

УДК 525.62+551.24+552.24

А. В. НАЗАРЕВИЧ¹, О. М. БОКУН², Л. Є. НАЗАРЕВИЧ³

¹Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3-б, тел. +38(032)2648563, ел. пошта nazarevych-a@cb-igph.lviv.ua

²Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3-а

³Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, відділ сейсмічності Карпатського регіону, 79012, м. Львів, вул. Ярославенка, 27, тел. +38(032)2706100, ел. пошта nazarevych.l@gmail.com

СТРУКТУРА, ДИНАМІКА І СЕЙСМОТЕКТОНІКА СКИДОВИХ ЗОН

(за результатами фізичного моделювання та польових досліджень)

Частина 1: Фізичне моделювання

Мета. Метою роботи є представити та проаналізувати результати фізичного моделювання і польових досліджень процесів утворення, розвитку, а також сучасної геодинамічної та сейсмотектонічної активності зон субвертикального зсуву (ЗСВЗ), зокрема, скидової кінематики. **Методика.** Фізичне моделювання проведено на спеціальній моделювальній установці для кутів падіння розриву 75°, 60° і 45°. Як пластично-в'язкі модельні матеріали для нього використано спеціальні пасти на основі глини. Польові дослідження містять геоакустоемісійний, ПЕМПЗ, деформографічний, нахиломірний та сейсмологічні методи. **Результати.** У частині 1 (фізичне моделювання) відтворено закономірності розвитку процесів субвертикального розривоутворення в осадових товщах у часі та з глибиною в модельних експериментах, проаналізовано розвиток різних систем тріщин залежно від швидкості зміщення та кута падіння розриву. Простежено розвиток приповерхневих тріщинуватих зон (як по латералі, так і з глибиною) над зонами СВЗ. У частині 2 (польові дослідження) наведено приклади зон такого типу в реальних геологічних структурах, зокрема, у зоні Березівського горбогір'я в Закарпатті та деякі результати геофізичного моніторингу їх сучасного геодинамічного режиму, зокрема, деформометричним та параметричним геоакустичним методами, а також методами природних геоакустоемісійного та імпульсного геоелектромагнітнемісійного (метод ПЕМПЗ) полів. За сейсмологічними даними, простежено особливості сейсмотектонічного процесу в одній з характерних сейсмогенних зон скидової кінематики в районі Березівського горбогір'я в Українському Закарпатті. **Наукова новизна.** За даними фізичного моделювання, встановлено характерні часово-просторові закономірності розвитку процесів субвертикального розривоутворення, їх залежність від кута падіння розриву та швидкості зміщення блоку основи. За даними багаторічних польових геоакустичних, деформографічних і нахиломірних досліджень на мережі пунктів спостережень у зоні Березівського горбогір'я в Українському Закарпатті виявлено підвищену геодинамічну активність таких субвертикальних тріщинуватих зон та зв'язок деформаційних процесів у них з геодинамікою земної кори Закарпаття та усієї Землі. За комплексом сейсмологічних, геологічних та геодезичних даних на прикладі характерних землетрусів Березівської сейсмогенної зони в Українському Закарпатті (зони на перетині Припанонського (захід – північно-західного простягання) і Березівського меридіонального розломів – зони розвитку горст-грабенової (“клавішної”) тектоніки) простежено характерні особливості сейсмотектоніки скидових зон. **Практична значущість.** Результати досліджень дають можливість, з одного боку, надійніше прогнозувати (а значить, і моніторити) зони проявів приповерхневих ефектів від глибинних ЗСВЗ, а з іншого, за результатами поверхневих досліджень прогнозувати наявність, локалізацію та характеристики глибинних ЗСВЗ, а також характер і характеристики геодинамічних та сейсмотектонічних процесів у таких зонах. Це є важливим для сейсмології та геодинамічного моніторингу, для пошуків нафти і газу та інших корисних копалин, для інженерної геології і геофізики, для геоecології та ін.

