (Рахівський масив).

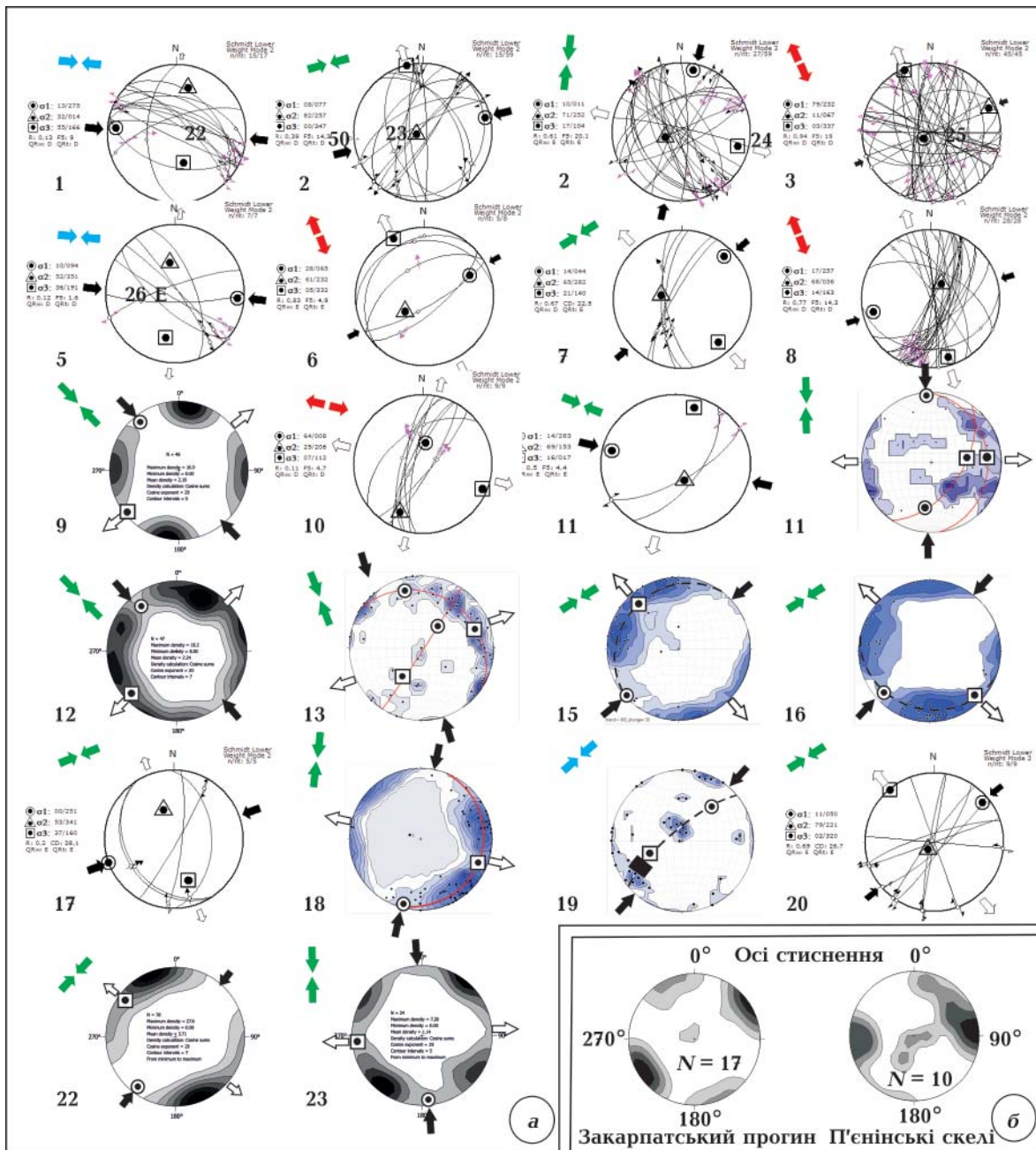


Рис. 7. Поля напруження Закарпатського прогину та зони П'єнінських скель.

Четвертий домен охоплює відслонення 30—36 та 46—47 у межах Бориславо-Покутського, Скибового, Кросненського, Дуклянського, Чорногорського та Поркулецького покривів, що розміщуються у долинах річок Прут, Путила, Чорний Черемош, Білий Черемош, Черемош, Рибиця та Чорна Тиса (див. рис. 1). Серед деформаційних режимів переважають зсувні типи — 6 визначень, до підкидового

режиму належать 4 визначення, а скидочний режим представлений одним визначенням (рис. 5, а). Статистичний аналіз орієнтувань осей стиснення демонструє домінування ПдПдЗх 220°—180° азимутів (рис. 5, б), що є ортогональними та косими до простягання Українських Карпат.

