

УДК 539.3:551.24(477.8)

Л.М. ХОМ'ЯК<sup>1</sup>, М.М. ХОМ'ЯК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>\*Кафедра загальної та регіональної геології, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005, тел. +38(032)2397883, ел. пошта ZagGeol@franko.lviv.ua

<sup>2</sup>Кафедра фізики Землі, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005

## МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСАДОВОГО КОМПЛЕКСУ АВТОХТОНУ В ЗОНІ ДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ НАСУВНОГО КЛИНУ

**Мета.** Комп'ютерне моделювання в межах механіки суцільних середовищ є потужним інструментом для отримання якісних та кількісних параметрів деформацій у геологічному середовищі. Мета роботи – дослідження полів напружень і деформацій осадового комплексу автохтону внаслідок переміщення насувного клину. Об'єктом є шарувата товща з різними геометричними та механічними параметрами, обмежена фундаментом палеобасейну та клином насуву, що її стискає, з урахуванням гравітаційних сил і сил тертя на контакті. **Методика.** Побудовано низку двовимірних скінченно-елементних моделей динамічного впливу клину насуву на автохтонну осадову товщу. Вони враховують шарувату будову, різні механічні властивості шарів, передачу тектонічного стиснення через механічний контакт з урахуванням тертя, морфологію поверхні розлому та залежність від швидкості деформування. Розраховано напружено-деформований стан гірських порід перед насувним клином. Для візуалізації використано методику комплексного аналізу інваріантів деформацій та напружень. Подано розподіли еквівалентних деформацій та напружень, усестороннього тиску, максимальних дотичних напружень, траєкторії напружень і лінії ковзання, що їх перетинають під кутом внутрішнього тертя, а також зони вірогідного тріщиноутворення, визначені за критерієм Байерлі. Разом вони є найважливіші для геологічної інтерпретації. **Результати.** Вивчені на моделях поля напружень і деформацій дають підстави стверджувати, що кожне наступне насувне порушення в автохтоні виникало перед фронтальною структурою автохтону та мало первинно дугоподібну поверхню. Розміри насувних структур найбільше залежать від потужності осадової товщі та перешарування компетентних і некомпетентних шарів, меншою мірою – від швидкості насування. **Наукова новизна.** Наведено пояснення морфології, розмірів насувів та закономірностей розподілу полів напружень і деформацій всередині цих структур. **Практична значущість.** Виявлені закономірності механізму становлення насувів важливо враховувати для вирішення дискусійних питань тектонічного районування та структурної еволюції Українських Карпат, інтерпретації геофізичних даних про глибинні частини покривів та їхній параавтохтон, зокрема, у зв'язку з пошуками нафтогазоносних структур.

**Ключові слова:** моделювання насувоутворення; напружено-деформований стан; метод скінченних елементів; Українські Карпати, осадовий комплекс автохтону.

### Вступ

Комп'ютерне моделювання з використанням числових методів розв'язування тектонофізичних задач у межах механіки суцільних середовищ є потужним інструментом для отримання якісних та кількісних параметрів деформацій у геологічному середовищі за певних динамічних умов та первинної структурної організації. Карпатський регіон, зокрема Українські Карпати, маючи тривалу історію геологічних досліджень, залишається об'єктом вивчення щодо ключових питань стратиграфії, тектоніки та геодинамічних умов розвитку [Кульчицький Я., 1997; Крупський Ю.З., 2001; Ступка О.С., 2001; Pospíšil L. and Nemčok M., 2010]. Використання математичних підходів та комп'ютерного моделювання проходить тільки початкові етапи, особливо серед українських геологів. Ця стаття продовжує дослідження авторів [Хом'як Л.М., Хом'як М. М., 2013], де проаналізовано низку скінченно-елементних моделей конвергентної взаємодії Мармароського терейну з фундаментом карпатського палеобасейну, що спричинило формування ранніх насувів Українських Карпат. Подальший розвиток

насувних структур в осадовому комплексі автохтону в загальному можна пояснити, враховуючи сучасну теорію насувного клину та еволюції насувних поясів [Nemčok M., 2005; Couzens-Schultz B.A., Chan A.W., 2010; Simpson G., 2011; Buitter S.J.H., 2012; Dean S.L. et al., 2013]. Вплив насувного клину контролюється балансом гравітаційних сил, гідростатичного тиску води (в підводному положенні), сил тертя на поверхні зриву та субгоризонтальних сил тектонічних рухів. Тому на дотичні напруження, що виникають у комплексі порід автохтону, впливають не тільки сили ваги й порові тиски, але й сили штовхання, що передаються через клин насуву залежно від його геометрії. Разом з тим, завдання кількісно дослідити такі процеси, наприклад, з використанням скінченно-елементних моделей, нашою є на труднощі, пов'язані з багатопараметричністю, часто гіпотетичним характером інформації про початкову будову та фізико-механічні властивості порід тощо. Зокрема, важливими з огляду на утворення розломних порушень, є чинники, що контролюють рівень напружено-деформованого стану в осадовому комплексі авто-

хтону, розміщеного безпосередньо перед клином насуву. Тому такі дослідження актуальні як з теоретичного погляду, так і застосування для обґрунтування розмірів і внутрішньої структури насувів та покривів Українських Карпат, прогнозування глибинної будови, зокрема за зіставленнями з геофізичною інформацією.

Мета роботи – моделювання тектонічного стиснення осадового комплексу автохтону внаслідок переміщення насувного клину. Об'єктом є шарувата осадова товща з різними геометричними та механічними параметрами, обмежена фундаментом палеобасейну та клином насуву, що її стискає, з урахуванням гравітаційних сил і сил тертя на контакті. Як предмет дослідження детально розглядатимемо модельні поля деформацій і напружень та їхню еволюцію в процесі стиснення. Для цього побудовано низку скінченно-елементних моделей динамічного впливу насувного клину на осадову товщу автохтону, для яких розраховано компоненти напружень і деформацій. Після деяких перетворень у межах розробленої методики комплексного аналізу деформацій та напружень [Фурман В.В. та ін., 2007] результати подані візуально для можливості подальшої геологічної інтерпретації.

На запропонованих моделях досліджено механізм, умови та чинники формування насувних структур в осадовому комплексі автохтону за умов переміщення у його бік терейну або покривів попередніх генерацій, які власне і утворюють насувний клин. Під час такої взаємодії через тектонічний контакт вагоме значення для виникнення складчасто-насувних дислокацій можуть мати, зокрема, шарувата структура осадового комплексу, його потужність, форма поверхні передового насуву та швидкість насування.

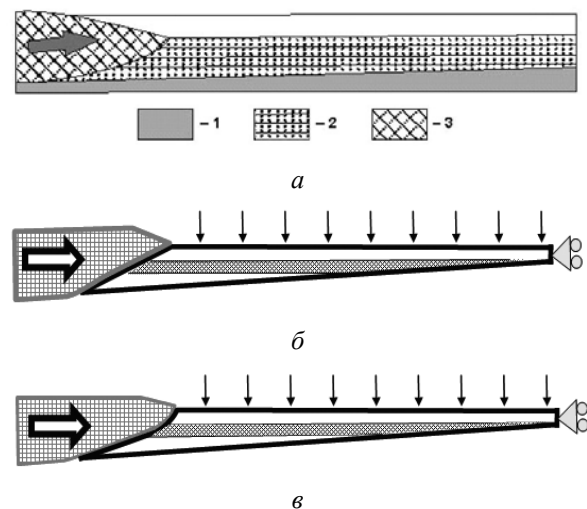
#### Опис моделей та представлення результатів

Теоретичні моделі, що відповідають ситуації стиснення автохтонного осадового комплексу тут розглянуто у двовимірній постановці. Схематичний геологічний розріз (рис. 1 *a*) містить осадовий комплекс автохтону 2, передову групу насувних структур (насувний клин) алохтону 3 та нерухомий фундамент 1. Крайові умови механічної моделі передбачають закріплення (відсутність горизонтальних зміщень) осадового комплексу автохтону на достатній відстані від контактної зони з насувним клином (до 50 км). Осадовий комплекс залягає на слабко похилому фундаменті (до  $1^\circ$ ), що призводить до зменшення потужності від 1,5 до 1,0 км на моделі праворуч. (рис. 1 *б*, *в*).

Умови стиснення реалізуються через кінематичне переміщення клину насуву в бік автохтону (до 1,5 км) у процесі формування акреційної призми Флішових Карпат [Гнилко О.М., 2012]. Деформації алохтону і фундаменту для спрощення на моделі не розглядаються. Між контактними парами враховано тертя ковзання та когезійну міцність на відрив. Також

враховано тиск товщі води (до 2 км) на покрівлю осадового комплексу та літостатичний тиск порід.

В основу комп'ютерного моделювання покладено використання методу скінченних елементів для обчислення пружно-пластичних деформацій у шаруватому середовищі, що має різні фізико-механічні властивості порід (густина  $\rho$ , модуль пружності  $E$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu$ , межа пластичності  $\sigma_T$  і модуль зміцнення  $E_T$ , параметр в'язкості  $\gamma$ ) [Jing L., 2003; Ramsay J.G., Lisle R.G., 2003; Gerya T., 2010; Albertz M., Sanz P.F., 2012; Smart K.J. et al., 2012; Graya G.G. et al., 2014]. Макрошари моделі потужністю  $h$  до перших сотень метрів об'єднують частини розрізу осадової товщі з різним перешаруванням та кількісним співвідношенням пісковиків, алевролітів та аргілітів. Характеристики макрошарів підібрані з довідників та статей близької тематики [Физические, 1988; Wissing et al., 2003; Henk A., Nemčok M., 2008; Simpson G., 2011; Jarosinska M. et al., 2011; Koehn D., Sachau T., 2014], а також шляхом підбору на пробних комп'ютерних моделях, враховуючи можливість реальної інтерпретації числових результатів (табл. 1).