Ключові слова: фізичне моделювання тектонічних процесів; зони субвертикального зсуву (ЗСВЗ); скидові зони; системи тріщин; структуроутворення; польові дослідження; деформації порід; нахиломір-маятник; геоакустоемісійний метод; метод ПЕМПЗ; механізми землетрусів; Українське Закарпаття.

Вступ

Зсуви різних масштабів та типів, зокрема, по субвертикальних розломах і тріщинах, є найпоширенішим типом порушень у земній корі ([Стянов, 1977; Гінтов, 2005] та ін.). Поряд з розглянутими нами у попередній роботі [Бокун, Назаревич, 2013] зонами горизонтального зсуву великий інтерес для геологів та геофізиків, зокрема і у Карпатському регіоні України, становлять також

зони субвертикального зсуву (ЗСВЗ) різної кінематики (скиди, підкиди, тощо). Ці зони часто контролюють колектори нафти і газу, рудні тіла, вони можуть бути каналами підведення вуглеводнів, гідротермальних флюїдів чи тектонічними екранами ([Матковський, 1992; Крупський, 2001; Лозиняк та ін., 2011; Чебаненко и др., 1990; Шеремета та ін., 2011; Скакун та ін., 1992; Ковалишин, Братусь, 1984] та ін.). Якщо такі зони відзначаються помітною сучасною активністю, то

вони часто є і сейсмогенними ([Дослідження..., 2005; Бойко та ін., 2003; Назаревич, Назаревич, 2000, 2001, 2005, 2006, 2007, 2009, 2012, 2013, 2014; Назаревич, 2006] та ін.).

Вказані зони проявляються своєю активністю у морфології рельєфу [Кравчук, 2008], в індикаторах сучасних (геодезія [Юркевич и др., 1969]) та голоценових (наприклад, типи та динаміка ґрунтового покриву [Полівцев, 2010]) рухів. Вони проявляються також у багатьох геофізичних полях (геомагнітному [Максимчук та ін., 2001], геоакустотемісійному [Назаревич, Назаревич, 2002], імпульсному геоелектромагнітноемісійному (метод ПЕМПЗ) [Ляшук та ін., 2003], радоновому (еманційне знімання) [Бобров, 2008; Толстой, Шабатура, 2014] та ін.) і, як буде показано нижче, це закономірні фізичні ефекти. На нашу думку, саме пов'язані з зонами СВЗ геофізичні ефекти також можуть значною мірою пояснити наявність та особливості прояву так званих геоактивних зон.

Знання закономірностей розвитку процесів субвертикального розривотворення в осадових товщах у часі та з глибиною є важливими для геодинамічного моніторингу, для пошуків нафти і газу та інших корисних копалин, для інженерної геології і геофізики, для геокології. Для цього необхідні знання про особливості структури та геодинаміки ЗСВЗ. Багато що для цього дають польові геолого-геофізичні дослідження, зокрема сейсморозвідка та буріння. Однак ці дослідження є складними та дорогими, ними важко простежити особливості розвитку структур ЗСВЗ з глибиною (тут переважно можуть допомогти дані досліджень у кар'єрах та шахтах, меншою мірою – дані свердловинних досліджень), вони не можуть дати пряме відтворення процесу утворення цих структур у часі. Тому багато відсутньої у польових даних інформації про ЗСВЗ можна отримати за даними фізичного моделювання. Нижче розглянемо результати такого моделювання і далі порівняємо отриману з їх допомогою інформацію з даними ряду польових досліджень.

Мета досліджень

Метою роботи є виклад та аналіз результатів фізичного моделювання і польових досліджень розвитку у часі і в просторі скидових розломно-тріщинуватих зон і їх сучасної геодинамічної та сейсмотектонічної активності. Для цього проведено аналіз мезомасштабних природних геодформаційних процесів і механічних та реологічних характеристик гірських порід та модельних матеріалів, аналіз даних фізичного моделювання розвитку скидових зон для різних кутів падіння розриву і різних швидкостей деформацій, аналіз результатів геофізичного моніторингу геодинамічних процесів у контрольованій ЗСВЗ скидового типу у шотландійському режимній геофізичній станції "Берегове" у Закарпатті, аналіз комплексу сейсмологічних, геологічних та геодезичних даних стосов-

но характерних скидових землетрусів Берегівської сейсмогенної зони в Українському Закарпатті.