П'ятий домен включає відслонення 37—43 у долинах річок Чорна Тиса і Тиса в межах Мармароського (Рахівського)

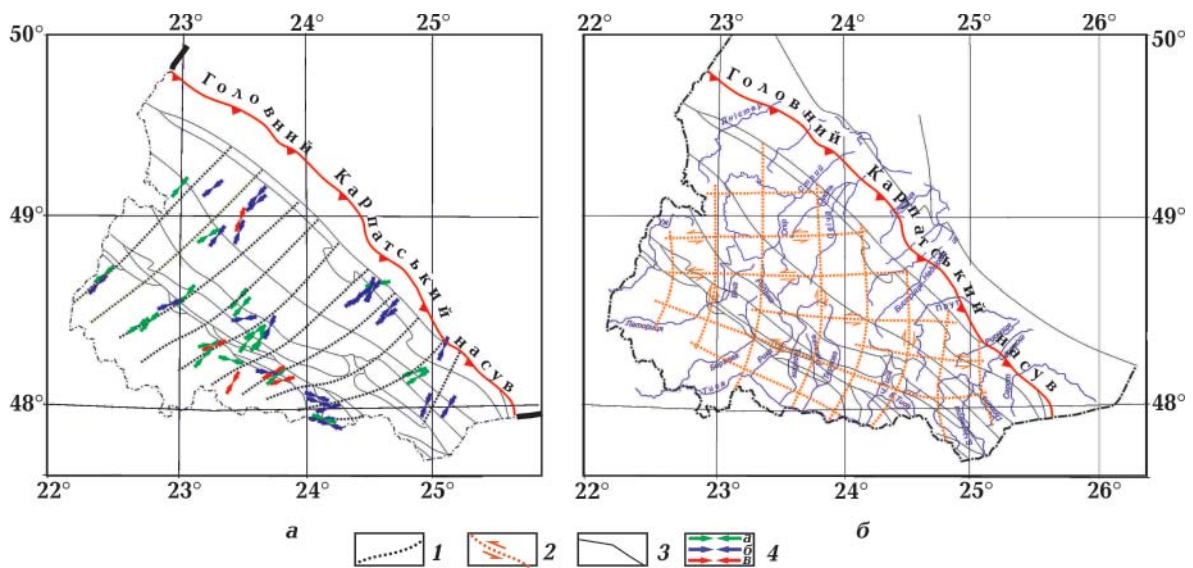


Рис. 8. Орієнтування стисних (а) і дотичних (б) напружень головного поля напружень: 1 — траєкторії стисних напружень; 2 — траєкторії дотичних напружень (стрілки відповідають напрямкам потенційного зсувного переміщення); 3 — межі тектонічних одиниць; 4 — деформаційні режими: а — зсувний, б — підкидовий, в — скидовий.