**Рис. 1.** Складові елементи моделей (*a*) та умови навантаження: модель з плоскою (*б*) і дугоподібною поверхнею насування (*в*)

Після розрахунків напружено-деформованого стану для послідовних моментів стиснення (на 0,5, 1,0 і 1,5 км) побудовано розподіл у площині моделі компонентів тензорів деформацій та напружень, зокрема, інваріантів напруженого стану та зон появи сколових тріщин, визначених за критерієм Байерлі [Ребецкий Ю.Л., 2007]. Вірогідний напрям ліній сколювання, які відповідають площинам розривних порушень у просторі, побудовано на моделях під кутом  $32^\circ$  до лінії головних напружень. Цей кут вибрано як усереднене значення кута внутрішнього тертя, який для осадових гірських порід може змінюватися в межах  $25-45^\circ$ , причому для значення  $45^\circ$  матимемо лінії максимальних дотичних напружень.

Таблиця 1

**Геометричні та фізико-механічні властивості комп'ютерних моделей**

Модель	Усереднені характеристики макрошарів у стратиграфічній послідовності		
	Потужність $h$ , м	пружність	пластичність
	густина $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$E$ , ГПа / $\nu$	$\sigma_T / E_T$ , ГПа
M-3.1	0,5 / 2,2	30 / 0,15	0,1 / 3
	0,5 / 2,2	30 / 0,15	0,1 / 3
	0,5 / 2,2	30 / 0,15	0,1 / 3
M-3.2	0,5 / 2,2	15 / 0,1	0,05 / 1,5
	0,5 / 2,3	20 / 0,1	0,075 / 2
M-3.3	0,5 / 2,4	15 / 0,1	0,06 / 1,5
	0,25 / 2,3	20 / 0,1	0,075 / 1
	0,25 / 2,3	10 / 0,1	0,075 / 1
	0,25 / 2,3	15 / 0,1	0,075 / 1,5
	0,25 / 2,3	20 / 0,1	0,075 / 1,5
	0,25 / 2,3	15 / 0,1	0,1 / 1,5
	0,25 / 2,3	15 / 0,1	0,1 / 1,5
M-3.4	0,25 / 2,1	10 / 0,1	0,05 / 1
	0,25 / 2,4	20 / 0,1	0,06 / 1
	0,25 / 2,1	10 / 0,1	0,05 / 1
	0,25 / 2,4	20 / 0,1	0,06 / 1
	0,25 / 2,2	20 / 0,1	0,075 / 1,5
	0,25 / 2,5	25 / 0,1	0,1 / 2
	0,25 / 2,2	20 / 0,1	0,075 / 1,5
	0,25 / 2,5	25 / 0,1	0,1 / 2
	0,25 / 2,5	20 / 0,1	0,075 / 1,5
	0,25 / 2,3	15 / 0,1	0,075 / 1
	0,25 / 2,5	20 / 0,1	0,075 / 1,5
M-4.1	0,6 / 2,2	15 / 0,1	0,075 / 1,5
	0,5 / 2,2	30 / 0,1	0,1 / 3
	0,5 / 2,2	15 / 0,1	0,1 / 1
	0,5 / 2,2	20 / 0,1	0,1 / 1
M-4.2	0,4 / 2,3	20 / 0,1	0,075 / 1
	0,375 / 2,2	15 / 0,1	0,075 / 1
	0,25 / 2,3	20 / 0,1	0,075 / 1
	0,25 / 2,5	30 / 0,1	0,075 / 1
	0,5 / 2,4	25 / 0,1	0,075 / 1
	0,375 / 2,5	30 / 0,1	0,075 / 1
	0,4 / 2,4	25 / 0,1	0,075 / 1
	< 0,1 / 2,3	15 / 0,1	0,075 / 1
M-5.1	0,125 / 2,1	10 / 0,1	0,05 / 1
	0,125 / 2,4	20 / 0,1	0,06 / 1
	0,125 / 2,1	10 / 0,1	0,05 / 1
	0,125 / 2,4	20 / 0,1	0,06 / 1
	0,125 / 2,2	20 / 0,1	0,075 / 1,5
	0,125 / 2,5	25 / 0,1	0,1 / 2
	0,125 / 2,2	20 / 0,1	0,075 / 1,5
	0,125 / 2,5	25 / 0,1	0,1 / 2
	0,125 / 2,5	20 / 0,1	0,075 / 1,5
	0,125 / 2,3	15 / 0,1	0,075 / 1
	0,125 / 2,5	20 / 0,1	0,075 / 1,5
M-6.1	0,5 / 2,2	15 / 0,1	0,05 / 1,5
	0,5 / 2,3	20 / 0,1	0,075 / 2
M-6.3	0,5 / 2,4	15 / 0,1	0,06 / 1,5

Відповідно до вказаних у вступі чинників побудовано декілька серій моделей з метою вивчення: а) шаруватості будови осадового комплексу автохтону (M-3.1, ..., M-3.4); б) потужності автохтону (M-4.1, M-4.2); в) морфології поверхні передового насуну (M-5.1); г) швидкості насунання алохтону (M-6.1, ..., M-6.3).

Наведені нижче рисунки ілюструють такі результати: еквівалентні деформації  $\epsilon_{eqv}$  та напруження  $\sigma_{eqv}$ , усесторонні тиски  $p$  і максимальні дотичні напруження  $\tau_{max}$ , траєкторії ліній сколювання (slide lines) та зони крихких деформацій, де  $\Delta\tau = \tau_{max} - \tau_k > 0$ ,  $\tau_k$  – напруження тріщиноутворення. Шкали рівнів для цих величин зображено тільки на рис. 2 для моделі M-3.1, а для інших моделей вони ідентичні, що зручно для порівняння.

**Вплив шаруватості комплексу автохтону**

На вихідній моделі M-3.1 задано усереднені фізико-механічні параметри для всього розрізу осадового комплексу автохтону, що залягає на похилому фундаменті, без урахування шаруватості (див. табл. 1). Наступні моделі M-3.2, M-3.3 і M-3.4 розбито на 3, 6 і 12 макрошарів, що відповідають різним за літологічним складом та будовою пачкам розрізу. Між макрошарами задано ідеальний контакт, а на нижній межі осадового комплексу та його контакті з насунним клином – умови тертя-ковзання (коефіцієнт тертя  $\mu = 0,6$ ). Стиснення осадового комплексу зумовлює переміщення у його бік структур алохтону, що утворюють насунний клин.

На всіх моделях цієї серії напруження та деформації локалізовані у тектонічно стиснутій частині автохтону, а їхній розподіл по розрізу підпорядкований фізико-механічним властивостям макрошарів. Найбільші еквівалентні напруження  $\sigma_{eqv}$  властиві моделі M-3.1 ізотропної осадової товщі (рис. 2). За стиснення на 0,5 км вони вже перевищували 300 МПа, тоді як на багатошарових моделях сягали 250 МПа (рис. 3 – 5). В ізотропній товщі максимальні напруження утворювали діагональну область, яка з-під насуну тягнулася вниз до підстильного фундаменту, збільшуючись у ширині. За стиснення понад 1 км симетрично до неї виникла друга діагональна область максимальних напружень, близька за орієнтуванням до лінії насуну. На ізотропній моделі величина еквівалентних напружень другої області збільшувалася швидше, а їхнє градієнтне поле охоплювало більший об'єм осадового комплексу, порівняно з іншими випадками.

На багатошарових моделях положення та розміри області еквівалентних напружень  $\sigma_{eqv}$  майже не залежали від кількості макрошарів. Найбільші значення  $\sigma_{eqv}$  приурочені до компетентних макрошарів, у яких вони утворювали підобласті лінзоподібної форми. Зі збільшенням стиснення така підобласть активно розширялася у межах одного компетентного макрошару, а також виникали ділянки напружень подібної форми у макрошарах меншої жорсткості.