Методика

Фізичне моделювання процесів розвитку тріщинуватих зон

Відомо досить багато робіт, присвячених фізичному моделюванню утворення та розвитку тріщинуватих зон різної кінематики ([Riedel, 1929; Tchalenko, 1970; Wilcox, 1973; Harding, 1974; Graham, 1978; Odonne and Vialon, 1983; Sylvester, 1988; Richard and Cobbold, 1989; Kuksenko et al., 1996; Osokina et al., 2007; Михайлова, 1971; Стоянов, 1977; Семинский, 1988; Бондаренко, 1988; Бокун, 1988, 1991; Chemenda et al., 2000; Борняков, 2008, 2009; Борняков и др., 2008] та ін.). Таке моделювання проводилось у різних постановках і з різною метою: для структурної геології, для пошуків корисних копалин, для перевірки тих чи інших тектонічних побудов. У результаті досліджень виявлено основні структурні елементи таких зон, однак особливості розвитку цих зон у часі та з глибиною, їх структурна організація, роль різних факторів у деформаційних процесах, зокрема, кутів падіння розриву та інтенсивності (швидкості) процесу залишилися значною мірою невиясненими.

Мета та задачі фізичного моделювання ЗСВЗ

Фізичне моделювання ЗСВЗ проводилось у руслі постановки загальної задачі геофізики [Гзовський, 1963], тобто передбачало оцінку ролі різних факторів у деформаційному процесі. Загальна мета та конкретні задачі фізичного моделювання були такими – дослідити особливості розвитку ЗСВЗ скидової кінематики у часі та з глибиною, їх структурну організацію, роль основних факторів, зокрема, кутів падіння розриву та інтенсивності (швидкості) процесу опускання лежачого крила.

Модельні матеріали готувалися переважно з глини, за необхідності з певними домішками для забезпечення потрібних реологічних властивостей. До цього зазначимо, що оскільки кількісно пов'язати деформаційну поведінку модельного матеріалу з поведінкою реальних гірських порід сьогодні неможливо через брак відповідних даних для порід, то порівнювати результати фізичного моделювання з реальними польовими даними можливо лише на якісному рівні. З іншого боку, порівняно з математичним моделюванням, де на рівні формул, крім основного механічного процесу деформування, необхідно так чи інакше враховувати різні інші процеси, пов'язані з структурою та властивостями порід, їхньою зміною в часі і в просторі, відповідними крайовими, граничними та іншими умовами, саме під час фізичного моделювання значна частина подібності з природними процесами забезпечується автоматично, і це відбувається саме за рахунку того, що за такого моделювання діють ті самі фізичні закони і наявні такі самі явища, як і в природі.

Методика і техніка експерименту

Фізичне моделювання ЗСВЗ проводилось на спеціальній установці (див. рис. 1) [Бокун, 1981, 1985, 1990]. Вона має у своєму складі такі основні елементи: 5 силових модулів для моделювання деформаційних процесів (два з них (2) – по боках установки), а 3 інші – в її корпусі (3), робочу камеру (1), у яку поміщається модель, пуансон (4) з площадками, за допомогою яких деформації передаються з силових модулів на ділянки моделі. Крайні силові модулі закріплені нерухомо, а середні, розташовані під робочою камерою, можуть переміщуватися вздовж камери і займати положення, необхідне для конкретного експерименту. Їх пуанسونи можуть також закріплюватися під різними кутами, забезпечуючи тим самим моделювання різних процесів (горстових, грабенових, скидових, зсувних та комбінованих).