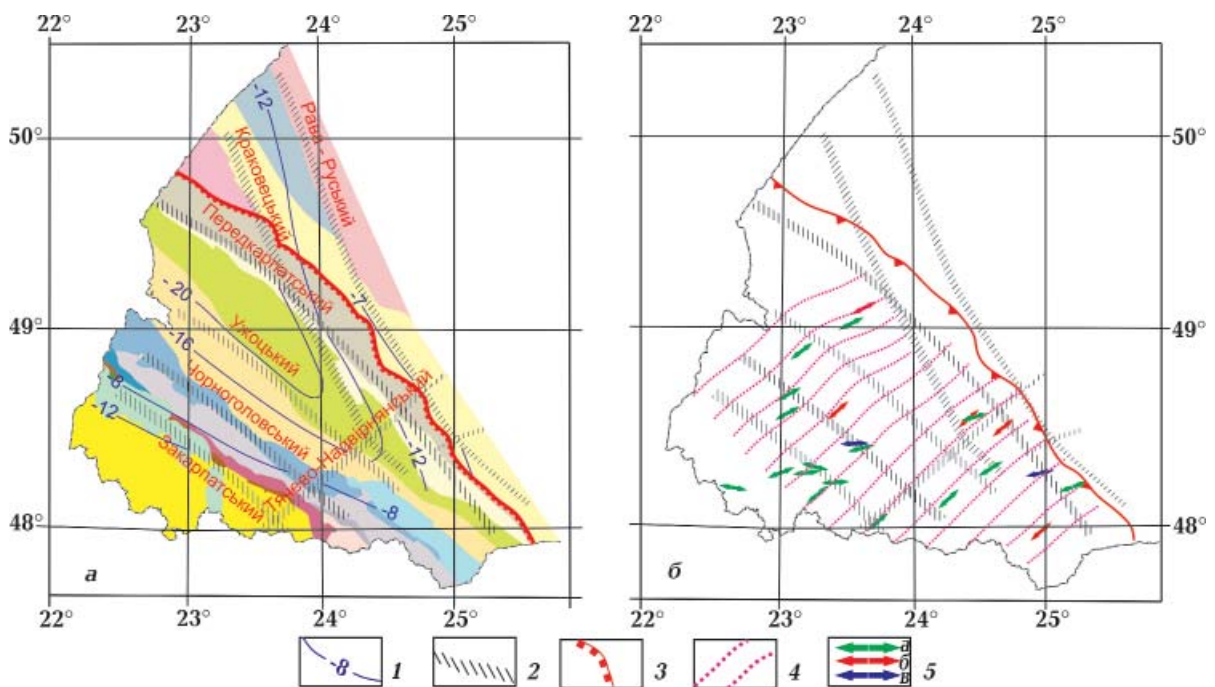


Рис. 9. Порівняння орієнтування скидових розломів фундаменту (а) та орієнтування траєкторій розтягу другого поля напружень (б): 1 — глибина автохтонного фундаменту, км; 2 — скидові розломи фундаменту; 3 — Головний Карпатський насув; 4 — траєкторії розтягу; 5 — напрямок розтягу в межах окремих відслонень і тип деформаційного режиму: а — зсувний, б — скидовий, в — підкидовий.

масиву (рис. 6, а), де домінують ЗхПдЗх  $230^{\circ}$ — $270^{\circ}$  азимуту стиснення та підкидові деформаційні режими. Для зони П'єнінських скель найбільш виражене субширотне та північно-східне ( $0^{\circ}$ — $30^{\circ}$ )

стиснення, а для Закарпатського прогину — ПдЗх  $220^{\circ}$ — $260^{\circ}$  та ПдСх  $140^{\circ}$ — $170^{\circ}$  напрямки осей стиснення (рис. 7). Для всіх доменів на стереограмах, узагальнюючих орієнтування осей стиснення, віді-



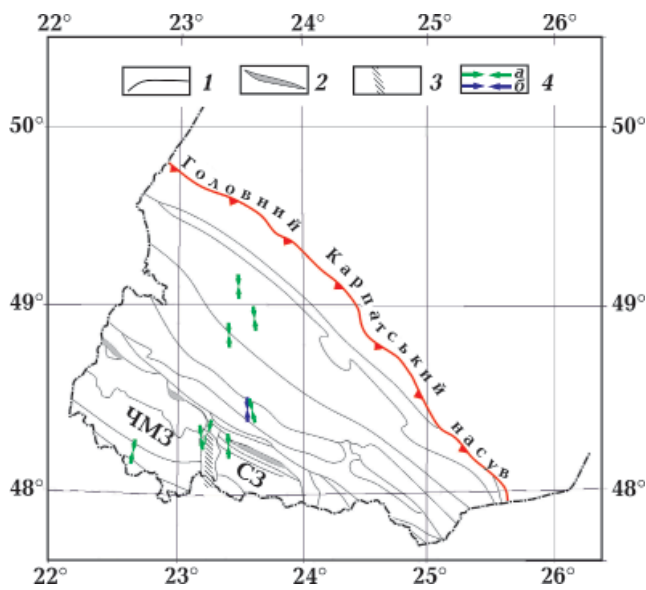


Рис. 10. Поле напруження із субмеридіональною віссю стиснення: 1 — межі тектонічних одиниць; 2 — зона П'єнінських скель; 3 — Оашський розлом; 4 — осі стиснення та деформаційні режими: а — зсувний, б — підкидний; западини: ЧМЗ — Чоп-Мукачівська, СЗ — Солотвинська.

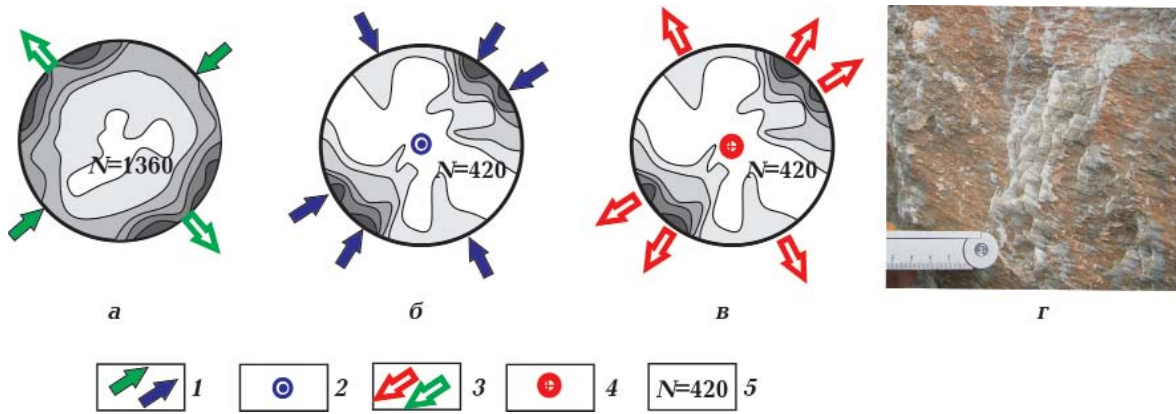


Рис. 11. Реконструкція полів напружень за орієнтуванням тектонічних дзеркал, модифіковано, за [Гінтов, 2005]. Контурні діаграми полюсів тектонічних дзеркал показано на верхній півсфері сітки Вульфа: а — дзеркала з борознами за простяганням; б, в — дзеркала з борознами за падінням; напрямки осей: 1 — горизонтального стиснення; 2 — вертикального розтягу, 3 — горизонтального розтягу, 4 — вертикального стиснення; 5 — кількість тектонічних дзеркал; г — тектонічне дзеркало з борознами за простяганням.