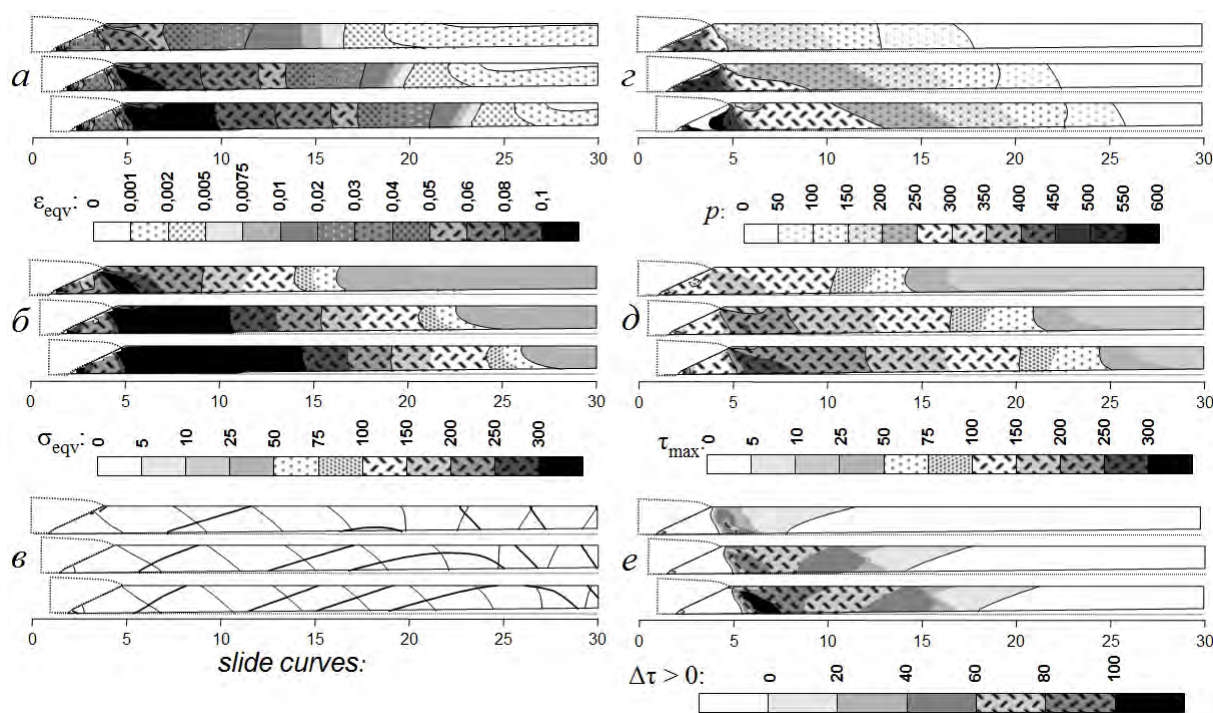


Рис. 2. Модель М-3.1

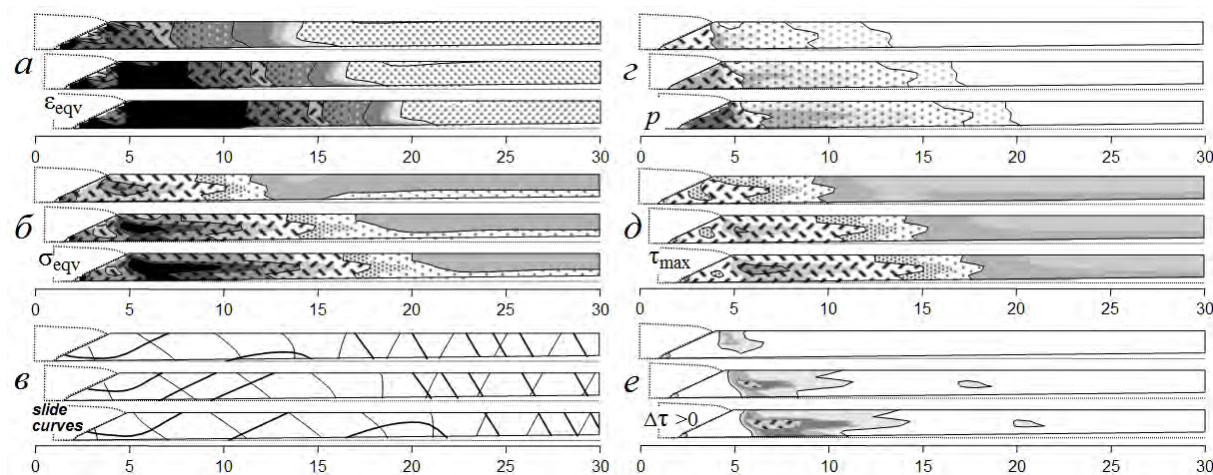


Рис. 3. Модель М-3.2

Протилежну тенденцію розвитку мали деформації  $\epsilon_{eqv}$ . Порівняно інтенсивніше вони зростали на моделі М-3.4 з 12 макрошарами й найповільніше – на ізотропній моделі М-3.1. За стиснення на 0,5 км величина деформацій  $\epsilon_{eqv}$  досягала на цих моделях відповідно 10 і 8 %. В осадовому комплексі область максимальних деформацій  $\epsilon_{eqv}$  набувала видовженої форми й діагонального положення. Зі збільшенням стиснення до 1,5 км виникала друга діагональна область максимальних деформацій, орієнтована субпаралельно до лінії насуву. В процесі подальшого стиснення вона розширялася вздовж осадового комплексу, а її передова межа слабко пов'язана з літологічним складом порід.

На усіх моделях цієї серії лінії сколювання у піднасувній частині мають форму вигнутих дуг і в межах області великих напружень розташовані діагонально до осадового комплексу та первинної шаруватості, а в зоні переходу до метастабільного стану описують асиметричні аркоподібні лінії.

Усесторонній тиск  $p$  дещо інтенсивніше збільшувався на ізотропній моделі. За стиснення до 1 км найбільші його значення були в піднасувній частині ізотропної товщі. За подальшого стиснення тиск  $p$  під насувом різко зменшувався, а далі уздовж осадового комплексу виникало його градієнтне поле. Подібні значення та еволюцію всестороннього тиску зафіксовано й на шестишаровій моделі М-3.3. На три- і дванадцятишарових моделях (М-3.2 і М-3.4) він локалі-

зувався переважно у піднасувній частині автохтону й мав меншу величину (до 400 МПа за стиснення на 1 км). Відмінності у величині й розподілі  $p$  на багат шарових моделях зумовлені різним співвідношенням компетентних і некомпетентних порід у розрізі. Компетентні шари та пачки розрізу (пісковики, груборитмічний піщаний фліш) зазнають більшого всестороннього стиснення.

Поле значень  $\tau_{\max}$  у комплексі автохтону має розподіл, подібний до поля  $\sigma_{\text{eqv}}$ . Порівняно більші значення та більше поширення  $\tau_{\max}$  мають

на ізотропній моделі М-3.1. На багат шарових моделях найбільші значення дотичних напружень приурочені до компетентних макрошарів. Критичну міцність порід  $\tau_k$  дотичні напруження перевищують пізніше, ніж на нешаруватій моделі автохтону. Зона руйнування збігається з осовою частиною областей максимальних еквівалентних напружень. На багат шарових моделях чітко простежується її зв'язок із компетентними макрошарами розрізу. Параметр Лоде-Надаї тут близький до нуля, що відповідає умовам утворення насувних порушень.

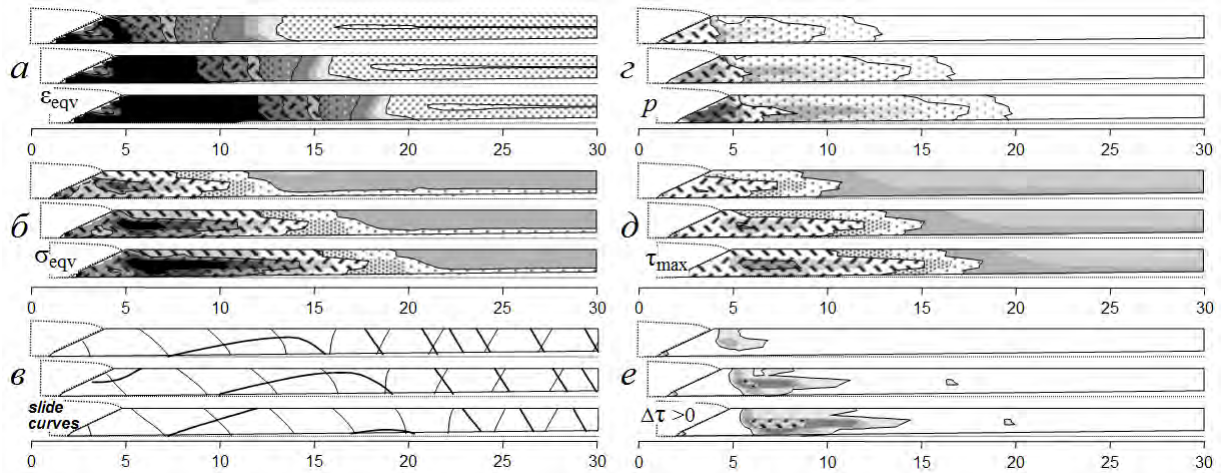


Рис. 4. Модель М-3.3

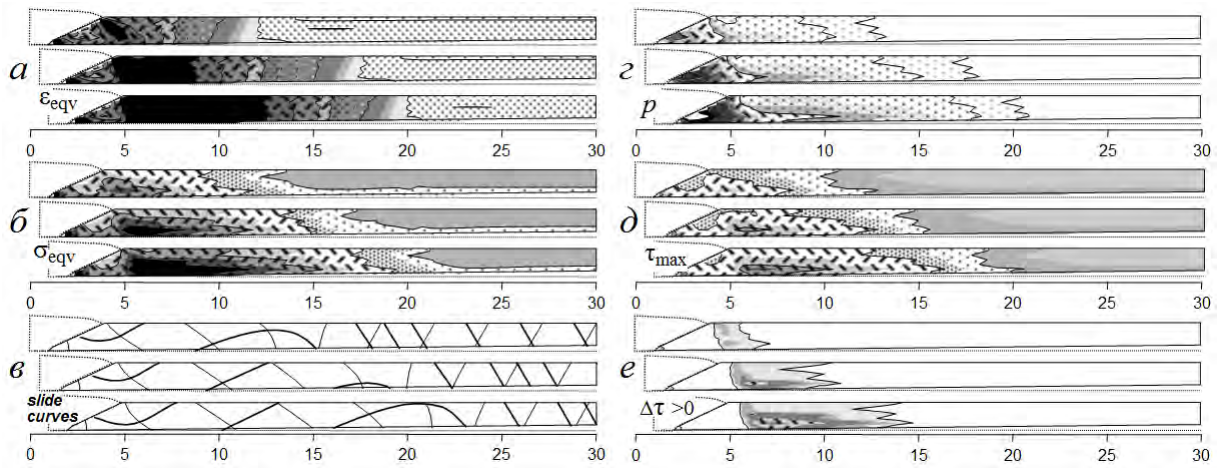


Рис. 5. Модель М-3.4

Отже, шарувата будова осадового комплексу автохтону та чергування у його розрізі пачок різного типу перешарування не змінює положення області максимальних еквівалентних та дотичних напружень, проте зумовлює величину та характер деформацій. Незалежно від будови розрізу найбільші напруження та деформації локалізовані у переднасувній частині автохтону, де і виникне чергове насувне порушення. Порівняно менші значення еквівалентних напружень на багат шарових моделях супроводжуються більшими деформаціями.

Система тріщин, по якій можливе утворення магистрального насувного порушення, виникає передусім у компетентних макрошарах. Підтвердженням цього є доволі поширені дуплекси у окремих шарах пісковиків, які мають порівняно більшу потужність (наприклад, серед тонкоритмічного перешарування). До моменту утворення наскрізного насуву переважають пластичні деформації, виражені асиметричними складчастими структурами, положення осових поверхонь яких близькі до поверхні максимальних дотичних напружень.