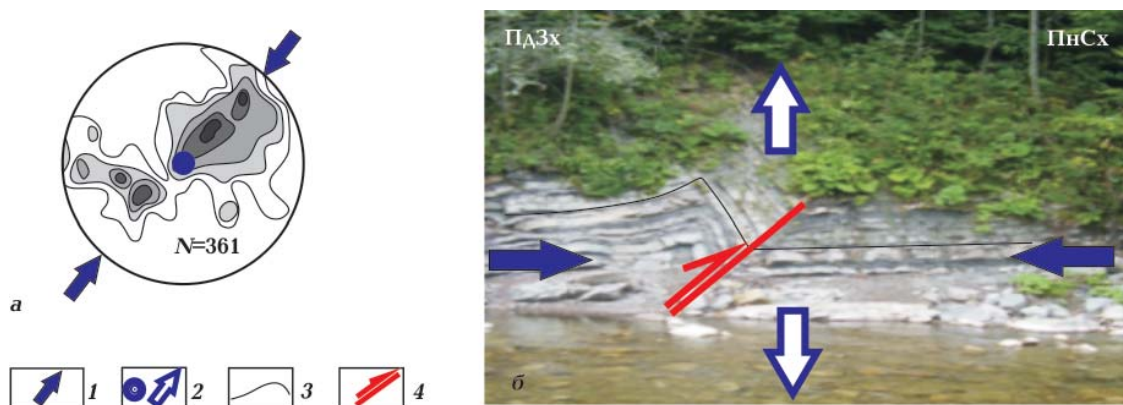


Рис. 12. Аналіз складчастості в межах Українських Карпат: а — падіння поверхонь нашарування та відповідний напрямок стиснення, за [Гінтов, 2005]; б — приклад насуву та принасувної складки в умовах підкидкового деформаційного режиму: 1 — орієнтування горизонтальної осі стиснення; 2 — орієнтування вертикальної осі розтягу; 3 — поверхня нашарування; 4 — насув.

лено один основний максимум, переважно південно-західного або субширотного орієнтування та менш виразні максимуми південно-східного та субмеридіонального напрямків (див. рис. 2, б; 3, б; 4, б; 5, б; 6, б; 7, б). Орієнтування осей стиснення, які належать до основного максимуму, винесено на тектонічну схему в кожному ПС, відповідним кольором позначено тип деформаційного режиму (зелений — зсувний, синій — підкидовий, червоний — скидовий) (рис. 8, а), як і в публікаціях [Bada et al., 2007; Heidbach et al., 2016]. Траєкторії стиснення, дотичні у кожному ПС до орієнтування осей стиснення, ілюструють орієнтування регіонального поля напруження в цілому у напрямку ПдЗх  $220^\circ$ .

У південно-східній частині зони П'єнінських скель і в межах Рахівського масиву домінують субширотні орієнтування осей стиснення. Для головного поля напружень побудовано траєкторії дотичних напружень, що складають кут  $45^\circ$  з траєкторіями стиснення (рис. 8, б). Дотичні напруження мають субмеридіональний і субширотний напрямки й добре узгоджуються з орієнтуванням річкової сітки, що може бути аргументом на користь закладення річкової сітки за системою розломів.

Серед полів напружень, що не увійшли до головних максимумів на стереограмах орієнтувань осей стиснення, виділено поле напружень з південно-східною віссю стиснення та відповідною південно-західною віссю розтягу. Серед деформаційних режимів, на відміну від першого поля, тут переважають зсувні та скидові типи (зелені та червоні стрілки). Цей факт став підставою для винесення горизонтальних осей розтягу (перпендикулярних до осей стиснення) на тектонічну схему з розломами фундаменту скидового типу [Заяц, 2013] (рис. 9).

Осі розтягу виявилися субортогональними до розломів фундаменту, що активізувались, як скиди, в міоценовий та постміоценовий час під вагою алохтону Карпатської споруди.

Третє поле напруження із субмеридіональною віссю стиснення та перева-

жанням зсувних типів характерне для широкої субмеридіональної смуги, яка на півдні збігається з Оашським глибинним розломом, що поділяє Чоп-Мукачівську та Солотвинську западини (рис. 10). Можливо, активізація субмеридіонального Оашського розлому та проникнення вулканітів Вигорлат-Гутинського пасма пов'язані з полем напруження, де вісь стиснення орієнтована субмеридіонально, а вісь розтягу — відповідно субширотно, що підтверджується результатами досліджень [Шевчук, Василенко, 2015].