### Вплив потужності розрізу автохтону

Одним із параметрів осадового комплексу, що змінювався упродовж розвитку палеобасейну, була його потужність. Вплив цього чинника на еволюцію поля напружень та деформацій в автохтоні вивчено на серії багат шарових моделей, що за особливостями будови розрізу відповідають окремим насувам Зовнішніх Карпат (див. табл. 1). Модель М-3.2 осадового комплексу потужністю 1,5 км має три макрошари та за особливостями будови розрізу відповідає ранньокрейдовим насувам (Рахівський покрив), які складені переважно середньо-тонкоритмічним флішом. Більшу потужність (до 2,1 км) має чотиришарова модель осадової товщі М-4.1, макрошари якої літологічно тотожні окремим ланкам розрізу Красношорського і Боржавського субпокривів [Геологическое, 1971]. Максимальну потужність автохтону (2,65 км) задано на моделі М-4.2 з восьми макрошарів, які корелюють з елементами розрізу Скибового покриву.

Величина деформацій  $\epsilon_{eqv}$  на моделях цієї серії мало залежала від потужності осадового комплексу. Від передового насуву деформації поширювалися вздовж макрошарів єдиним фронтом, незалежним від їхніх фізико-механічних властивостей. Виявлено тенденцію до збільшення за розмірами області максимальних деформацій на моделях більшої потужності за умов однакової величини стиснення.

Незалежно від потужності та будови осадового комплексу автохтону напруження  $\sigma_{eqv}$  і деформації  $\epsilon_{eqv}$  локалізовані лише у його переднасувній частині. Об'єм товщі, охопленої тектонічним стисненням, збільшується відповідно до збільшення потужності розрізу. За стиснення до 500 м тектонічні напруження поширюються вздовж товщі на 10–12 км для моделі з мінімальною потужністю М-3.2 (див. рис. 3), на 15–16 км – для моделі середньої потужності М-4.1 і на 17–20 км – для моделі М-4.2 максимальної потужності (рис. 6, 7). Подібну тенденцію до збільшення мають значення  $\tau_{max}$  і тисків  $p$ . Однак істотно впливає також будова розрізу: за того ж стиснення на моделі М-3.2 значення еквівалентних напружень сягає величини 50–75 МПа, на моделі М-4.1 – 100–150 і на моделі М-4.2 – 75–100 МПа. Напруження в переднасувній частині автохтону інтенсивніше збільшуються в компетентних пачках розрізу, вздовж яких поширені на значно більшу відстань. Особливо чітко це виражено на моделі М-4.1, де третій знизу макрошар відповідає пачкам товстощаруватих і масивних пісковиків. Якщо компетентні пачки співвимірні за потужністю з іншими та не різко відрізняються за співвідношенням фізико-механічних властивостей між компетентними й некомпетентними породами, то чітко вираженого зв'язку напружень з літологією не буде (наприклад, модель М-4.2).

Усесторонній тиск  $p$  найбільші значення має в піднасувній частині автохтону. Вздовж осадового комплексу він поширюється найдалі, переважно, у нижніх макрошарах. Проте на моделі М-4.1 і, меншою мірою, на моделі М-3.2 виражений його зв'язок з компетентними макрошарами. Значення  $p$  збільшується також зі збільшенням потужності автохтону.

Розподіл максимальних дотичних напружень  $\tau_{max}$  та їхня зміна в часі аналогічні еволюції поля еквівалентних напружень  $\sigma_{eqv}$ , але відрізняються за значеннями. Виявлено також зменшення їхньої величини зі збільшенням потужності осадового комплексу. Так, на моделі М-3.2 і М-4.1 за стиснення на 1 км  $\tau_{max}$  сягали 200 МПа, а на моделі М-4.2 – не перевищували 150 МПа. Напруження  $\tau_{max}$  мали найбільші значення та поширення вздовж осадового комплексу на моделях М-3.2 і М-4.1 у компетентних пачках розрізу. Відповідно на цих же моделях раніше виникали зони ймовірного розвитку крихких деформацій, де  $\Delta\tau > 0$ .

На моделях різної потужності автохтону спостерігаємо однакове орієнтування ліній сколювання, що пов'язані з напрямками  $\tau_{max}$ . У піднасувній частині осадової товщі вони описують вигнуті дуги, що із субпаралельного до шаруватості положення у низах розрізу змінювалися діагональним у середньому та верхньому його інтервалах. Разом з тим, області найбільших значень напружень та деформацій мають діагональне положення щодо осадового комплексу, а за стиснення понад 1 км виникає симетрична область, орієнтування якої близьке до поверхні фронтального насуву. Положення цієї області змінюється залежно від потужності автохтону. На моделі найменшої потужності осадового комплексу за стиснення на 1 км вона віддалена від фронтального насуву на 4 км, на моделі середньої потужності – на 5 км і на моделі найбільшої потужності – на 6–7 км. За подальшого переміщення насувного клину у цій області відбувається збільшення напружень та деформацій, а тому вона визначатиме положення наступного насувного порушення, що вказує на закономірний зв'язок потужності автохтону з шириною насувних структур.

Отже, потужність осадового комплексу визначає поперечні розміри насувів: чим більша потужність товщі – тим ширшим буде насувне тіло. У випадку великої потужності автохтону дещо нівелюється значення пачок товстощаруватих і масивних пісковиків. За наявності у розрізі поодиноких пачок компетентних порід насувне порушення формується спершу в цьому макрошарі, а потім поширюється в нижні та верхні макрошари. Якщо ж потужна осадова товща має дві–три такі пачки, то насув розвиватиметься від горизонту зриву до верхів розрізу.

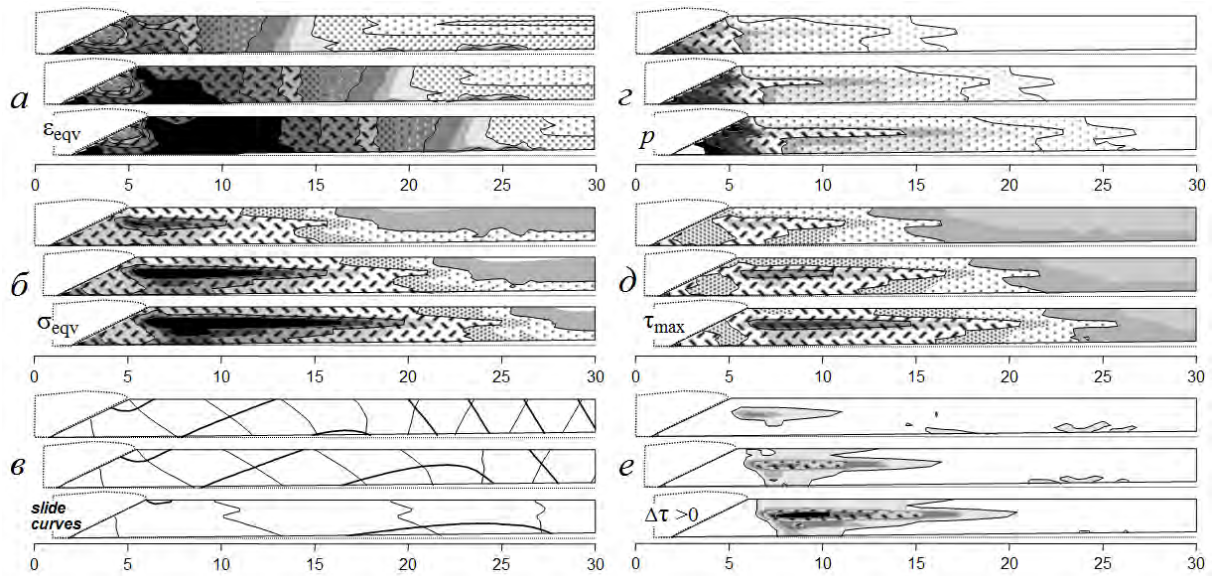


Рис. 6. Модель М-4.1

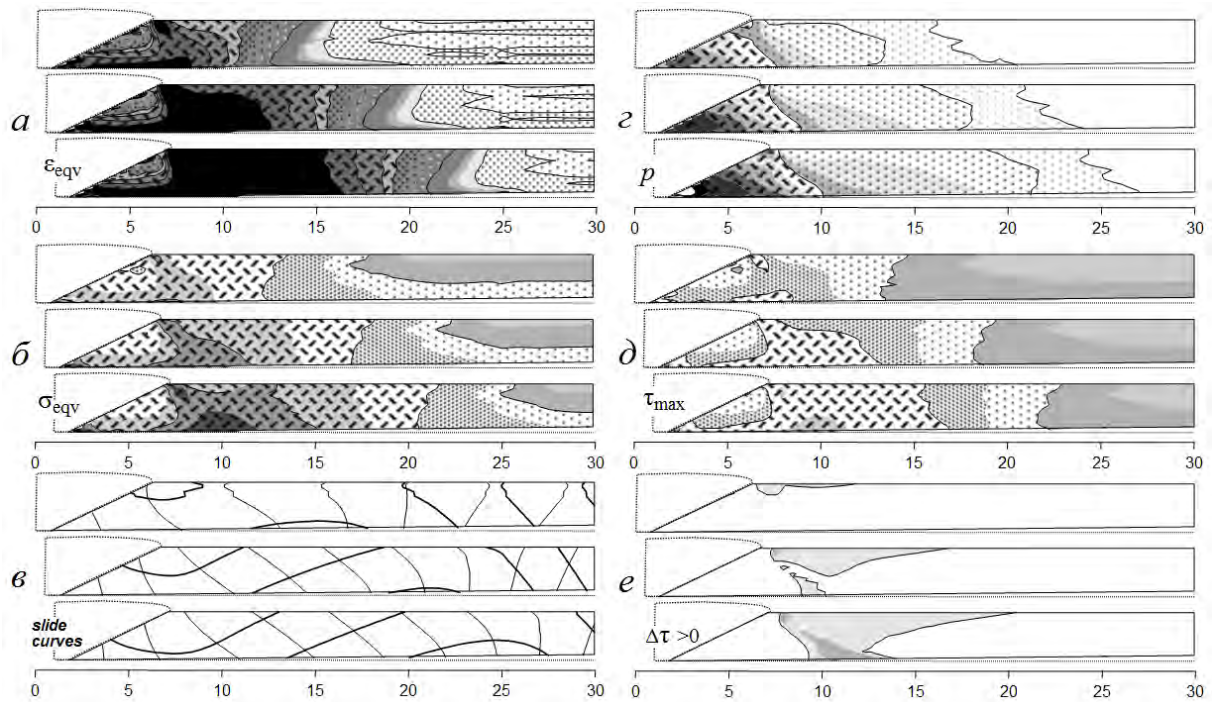


Рис. 7. Модель М-4.2

**Вплив форми поверхні передового насуву**

У процесі аналізу полів напружень та деформацій на попередніх моделях виявлено подібну форму ліній сколювання. Незалежно від інших чинників у тектонічно стиснутій зоні вони описували ввігнуті дуги, які виположуються в нижній частині розрізу. Враховуючи таке орієнтування ліній сколювання, а також інших інваріантів напружено-деформованого стану на моделях попередніх серій, доцільно дослідити модель М-5.1 з дугоподібною поверхнею передового насуву. До того ж саме така форма поверхонь покривів у сучасній структурі Карпат обґрунтована буровими та геофізичними роботами

[Изучение, 1990]. Для порівняння та аналізу використано подібну модель (М-3.2) з плоскою поверхнею насувного клину.

На моделі М-5.1 найбільші еквівалентні напруження та деформації також зосереджені у переднасувній частині автохтону (рис. 8). Проте наявні відмінності в розподілі їхньої величини в осадовому комплексі. На моделі М-5.1 напруження збільшуються інтенсивніше. За стиснення на 500 м еквівалентні напруження  $\sigma_{eqv}$  сягають 250 МПа, у той час як для прямолинійного насуву не перевищують 200 МПа.

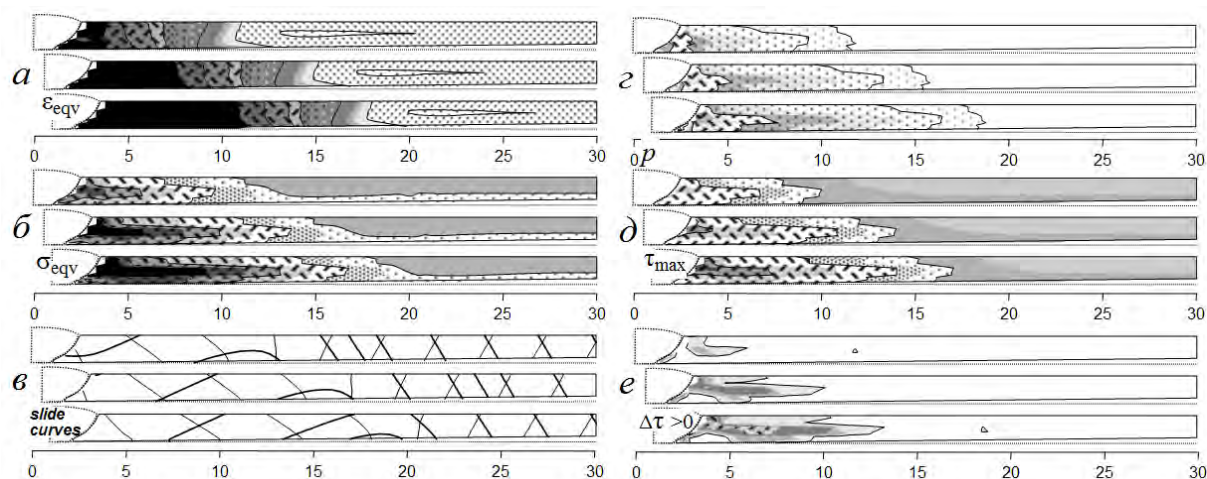


Рис. 8. Модель М-5.1

Крім того, у піднасувній частині осадового комплексу область менших значень  $\sigma_{eqv}$  (тектонічна тінь) не виникає, а спостерігається неоднорідне високоградієнтне поле, що поширюється вздовж автохтону. За подальшого стиснення переорієнтація зони найбільших  $\sigma_{eqv}$  на цій моделі не відбувається, натомість вона розташована субпаралельно до поверхні передового насуву на віддалі до 500–1000 м. Це значно менше порівняно з моделю М-3.2, де ця відстань становила майже 5 км.

На моделі М-5.1 еквівалентні деформації  $\epsilon_{eqv}$  також інтенсивніше збільшувалися на початку стиснення та рівномірніше розподілені по розрізу.

Дугоподібна поверхня передового насуву принципово не змінює орієнтацію вірогідних ліній сколювання. Лише для піднасувної частини виражені незначні відмінності, внаслідок чого субгоризонтальна частина поверхонь сколювання майже відсутня за незначного стиснення (до 1 км), а за більшого стиснення – ці поверхні значно коротші.

Деяко відмінним є розвиток усесторонніх тисків  $p$  та максимальних дотичних напружень  $\tau_{max}$ . Для всесторонніх тисків властиве швидке збільшення величини за стиснення у перші сотні метрів та відносно повільніше надалі. Напруження  $\tau_{max}$  збільшуються інтенсивніше, формуючи чітко виражену зону максимальних значень аналогічно до відповідної зони  $\sigma_{eqv}$ . Формування магістрального розривного порушення можна очікувати (як і на моделі М-3.2) за величини стиснення до 300–500 м. До цього часу можливі складчасті деформації та збільшення тектонічної тріщинуватості порід.

Отже, поверхня магістрального насувного порушення має первинно дугоподібну форму. Лише за такої морфології фронтальної частини насувного клину положення чергового насувного порушення та розміри новоутвореної луски відповідають природним аналогам. Насувне порушення перетинає шаруватий комплекс

автохтону діагонально під кутом 35–37°. Стрімке положення тектонічної поверхні у фронтальній частині насувного тіла зумовлене значно меншим навантаженням на покрівлю осадового комплексу. У випадку дугоподібної поверхні передового насуву в автохтоні інтенсивніше збільшуються напруження  $\sigma_{eqv}$  та  $\tau_{max}$ , але порівняно меншим залишається рівень усесторонніх тисків  $p$ , що сприяє розвитку крихких деформацій.

#### Значення швидкості деформування в формуванні насувів

Нерівномірне в часі формування насувних структур Українських Карпат пов'язане з тим, що періоди інтенсивного тектонічного стиснення чергувалися з періодами відносного тектонічного спокою [Хом'як Л., 2010]. Для вивчення впливу швидкості деформування на процес становлення насувів потрібно враховувати в'язкість порід. Саме цей фізико-механічний параметр визначає залежність величини залишкової деформації від динаміки тектонічних рухів. У формуванні структурних ансамблів верхньої частини земної кори в'язкість має другорядне значення. Порівняно низькі температури і помірні всесторонні тиски тектонічної природи не сприятливі для розвитку деформацій повзкості [Carter N.L., Tsenn M.C., 1987; Evans M.A., Fischer M.P., 2012; Plassart R. et al., 2013]. Винятком є соляні породи (евапорити), які за умов дії літостатичного тиску внаслідок в'язкого течіння утворюють солянокупольні структури. Соляні поклади істотно впливають також на морфологію, вергентність насувів у випадку, коли залягають у низах осадової товщі й стають горизонтом зриву. У насувних структурах Українських Карпат поверхня зриву приурочена до глинистих пачок і тонкоритмічного флішу рахівської, шипотської та спаської світ. Зроблено припущення, що у зазначених відкладах за умов великих порових тисків води могли виникати деформації повзкості і змінювати напружено-деформований стан осадового комплексу.