**Обговорення.** Становить інтерес порівняння нових результатів з даними попередніх досліджень [Аронский и др., 1995; Гинтов, 2005], які охопили всю територію Українських Карпат.

Переважна більшість (1340, або 77 %) вивчених тектонічних дзеркал мають горизонтальні борозни ковзання, що засвідчує суттєве переважання зсувних деформаційних режимів (рис. 11, а) [Аронский и др., 1995; Гинтов, 2005]. Інтерпретація двох спряжених максимумів дає змогу відновити регіональне поле зсувного типу (рис. 11, а). Тектонічні дзеркала з борознами за падінням (420, або 23 %) відповідають двом типам полів напружень — підкидовому (у разі підкидових переміщень) (рис. 11, б) та скидовому (у разі скидових переміщень) (рис. 11, в).

Аналіз положення поверхонь нашарування в 361 пункті Українських Карпат вказує на переважну більшість їхнього простягання в напрямку ПнЗх  $310^\circ$ , який відповідає простягання регіону. Падіння поверхонь нашарування має протилежні напрямки — на південний захід і північний схід (рис. 12, а). Природною моделлю Карпатської насупної споруди може бути принасувна складка з падінням крил у двох протилежних напрямках (рис. 12, б). Насуви і принасувні складки формувалися при тангенціальному стисненні в умовах підкидового деформаційного режиму, що позначено синім кольором стрілок. У роботі [Гинтов и др., 2014] наведено результати польових тектонофізичних спостережень поблизу профілю PANCAKE, де отримано

два масиви тектонофізичних даних: тріщин без видимих слідів переміщення й тектонічних дзеркал з борознами ковзання. Серед 142 визначень орієнтації головних осей нормальних напружень суттєво переважають поля напружень зсувного типу (107 визначень), 19 полів визначено як підкидові, а 16 — віднесено до скидового типу. У групі зсувних полів 28 з них визначено як суто зсуви з віссю стиснення, орієнтованою субперпендикулярно до простягання Українських Карпат. У групі підкидових і скидових полів 25 з них мають осі стиснення і/або розтягу, орієнтовані субперпендикулярно до простягання регіону. Підкидові деформаційні режими відображають процес становлення Карпатського орогена, а група скидових полів — два типи процесів: скидання і обвалення фронтальних частин скиб, що рухаються на північний схід, і розвал орогена на його завершальній стадії розвитку [Гинтов и др., 2014].

За даними тектонофізичних досліджень, палінспастичної реконструкції та фішен-трек аналізу за двома профілями через Українські Карпати [Nakapeliukh et al., 2017, 2018] виділено дві стадії розвитку Карпатського орогена: ранньорогенну і пізньорогенну. На ранньорогенній стадії гороутворення відбувається в основному внаслідок горизонтального скорочення, викликаного тангенціальним стисненням, а складчасто-насувні деформації досягають свого максимуму в умовах підкидового деформаційного режиму. Гірський рельєф першої стадії ще помірний, тому уламковий матеріал, що надходить з гір у результаті їх ерозії в передовий прогин, відносно дрібноуламковий. За рахунок цього матеріалу відкладається спочатку в морських, а потім у лагунних умовах нижня, піщано-глиниста моласа, нерідко за участю пачок вапняків і евапоритів [Глушко, Круглов, 1971; Круглов, Цыпко, 1988; Тектоническая..., 1986]. На пізньорогенній стадії здійснюється складчастої споруди різко прискорюється внаслідок ізостазії [Nakapeliukh et al., 2017, 2018], оскільки кора набуває різко підвищеної потужності за рахунок шарів легких осадових відкладів.

У сучасний період загальна обстановка тангенціального стиснення в Карпатах зберігається, що підтверджується наявністю полів стиснення, за тектонофізичними та сейсмологічними даними [Малицький та ін., 2017, 2018; Муровская и др., 2018], але у верхній частині кори накладається розтягнення під дією гравітаційних сил. Карпатський ороген розчленований зсувами різних напрямків: діагональних (наприклад, Стрийсько-Латорицький розлом [Гнилко, 2017], поздовжніх і поперечних (наприклад, Тячево-Надвірнянський розлом) [Заяць, 2013]. Сучасні складчасто-насувні деформації стиснення тривають на периферії Карпатського орогена та в прилеглих частинах прогинів, що засвідчує сучасна сейсмічність у Закарпатті та Прикарпатті [Малицький та ін., 2017, 2018; Муровская и др., 2018].

**Висновки.** Згідно з результатами тектонофізичних досліджень, визначальну роль у формуванні та розвитку Українських Карпат відігравали тектонічні сили, що діяли у напрямку з ПдЗх  $220^\circ$  на ПнСх  $40^\circ$ . При формуванні крихких тріщин суттєво переважали зсувні деформаційні режими, а при формуванні складчасто-насувної споруди регіону відбувалася пластична деформація в умовах підкидового деформаційного режиму. У південно-східній частині зони П'єнінських скель і в межах Рахівського (Мармароського) масиву орієнтування осей стиснення головного поля напружень змінюється на субширотне, що підтверджується визначенням сучасного поля напружень за механізмами землетрусів і розподілом швидкостей сучасних рухів [Муровская и др., 2018].

Уперше за результатами дослідження поле розтягу південно-західного напрямку було пов'язано зі скидовими розломами фундаменту [Заєць, 2013]. У широкій субмеридіональній полосі виявлено поле напруження із субмеридіональною віссю стиснення та субширотною віссю розтягу, на яке, можливо, вплинула активізація субмеридіонального Оашського розлому та проникнення вулканітів Вигорлат-Гутинського пасма. Виділено дві стадії роз-

витку Карпатського орогена — ранньо- і пізньоорогенну. У сучасний період загальна обстановка тангенціального стиснення

в Карпатах зберігається, але у верхній частині кори накладається розтягнення під дією гравітаційних сил.

### 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). *Геофиз. журн.* 1995. Т. 17. № 6. С. 43—57.
- Бубняк И. Н., Вихоть Ю. М., Накапелюх М. В. Напряженно-деформированное состояние юго-восточной части Скибового и Бориславско-Покутского покровов Украинских Карпат. *Геодинамика и тектонофизика.* 2013. Т. 4. № 3. С. 313—326. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0103>.
- Бубняк І., Накапелюх М. Збалансований розріз відслонення «Тартак» (Скибовий покрив Українських Карпат). *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 3. С. 105—114. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i3.2013.116401>.
- Вихоть Ю. М., Бубняк И. М., Накапелюх М. В. Результаты тектонофизических исследований флишовой толщи Скибового покрыва Украинских Карпат у долины р. Бистрица Надвирнянская. *Геолог. журн.* 2011. № 2. С. 72—80.
- Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применения при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 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. Т. 33. № 5. С. 17—34. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i5.2011.116847>.
- Гинтов О. Б., Бубняк И. Н., Муровская А. В., Вихоть Ю. М., Накапелюх М. В., Шлапинский В. Е. Тектонофизический и палинспастический разрезы Украинских Карпат вдоль геотраверса DOBRE-3 (PANCAKE). *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 3. С. 3—34. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i3.2014.116050>.
- Гинтов О. Б., Бубняк И. Н., Вихоть Ю. М., Муровская А. В., Накапелюх М. В. Напряженно-деформированное состояние и динамика аллохтонной части Предкарпатского прогиба в связи с нефтегазоносностью (по тектонофизическим данным). *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 1. С. 75—87. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i1.2013.116333>.
- Глушко В. В., Круглов С. С. Геологическое строение и горючие ископаемые Украинских Карпат. Москва: Недра, 1971. 389 с.
- Гнилко О. М. Структури латерального витискання в Карпатах. *Геодинаміка.* 2017. № 1(22). С. 16—26. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.018>.
- Заяць Х. Б. Глибинна будова надр Західного регіону України на основі сейсмічних досліджень і напрямки пошукових робіт на нафту і газ. Львів: Центр Європи, 2013. 80 с.
- Круглов С. С., Цыпко А. К. Тектоника Украины. Москва: Недра, 1988. 254 с.
- Малицький Д., Гнип А., Грицай О., Муровська А., Кравець С., Козловський Е. Механізм вогнища і тектонічний контекст землетрусу 29.09.2017 р. поблизу м. Стебник. *Геодинаміка.* 2018. № 1(24). С. 100—107. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.100>.
- Малицький Д. В., Муровська А. В., Обідина О. О., Гнип А. Р., Грицай О. Д., Павлова А. Ю., Пугач А. В. Визначення полів напружень у земній корі за механізмами вогнищ місцевих землетрусів у Закарпатті. *Вісник КНУ. Геологія.* 2017. № 3(78). С. 40—53. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.78.05>.
- Муровская А. В., Малицкий Д. В., Гнип А. Р., Махницкий Н. Р., Мычак С. В., Поляченко Е. Б. Активная тектоника и современное поле напряжений Закарпатского прогиба по механизмам очагов землетрясений. *XVII Міжнар. конф. «Геоінформатика — Теоретичні та прикладні аспекти» 14—17 травня 2018, Київ, Україна.*
- Муровская А. В., Накапелюх М. В., Вихоть Ю. М., Шлапинский В. Е., Бубняк И. Н., Мычак С. В. Кинематическая эволюция зо-