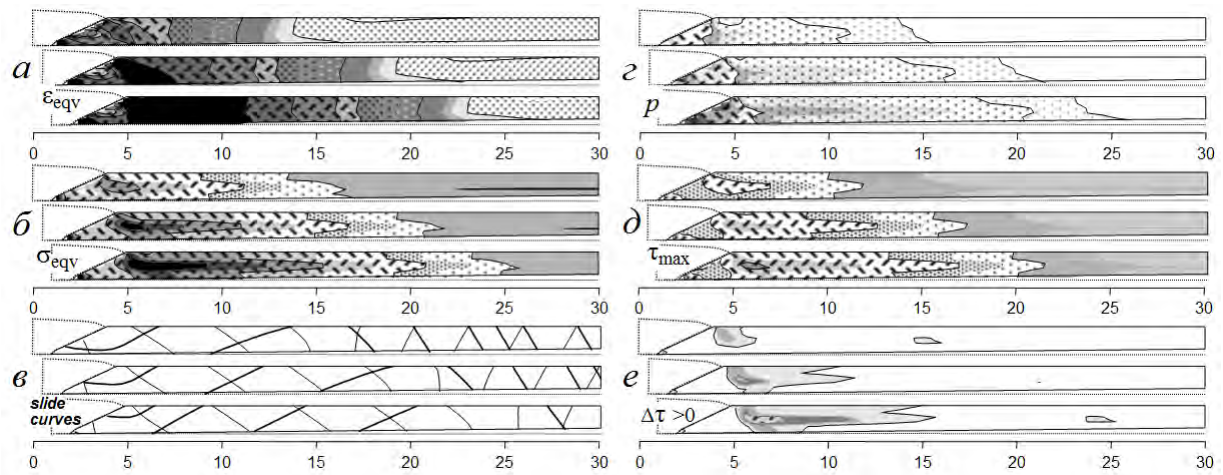


Рис. 9. Модель М-6.1

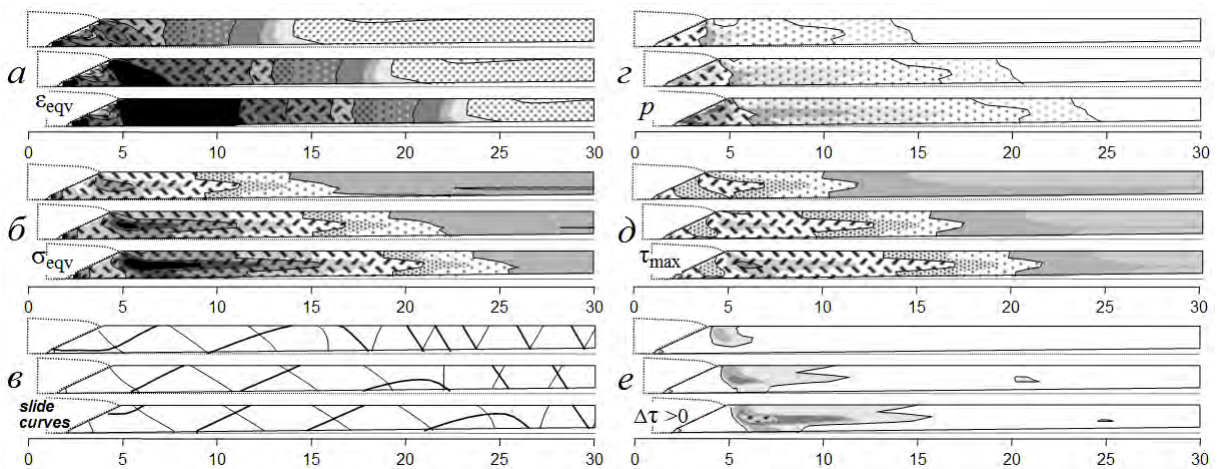


Рис. 10. Модель М-6.2

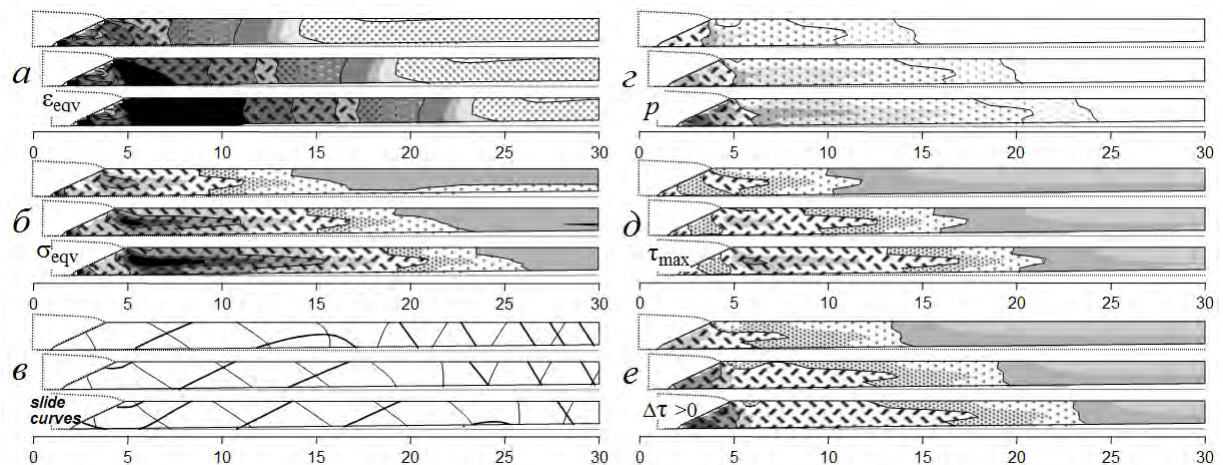


Рис. 11. Модель М-6.3

Вплив швидкості деформування осадової товщі автохтону на утворення насувів вивчено на тришаровій моделі, у властивостях нижнього макрошару якої враховано лінійну в'язкість порід згідно із законом  $\sigma_{eqv} = (1/\gamma)\dot{\epsilon}_{eqv}$ , де  $\dot{\epsilon}_{eqv}$  – швидкість деформації,  $\gamma = 10^{-6}$  (МПа/рік)<sup>-1</sup> – емпіричний коефіцієнт в'язкості. На моделях М-6.1,

М-6.2 і М-6.3 насувний клин переміщувався у бік осадового комплексу зі швидкістю відповідно 1, 5 і 10 см/рік. Для порівняння використано поля напружень і деформацій, які отримані на аналогічній моделі без урахування в'язкості (М-3.2). Значення швидкості вибрані з огляду на результати геодезичних вимірювань сучасних тектонічних рухів.

Поля напружень і деформацій на моделях осадового комплексу, що зазнав стиснення різної інтенсивності, мають подібний розподіл, особливо для загальних деформацій  $\epsilon_{eqv}$  (рис. 9 – 11). Значення напружень  $\sigma_{eqv}$  різняться лише для нижнього макрошару, а найбільші  $\sigma_{eqv}$ , як і на попередніх моделях, зафіксовано у компетентному макрошарі. Подібною на моделях є також величина й розподіл усесторонніх тисків  $p$  та максимальних дотичних напружень  $\tau_{max}$ . Незалежно від швидкості деформування однакову орієнтацію мають осі головних напружень та траєкторії ліній сколювання. Ці лінії утворюють дві системи діагонального щодо шаруватості орієнтування, а у піднасувній частині автохтону описують увігнуті траєкторії.

Близькі параметри еквівалентних напружень та інваріантів напружень зумовили однакове положення зони розвитку розривних порушень ( $\Delta\tau > 0$ ). Їхнє утворення контролюють компетентні макрошари, від яких крихке деформування поширюється спочатку на нижній макрошар, даючи поштовх виникненню поверхні зриву. Розвиток цього процесу безпосередньо залежить від швидкості тектонічного стиснення.

Отже, швидкість стиснення не визначає положення, розміри та вергентність насувних структур. За більшої швидкості переміщення насувного клину інтенсивніше зростають напруження, що сприятиме формуванню більшої кількості структур в одну тектонічну фазу.

### ***Наукова новизна і практична значущість***

Отримані результати моделювання полів напружень та деформацій в осадовому комплексі, який зазнає стиснення з боку насувного клину, дають змогу уточнити динамічні умови та механізм формування насувів, виконати реконструкції вірогідних сценаріїв розвитку регіональних насувно-покривних систем, зокрема, території Українських Карпат.

Наведено аргументоване модельними полями напружень і деформацій пояснення морфології, розмірів насувів та закономірностей їхнього розподілу всередині цих структур.

Виявлені закономірності механізму становлення насувів важливо враховувати для вирішення дискусійних питань тектонічного районування та структурної еволюції регіону, інтерпретації геологічної будови глибинних частин покривів та їхнього параавтохтону на підставі матеріалів геофізичних досліджень і вивчення розрізу свердловин, зокрема й у зв'язку з пошуками нафтогазоносних структур.

### ***Висновки***

Під час переміщення структур насувного клину напруження й деформації локалізуються в

автохтонному осадовому комплексі перед фронтальним насувом. Розподіл та величину інваріантів поля напружень визначають: потужність осадового комплексу, будова його розрізу, особливо чергування компетентних і некомпетентних макрошарів та форма поверхні фронтального насуву. Поперечні розміри насувної структури залежать, передусім, від потужності осадового комплексу: чим більша потужність розрізу, тим далі від фронтального насуву розташована магістральна зона крихкого руйнування. Величина напружень та деформацій швидше збільшується на моделях меншої потужності, що сприяє утворенню в межах однієї тектонічної фази більшого числа дрібних лусок (наприклад, Рахівського покриву). Значна кількість складчасто-насувних структур формується також за інтенсивніших тектонічних рухів, однак їхнє положення, розміри та вергентність не залежать від швидкості стиснення.

Магістральне насувне порушення набуває дугоподібної форми ще під час виникнення. Це зумовлено диференційованим розподілом в осадовій товщі як гравітаційних сил (гідро- і літостатичного тиску), так і тектонічних сил субгоризонтального стиснення. Лише за такої морфології фронтальної частини насувного клину положення чергового насувного порушення та розміри новоутвореної луски відповідають природним аналогам. За цієї ж умови в автохтоні інтенсивніше збільшуються еквівалентні та максимальні дотичні напруження, але порівняно меншим залишається рівень усесторонніх тисків, що сприяє розвитку деформацій руйнування та утворенню чергових насувів, а не складок відповідного порядку.

Шарувата макротекстура осадового комплексу не впливає на місце виникнення у ньому чергового насувного порушення, однак зумовлює особливості деформацій у процесі його становлення. На моделях з шаруватою будовою осадового комплексу рівень еквівалентних напружень збільшується повільніше, порівняно з однорідною ізотропною моделлю. Інтенсивність деформацій та межі їхнього поширення уздовж осадового комплексу збільшуються від ізотропної до багат шарових моделей. У процесі становлення насувних структур пластичні деформації в пачках суттєво глинистих порід або тонко- і середньоритмічного перешарування реалізовані інтенсивними складчастими дислокаціями, часто різноранговими дисгармонійними структурами внаслідок зміни характеру перешарування. Ділянки виникнення крихких деформацій, передусім тектонічної тріщинуватості, на ізотропній моделі локалізовані в осьовій частині активної зони, що перетинає весь комплекс порід автохтону, а на багат шарових моделях приурочені до компетентних пачок розрізу в межах активної зони. Параметр Лоде-Надаї в області максимальних значень інваріантів поля напружень близький до

нуля, що відповідає зсувним деформаціям. Це підтверджує також класифікація розривних порушень за положенням осей головних нормальних напружень. Внаслідок масового розвитку тріщин, субпаралельних до поверхні максимальних дотичних напружень, та їхнього проникнення від компетентних у некомпетентні пачки розрізу відбувається формування магістрального насувного порушення.

Вивчені на моделях поля напружень і деформацій дають підстави стверджувати, що кожне наступне насувне порушення в осадовому комплексі автохтону виникало перед фронтальною структурою алохтону та мало первинно дугоподібну поверхню. Поперечні розміри насуву залежать від потужності та будови розрізу осадового комплексу автохтону.

Відзначимо, що виконані числові дослідження модельних задач та спроба інтерпретації стосовно геологічних структур, а саме, насувів Українських Карпат, очевидно, є лише початковим наближенням і вимагає як удосконалення техніки моделювання, врахування складності геологічних структур, так і тіснішої кореляції, зокрема, з результатами польових спостережень та геофізичними даними.