- ны Пьенинских утесов в кайнозой (Украинские Карпаты). *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 5. С. 119—136. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i5.2016.107826>.
- Тектоническая карта Украинских Карпат. 1:2 000 000. Отв. ред. С. С. Круглов. Киев: Изд-во Мингео Украинской ССР, 1986.
- Тектонічна карта України м-бу 1:1 000 000. Ч. 1. Пояснювальна записка. Відп. ред. Д. С. Гурський, С. С. Круглов. Київ: Вид. УкрДГРІ, 2007. 96 с.
- Шевчук В. В., Василенко А. Ю. Тектонофизические условия поздних стадий развития среднего звена Закарпатского глубинного разлома. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 5. С. 121—128. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111151>.
- Bada, G., Horváth, F., Dövényi, P., Szafián, P., Windhoffer, G. & Cloetingh, S. (2007). Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin. *Global and Planetary Change*, 58(1-4), 165—180. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.007>.
- Devlaux, D. & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. New insights into Structural interpretation and Modelling. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 212, 75—100. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>.
- Heidbach, O., Custodio, S., Kingdon, A., Mariucci, M. T., Montone, P., Müller, B., Pierdominici, S., Rajabi, M., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Williams, J., & Ziegler, M. (2016). Stress Map of the Mediterranean and Central Europe 2016. World Stress Map. Potsdam, Germany, GFZ Data Services. doi:10.5880/WSM.Europe2016.
- Nakapelyukh, M., Bubniak, I., Bubniak, A., Jonckheere, R., & Ratschbacher, L. (2018). Cenozoic structural evolution, thermal history, and erosion of the Ukrainian Carpathians fold-thrust belt. *Tectonophysics*, 722, 197—209. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.009>.
- Nakapelyukh, M., Bubniak, I., Yegorova, T., Murovskaya, A., Gintov, O., Shlapinskyi, V., & Vikhot, Yu. (2017). Balanced geological cross-section of the outer Ukrainian Carpathians along the PANCAKE profile. *Journal of Geodynamics*, 108, 13—25. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2017.05.005>.

## Stress fields and deformational regimes within the limits of the Ukrainian part of the East Carpathians according to tectonophysical data

*A. Murovska, T. Amashukeli, V. Alyokhin, 2019*

The studies include the materials of the field tectonophysical observations of 2013—2018 and reinterpreted field data of 1990—1995. In order to determine the stress tensor structural-paragenetic and kinematic tectonophysical methods were used. Application of optimizing procedure, implemented to Vin Tensor program, allowed taking into account sliding fissures without determined kinematic types not involved to previous processing. Determining part in formation and development of Ukrainian Carpathians was played by tectonic forces of southwestern 220° direction. During formation of brittle disruptions shear deformational regimes were essentially prevailing and under conditions of thrust-fault deformational regime flexible deformation took place (folded shear structure of Ukrainian Carpathians was in the process of formation). In the Rakhiv massif and southeastern part of Pyenine rocks zone orientation of axes of regional field of compression changes to sub-latitudinal. The field of extension of southwestern direction has been related for the first time to thrust-faults of the basement. The strain field with sub-longitudinal axis of compression was also renovated. Two stages of the development of the Carpathian orogen were specified: (1) during early orogen stage folded-shear deformations reach their maximum under conditions of thrust deformational regime (2) during late orogen stage rising of the Carpathian structure accelerates as a result of isostasy and its fragmentation takes place by diagonal, transverse and longitudinal shears. Nowadays the conditions of

tangential compression in the Carpathians maintains, that is evidenced by compression fields according to tectonophysical and seismologic data, but in the upper part of the crust stretching under the effects of gravity forces is superimposed.

**Key words:** Ukrainian Carpathians, slickensides, kinematic method, stress field, deformational regime, geodynamics.

## References

- Aronskiy, A. A., Belichenko, P. V., Gintov, O. B., & Murovskaya, A. V. (1995). Kinematic parameters of deformation of the upper horizons of the Earth's crust of the Ukrainian Carpathians in the Miocene-Pleistocene epoch (according to tectonophysical data). *Geofizicheskiy zhurnal*, 17(6), 43—57 (in Russian).
- Bubniak, I. N., Vikhot, Y. M., & Nakapelyukh, M. V. (2013). The stress-and-strain state of the southeastern part of the Skiba and the Borislav-Pokuttya nappes of the Ukrainian Carpathians. *Geodinamika i tektonofizika*, 4(3), 313—326. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0103> (in Russian).
- Bubnyak, I., & Napapelyukh, M. Balanced section of the outcrop «Tartak» (Skibovy cover of the Ukrainian Carpathians). *Geofizicheskiy zhurnal*, 35(3), 105—114. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i3.2013.116401> (in Ukrainian).
- Vikhot, Y. M., Bubniak, I. M., & Nakapelyukh, M. V. (2011). Results of tectonophysical studies of flysch strata of the Skib cover of the Ukrainian Carpathians in the valley of the river Bystritsa Nadvornyanskaya. *Heolohichnyy zhurnal*, (2), 72—80 (in Ukrainian).
- Gintov, O. B. (2005). *Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the earth's crust of Ukraine*. Kiev: Feniks (in Russian).
- Gintov, O. B., Bubnyak, I. N., Vikhot, Yu. M., Murovskaya, A. V., & Nakapelyukh, M. V. (2011). Evolution of the stress-strain state and the dynamics of the Skib cover of the Ukrainian Carpathians. *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(5), 17—34. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i5.2011.116847> (in Russian).
- Gintov, O. B., Bubnyak, I. N., Murovskaya, A. V., Vikhot, Yu. M., Nakapelyukh, V. V., & Shlapinskiy, V. E. (2014). Tectonophysical and Palinspastic Sections of the Ukrainian Carpathians along the DOBRE-3 (PANCAKE). *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(3), 3—34. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i3.2014.116050>.
- Gintov, O. B., Bubnyak, I. N., Vikhot, Yu. M., Murovskaya, A. V., & Nakapelyukh, V. V. (2013). Stress-strain state and dynamics of the allochthonous part of the Precarpathian trough in connection with oil and gas content (according to tectonophysical data). *Geofizicheskiy zhurnal*, 35(1), 75—87. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i1.2013.116333> (in Russian).
- Glushko, V. V., & Kruglov, S. S. (1971). *Geological structure and combustible minerals of the Ukrainian Carpathians*. Moscow: Nedra, 389 p. (in Russian).
- Hnylko, O. M. (2017). Structure of the lateral extrusion in the Carpathians. *Heodynami-ka*, (1), 16—26. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.018> (in Ukrainian).
- Zayets, Kh. B. (2013). *The deep structure of the subsoil of the Western region of Ukraine on the basis of seismic studies and the direction of exploration for oil and gas*. Lviv: Tsentr Evropy, 80 p. (in Ukrainian).
- Kruglov, S. S., & Tsypko, A. K. (1988). *Tectonics of Ukraine*. Moscow: Nedra, 254 p. (in Russian).
- Malytskyi, D. V., Gnyp, A. R., Hrytsai, O. D., Murovska, A., Kravets, S. V., Kozlovskiy, E. M., & Mykyta, A. Yu. (2018). Source mechanism and tectonic setting of 29.09.2017 earthquake near Stebnyk. *Heodynamika*, (1), 100—107. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.100> (in Ukrainian).
- Malytskyi, D. V., Murovska, A. V., Obidina, O. O., Gnyp, A. R., Hrytsai, O. D., Pavlova, A. Yu., & Pugach, A. V. (2017). Determination of stress fields in the crust using focal mechanisms local earthquakes in Transcarpathia. *Visnyk KNU. Heolohiya*, (3), 40—53. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.78.05> (in Ukrainian).
- Murovskaya, A. V., Malitskiy, D. V., Gnyp, A. R., Makhnitskiy, N. R., Mychak, S. V., & Poliachen-

- ko, I. B. (2018). Active tectonics and present-day stresses in Transcarpathian trough from mechanisms of local earthquakes. *XVIIth International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects 12 14—17 May 2018, Kiev* (in Russian).
- Murovskaya, A. V., Nakapelyukh, M. V., Vikhot, Yu. M., Shlapinskiy, V. E., Bubnyak, I. N., Mychak, S. V. (2016). Kinematic evolution of the Pieniny Klippen Belt in Cenozoic (Ukrainian Carpathians). *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(5), 119—136. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i5.2016.107826> (in Russian).
- Kruglov, S. S. (Ed.). (1986). *Tectonic map of the Ukrainian Carpathians. 1:2 000 000*. Kiev: Publ. House Mingeo Ukrainian SSR, (in Russian).
- Gurskiy, D. S., & Kruglov, S. S. (2007). *Tectonic map of Ukraine scale 1:1 000 000. Part 1. Explanatory note*. Kiev: Publishing UkrGGRI, 96 p. (in Ukrainian).
- Shevchuk, V. V., & Vasilenko, A. Yu. (2015). Tectonophysical conditions of late stages of evolution in the middle part of Transcarpathian deep fault. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(5), 121—128. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111151> (in Russian).
- Bada, G., Horváth, F., Dövényi, P., Szafián, P., Windhoffer, G. & Cloetingh, S. (2007). Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin. *Global and Planetary Change*, 58(1-4), 165—180. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.007>.
- Devlaux, D. & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. New insights into Structural interpretation and Modelling. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 212, 75—100. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>.
- Heidbach, O., Custodio, S., Kingdon, A., Mariucci, M. T., Montone, P., Müller, B., Pierdominici, S., Rajabi, M., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Williams, J., & Ziegler, M. (2016). Stress Map of the Mediterranean and Central Europe 2016. World Stress Map. Potsdam, Germany, GFZ Data Services. doi:10.5880/WSM.Europe2016.
- Nakapelyukh, M., Bubniak, I., Bubniak, A., Jonckheere, R., & Ratschbacher, L. (2018). Cenozoic structural evolution, thermal history, and erosion of the Ukrainian Carpathians fold-thrust belt. *Tectonophysics*, 722, 197—209. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.009>.
- Nakapelyukh, M., Bubniak, I., Yegorova, T., Murovskaya, A., Gintov, O., Shlapinskyi, V., & Vikhot, Yu. (2017). Balanced geological cross-section of the outer Ukrainian Carpathians along the PANCAKE profile. *Journal of Geodynamics*, 108, 13—25. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2017.05.005>.