### Література

- Геологическое строение и горючие ископаемые Украинских Карпат / С.С. Круглов, В.В. Глушко, В.А. Шакин и др. – М.: Недра, 1971. – 392 с.
- Гнилко О.М. Тектонічне районування Карпат у світлі терейнової тектоніки. Стаття 2. Флішові Карпати – давня акреційна призма / О.М. Гнилко // Геодинаміка. – 2012. – 1(12). – С. 67–78.
- Изучение геолого-геофизических материалов по Скибовой и Кросненской зонам Складчатых Карпат с целью выявления перспективных на нефть и газ объектов: отчет по теме за период 1988–1990 гг. / В.В. Глушко, В.В. Кузовенко, Л.П. Мышкин, В.Е. Шлапинский. – Львов, Тематическая партия, 1990. – 142 с. – (фонди ДП "Західукргеологія").
- Крупський Ю.З. Геодинамічні умови формування і нафтогазоносність Карпатського та Волино-Подільського регіонів України / Крупський Ю.З. – К.: УкрДГРІ, 2001. – 144 с.
- Кульчицький Я. Основні проблеми геологічної будови та пошуків корисних копалин Карпатського регіону / Я. Кульчицький, П. Лозиняк, М. Петрашкевич // Праці наукового товариства ім. Шевченка: геологія, геофізика, хемія, біохемія, матеріалознавство, механіка матеріалів. – 1997. – Т. 1. – С. 25–45.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов / Ю.Л. Ребецкий. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 406 с.
- Ступка О.С. Тектоніка Українських Карпат – досягнення і проблеми / О.С. Ступка // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2001. – № 2. – С. 27–37.
- Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах: справочник / М.П. Воларович, Е.И. Баюк, И.С. Томашевская, В.М. Добрынин. – [2-е изд.]. – М.: Недра, 1988. – 255 с.
- Фурман В.В. Методика комплексного аналізу деформацій та напружень скінченно-елементних моделей насуютворення / В.В. Фурман, М.М. Хом'як, Л.М. Хом'як // Геодинаміка. – 2007. – 1(6). – С. 85–94.
- Хом'як Л.М. Насуви в геологічній еволюції Українських Карпат та динамічні умови їх формування за даними комп'ютерного моделювання. Автореф. дис. ... канд. геол. наук. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка. – 2010. – 21 с.
- Хом'як Л.М. Моделювання напружено-деформованого стану осадового комплексу в зоні субдукції та динамічні умови формування ранніх насувів Українських Карпат / Л.М. Хом'як, М.М. Хом'як // Геодинаміка. – 2013. – 1(14). – С. 142–153.
- Albertz M. Critical state finite element models of contractional fault-related folding: Part 2. Mechanical analysis / M. Albertz, P.F. Sanz // Tectonophysics. – 2012. – Vol. 576–577. – P. 150–170.
- Buiter S.J.H. A review of brittle compressional wedge models / Susanne J.H. Buiter // Tectonophysics. – 2012. – Vol. 530–531. – P. 1–17.
- Carter N.L. Flow properties of continental lithosphere / Carter N.L., Tsenn M.C. // Tectonophysics. – 1987. – Vol. 136. – P. 27–63
- Couzens-Schultz B. A. Stress determination in active thrust belts: An alternative leak-off pressure interpretation / Brent A. Couzens-Schultz, Alvin W. Chan // J. of Struct. Geol. – 2010. – Vol. 32. – P. 1061–1039.
- Dean S.L. Geometries of frontal fold and thrust belts: Insights from discrete element simulations / S.L. Dean, J.K. Morgan, T. Fournier // J. of Struct. Geol. – 2013. – Vol. 53. – P. 43–53.
- Evansa M. A. On the distribution of fluids in folds: A review of controlling factors and processes / Mark A. Evans, Mark P. Fischer // J. of Struct. Geol. – 2012. – Vol. 44. – P. 2–24.
- Gerya T. Introduction to Numerical Geodynamic Modelling / Taras V. Gerya. – Cambridge University Press, 2010. – 358 p.
- Graya G. G. Overview of continuum and particle dynamics methods for mechanical modeling of contractional geologic structures / Gary G. Graya, Julia K. Morgan, Pablo F. Sanz // J. of Struct. Geol. – 2014. – Vol. 59. – P. 19–36.
- Henk A. Stress and fracture prediction in inverted half-graben structures / Henk A., Nemčok M. // J. of Struct. Geol. – 2008. – Vol. 30. – P. 81–97.

- Hydromechanical modelling of an excavation in an underground research laboratory with an elastoviscoplastic behaviour law and regularization by second gradient of dilation / Roland Plassart, Roméo Fernandesb, Albert Girauda, Dashnor Hoxhac, François Laigled // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2013. – Vol. 58. – P. 23–33.
- Jarosinska M. Mechanics of basin inversion: Finite element modelling of the Pannonian Basin System / M. Jarosinska, F. Beekman, L. Matenco, S. Cloetingh // Tectonophysics. – 2011. – Vol. 502. – P. 121–145.
- Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering / Jing L. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2003. – Vol. 40. – P. 283–353.
- Koehn D. Two-dimensional numerical modeling of fracturing and shear band development in glacier fronts / Daniel Koehn, Till Sachau // J. of Struct. Geol. – 2014. – Vol. 44. – P. 133–142.
- Nemčok M. Thrustbelts. Structural architecture, thermal regime and petroleum systems / Nemchok M., Schamel S., Gayer R. – Cambridge University Press, 2005. – 541 p.
- Pospíšil L. Geophysical model of the Carpathian-Pannonian lithosphere. Geological and geophysical data analyses / Pospíšil L. and Nemčok M. – Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2010. – 205 p.
- Ramsay J.G. The techniques of modern structural geology. Vol. 3. Applications of continuum mechanics in structural geology / Ramsay J.G., Lisle R.G. – Elsevier, 2000. – 701–1061 p.
- Simpson G. Mechanics of non-critical fold-thrust belts based on finite element models / Guy Simpson // Tectonophysics. – 2011. – Vol. 499. – P. 142–155.
- Smart K. J. Geomechanical modeling of stress and strain evolution during contractional fault-related folding / Kevin J. Smart, David A. Ferrill, Alan P. Morris, Ronald N. McGinnis // Tectonophysics. – 2012. – Vol. 576–577. – P. 171–196.
- Wissing S.B. Numerical models of Alpine-type cover nappes / Wissing S.B., Ellis S., Pfiffner O.A. // Tectonophysics. – 2003. – Vol. 367. – P. 145–172.

**Л.Н. ХОМЯК<sup>1\*</sup>, Н.Н. ХОМЯК<sup>2</sup>**

<sup>1\*</sup>Кафедра общей и региональной геологии, Львовский национальный университет имени Ивана Франко, ул. Грушевского, 4, Львов, Украина, 79005, тел. +38(032)2397883, ел. почта ZagGeol@franko.lviv.ua

<sup>2</sup>Кафедра физики Земли, Львовский национальный университет имени Ивана Франко, ул. Грушевского, 4, Львов, Украина, 79005

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСАДОЧНОГО КОМПЛЕКСА АВТОХТОНА В ЗОНЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ КЛИНА НАДВИГА**

**Цель.** Компьютерное моделирование в рамках механики сплошных сред – мощный инструмент для получения качественных и количественных параметров деформаций в геологической среде. Цель работы – исследование полей напряжений и деформаций осадочного комплекса автохтона вследствие перемещения клина надвига. Объект – слоистая толща с разными геометрическими и механическими параметрами, ограниченная фундаментом палеобассейна и клином надвига, который ее сжимает, с учетом гравитационных сил и сил трения на контакте. **Методика.** Построен ряд двумерных конечно-элементных моделей динамического влияния клина надвига на автохтонную осадочную толщу. Они учитывают слоистое строение, разные механические свойства пластов, передачу тектонического сжатия через механический контакт с учетом трения, морфологию поверхности разлома и зависимость от скорости деформирования. Для визуализации расчётов напряженно-деформированного состояния горных пород перед клином надвига использовано разработанную методику комплексного анализа деформаций и напряжений, наиболее важных для геологической интерпретации. Это распределения эквивалентных деформаций и напряжений, равностороннее давление, максимальное касательное напряжение, траектории напряжений и линии скольжения, пересекающие их под углом внутреннего трения, а также зоны вероятного трещинообразования, определенные за критерием Байерли. Вместе они наиболее важны для геологической интерпретации. **Результаты.** Изученные на моделях поля напряжений и деформаций дают основание утверждать, что каждое следующее надвижное нарушение в автохтоне возникало перед фронтальной структурой аллохтона и имело первично дугообразную поверхность. Размеры надвиговых структур наиболее зависят от мощности осадочной толщи и порядка компетентных и некомпетентных слоев в пачке, в меньшей мере – от скорости надвижения. **Практическая значимость.** Выявленные закономерности механизма формирования надвигов важно учитывать для решения дискуссионных вопросов тектонического районирования и структурной эволюции Украинских Карпат, интерпретации геофизических данных о глубинных частях покровов и их параавтохтона, в частности, в связи с поисками нефтегазоносных структур.

**Ключевые слова:** моделирование надвигообразования; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов; Украинские Карпаты, осадочный комплекс автохтона.

L.M. KHOMYAK<sup>1\*</sup>, M.M. KHOMYAK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Department of General and Regional Geology, The Ivan Franko National University of Lviv, 4 Hrushevskogo Street, Lviv, Ukraine, 79005, phone. +38(032)2397883, e-mail ZagGeol@franko.lviv.ua

<sup>2</sup>Department of Physics of the Earth, The Ivan Franko National University of Lviv, 4 Hrushevskogo Street, Lviv, Ukraine, 79005

### THE STRESS-STRAIN STATE MODELLING OF THE AUTOCHTHONOUS SEDIMENTARY COMPLEX IN THE DYNAMIC INFLUENCE ZONE OF THE THRUST WEDGE

**Purpose.** Computer modelling in the framework of continuum mechanics is a powerful tool to obtain qualitative and quantitative deformation parameters in the geological media. The purpose of this work was to study stress and strain fields of the sedimentary autochthonous complex owing to moving a thrust wedge. Subject of inquiry is layered rocks with different geometrical and mechanical properties bounded by the basement of the peolebasin and compressive thrust wedge taking into account the gravitational forces and contact frictions. **Methodology.** Series of the finite-element 2D-models of dynamic influence of thrust wedge on the sedimentary autochthonous complex are constructed. We consider layered structures with different mechanical properties, transferring of tectonic compression through mechanical frictional contact, morphology of a fault surface and dependence on deformation ratio. The stress-strain state of rocks in front of the thrust wedge are calculated. The developed technique of the complex analysis of stress and strain invariants for visualization was used. Distributions of the equivalent strains and stresses, pressures, maximal tangential stresses, stress trajectories and slide lines traced under angle of the internal friction to them, as well the probable fracturing zones that defined by Byerlee's criterion are mapped. All together they are most important for geological interpretation. **Results.** The analyzed stress and strain fields of the models found that successive thrust fault in the autochthonous occurred in front of the allochthonous structure and had primarily an arc-like surface. The sizes of thrust structures depend on sedimentary rocks thickness, order of competent and incompetent layers, less – on velocity of sliding. **Originality.** The explanation of morphology, the thrusts proportion and pattern of the stress and strain distribution inside these structures are resulted. **Practical significance.** The revealed regular dependences of the thrust formation mechanism are important to consider controversial questions of tectonic zoning and structural evolution of the Ukrainian Carpathians, interpretation of geophysical data about deep parts of the thrust nappes and its para-autochthon, in particular, related to exploration of the oil-and-gas bearing structures.

*Keywords:* thrust modelling; stress-strain state; finite element method; Ukrainian Carpathians

### REFERENCES

- Kruglov S.S., Glushko V.V., Shakin V.A. at al. Geologicheskoe stroenie i gorjuchie iskopaemye Ukrainskih Karpat [*Geological structure and combustible minerals of the Ukrainian Carpathians*]. Moscow, Nedra, 1971, 392 p.
- Hnylko O.M. *Tektonichne rayonuvannya Karpat u svitli tereynovoyi tektoniky. Statyya 2. Flishovi Karpaty – davnya akreysiyna pryzma* [Tectonic zoning of the Carpathians in term's of the terrane tectonics. Article 2. The flysch Carpathians – ancient accretionary prism]. *Heodynamika Geodynamics (Ukraine)*, 2012, no. 1(12), pp. 67–78.
- Glushko V.V., Kuzovenko V.V., Myshkin L.P., Shlapinskij V.E. *Izuchenie geologo-geofizicheskikh materialov po Skibovoy i Krosnenskoj zonam Skladchatyh Karpat s cel'ju vyjavlenija perspektivnyh na neft' i gaz objektov* [Geological and geophysical studies of the materials from Skyba and Krosno zones of the Folded Carpathians for distinguish of the perspective oil and gas objects]. L'vov, Tematicheskaja partija, Archive of DP "Zakhidukrheolohiya", 1990, 142 p.
- Krups'kyi Yu.Z. *Heodynamichni umovy formuvannya i naftohazonosnist' Karpats'koho ta Volyno-Podil's'koho rehioniv Ukrayiny* [Geodynamic forming conditions and oil-and-gas bearing of the Carpathian and Volyn'-Podillya areas of the Ukraine]. Kyiv : UkrDHRI, 2001, 144 p.
- Kulchyts'kyi Ya., Lozyniak P., Petrashkevych M. *Osnovni problemy heolohichnoyi budovy ta poshukiv korysnykh kopalyn Karpat-s'koho rehionu* [Basic problems of geological structure and minerals prospecting in the Carpathian region]. Pratsi naukovooho tovarystva imeni Shevchenka: heolohiya, heofizyka, khemiya, biokhemiya, materiyaloznavstvo, mekhanika materiyaliv [Proceedings of the Shevchenko Scientific society (*Ukraine*)], 1997, no. 1, pp. 25–45.
- Rebeckij Ju.L. *Tektonicheskie naprjazhenija i prochnost' prirodnyh gornyh massivov* [Tectonic stresses and strength of natural rock massifs]. Moscow, IKC "Akademkniga", 406 p.
- Stupka O. S. *Tektonika Ukrayins'kykh Karpat – dosyahnennya i problemy* [Tectonics of the Ukrainian Carpathians – progress and problems], *Heolohiya i heokhimiya horyuchykh kopalyn [Geology and geochemistry of combustible minerals (Ukraine)]*, 2001, no.2, pp. 27–37.

- Volarovich M.P., Bajuk E.I., Tomashevskaja I.S., Dobrynin V.M. *Fizicheskie svoystva mineralov i gornykh porod pri vysokikh termodinamicheskikh parametroh: spravochnik* [Physical properties of minerals and rocks at high thermo-dynamical parameters: handbook]. 2nd edition. Moscow, Nedra, 1988, 255 p.
- Fourman V.V., Khomyak M.M., Khomyak L.M. *Metodyka kompleksnoho analizu deformatsiy ta napruzhen' skinchenno-elementnykh modeley nasuvoutvorenniya* [The methodology of the complex analysis of strains and stresses for finite-element modelling of thrusting]. *Heodynamika – Geodynamics (Ukraine)*, 2008, no. 1(7), pp. 116–127.
- Khomyak L.M. *Nasuvy v heolohichniy evolyutsiyi Ukrayins'kykh Karpat ta dynamichni umovy yikh formuvannya za danymy komp'yuternoho modelyuvannya. Avtoreferat Diss.* [Thrusts in the geological evolution of the Ukrainian Carpathians and dynamic conditions of their formation according to computer modelling. Author's abstract]. Lviv, 2010, 21 p.
- Khomyak L.M., Khomyak M.M. *Modelyuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu osadovoho kompleksu v zoni subduktsiyi ta dynamichni umovy formuvannya rannikh nasuviv Ukrayins'kykh Karpat* [The strain-stress state modelling of the sedimentary complex in subduction zone and dynamic conditions of early thrusts formation in the Ukrainian Carpathians]. *Heodynamika – Geodynamics (Ukraine)*, 2013, no. 1(14), pp. 142–153.
- Albertz M., Sanz P.F. *Critical state finite element models of contractional fault-related folding: Part 2. Mechanical analysis*. *Tectonophysics*, 2012, Vol. 576–577, pp. 150–170.
- Buiter S.J.H. *A review of brittle compressional wedge models*. *Tectonophysics*, 2012, Vol. 530–531, pp. 1–17.
- Carter N. L., Tsenn M.C. *Flow properties of continental lithosphere*. *Tectonophysics*, 1987, Vol. 136, pp. 27–63.
- Couzens-Schultz B.A., Chan A.W. *Stress determination in active thrust belts: An alternative leak-off pressure interpretation*. *J. of Struct. Geol.*, 2010, Vol. 32, pp. 1061–1039.
- Dean S.L., Morgan J.K., Fournier T. *Geometries of frontal fold and thrust belts: Insights from discrete element simulations*. *J. of Struct. Geol.*, 2013, Vol. 53, pp. 43–53.
- Evansa M.A., Fischer M.P. *On the distribution of fluids in folds: A review of controlling factors and processes*. *J. of Struct. Geol.*, 2012, Vol. 44, pp. 2–24.
- Gerya T. V. *Introduction to Numerical Geodynamic Modelling*. Cambridge University Press, 2010, 358 p.
- Graya G.G., Morgan J.K., Sanz P.F. *Overview of continuum and particle dynamics methods for mechanical modeling of contractional geologic structures*. *J. of Struct. Geol.*, 2014, Vol. 59, pp. 19–36.
- Henk A., Nemčok M. *Stress and fracture prediction in inverted half-graben structures*. *J. of Struct. Geol.*, 2008, Vol. 30, pp. 81–97.
- Plassarta R., Fernandes R., Girauda A., Hoxhac D., Laigled F. *Hydromechanical modelling of an excavation in an underground research laboratory with an elastoviscoplastic behaviour law and regularization by second gradient of dilation*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, Vol. 58, pp. 23–33.
- Jarosinska M., Beekman F., Matenco L., Cloetingh S. *Mechanics of basin inversion: Finite element modelling of the Pannonian Basin System*. *Tectonophysics*, 2011, Vol. 502, pp. 121–145.
- Jing L. *A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, Vol. 40, pp. 283–353.
- Koehn D., Sachau T. *Two-dimensional numerical modeling of fracturing and shear band development in glacier fronts*. *J. of Struct. Geol.*, 2014, Vol. 44, pp. 133–142.
- Nemčok M., Schamel S., Gayer R. *Thrustbelts. Structural architecture, thermal regime and petroleum systems*. Cambridge University Press, 2005, 541 p.
- Pospíšil L. and Nemčok M. *Geophysical model of the Carpathian-Pannonian lithosphere. Geological and geophysical data analyses*, Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2010, 205 p.
- Ramsay J.G., Lisle R.G. *The techniques of modern structural geology. Vol. 3. Applications of continuum mechanics in structural geology*. Elsevier, 2000, pp. 701–1061.
- Simpson G. *Mechanics of non-critical fold-thrust belts based on finite element models*. *Tectonophysics*, 2011, Vol. 499, pp. 142–155.
- Smart K. J., Ferrill D. A., Morris A.P., McGinnis R.N. *Geomechanical modeling of stress and strain evolution during contractional fault-related folding*. *Tectonophysics*, 2012, Vol. 576–577, pp. 171–196.
- Wissing S.B., Ellis S., Pfiffner O.A. *Numerical models of Alpine-type cover nappes*. *Tectonophysics*, 2003, Vol. 367, pp. 145–172.

Стаття рекомендована до друку д-ром геол.-мін. наук, проф. О.С. Ступкою (Україна); д-ром фіз.-мат. наук, проф. Д.В. Малицьким (Україна)

Надійшла 13.05.2014 р.