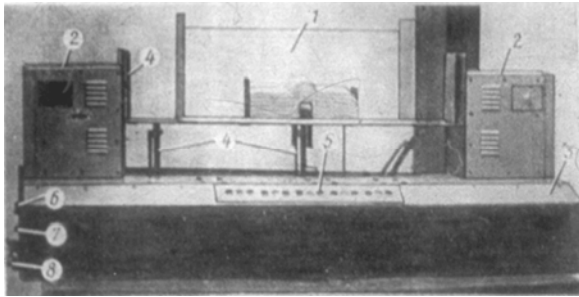


Рис. 1. Установка фізичного моделювання тектонічних процесів (пояснення в тексті)
Fig. 1. Machine of physical modeling of tectonic processes (explanations are in the text)

Самі силові модулі мають електромотори з редукторами для приведення в рух пуансонів. Швидкість деформацій може встановлюватися різною за рахунок встановлення відповідних наборів шестерень у редукторі. Хід пуансона – до 100 мм. Кожен пуансон обладнаний кінцевим вимикачем для автоматичного завершення експерименту. Установа живиться від мережі ((6) – блок запобіжників, (7) – вимикач, (8) – колодка для підключення кабеля живлення).

Модель для описаних досліджень – це шар (брусок) модельного матеріалу (частіше – вологої глини) розміром, як правило, 10×50 або 10×70 см і товщиною близько 10 см (див. рис. 3), укладеного на розміщені поряд 2 жорсткі пластини з рифленими (для забезпечення передачі механічних зусиль на модель) поверхнями і прорізью між ними. Брусок у частині експериментів з боків був обмежений пластинами зі скла для уникнення додаткових деформацій за рахунок бокового розпору. Пластини основи мали товщину 50 мм і клиноподібну форму на стику між ними з кутами 75° , 60° або 45° (рис. 3, а), вони імітували жорстку основу та скидову розломну зону в розташованому нижче жорсткому шарі порід (фундаменті), мо-

дельний шар – товщу перекриваючих механічно слабших (наприклад, осадових) гірських порід.

Горизонтальні та вертикальні розміри моделі вибиралися такими, щоб, з одного боку, під час досліджень можна було добре простежити розвиток тріщинуватості по вертикалі, а з іншого, забезпечити необхідні умови навантаження моделі, зокрема, співвідношення між вертикальними навантаженнями та міцністю у зоні майбутнього руйнування.

Навантаження на модель (брусок) задавалось через її підшову – за рахунок повного прилипання модельного матеріалу до основи, а також за рахунок сили гравітації – ваги самого матеріалу. Саме тому (для збільшення площі передачі вертикального навантаження порівняно з поперечним перерізом моделі) довжина модельного бруска у кілька разів перевищувала його ширину. Одна з пластин – лежаче крило скиду (блок II, див. рис. 3–6) опускалась відносно іншої (блок I) за допомогою пуансонів установки з певною постійною швидкістю – 1, 5, 20, 100 мм/хв. Зазначимо, що за таких умов експерименту модельний матеріал повинен мати порівняно невелику міцність, щоб жорсткість бруска несуттєво впливала на процес його деформування і формування розломної зони. Для визначення деформацій і переміщень по тріщинах на бокову поверхню моделі наносилась маркувальна координатна сітка з кроком 10×10 або 20×20 мм. Процес деформування спостерігався візуально і фотографувався через певні проміжки часу, коли блок II опускався на 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 мм (див. рис. 3–8). Порівнюючи фото, можна простежити розвиток тріщинуватості зони у часі та з глибиною. Технічні та методичні аспекти таких досліджень досить детально описані в роботах [Бокун, 1981, 1986, 1988, 1991, 2009; Чебаненко и др., 1990; Бокун, Назаревич, 2013].

Під час досліджень способи їх проведення постійно вдосконалювалися, зокрема, з метою отримання якомога виразнішої картини розвитку тріщинуватості. Для цього добиралися найоптимальніші механічні характеристики модельного матеріалу, знімались фронтальні обмежувальні скляні стінки робочої камери, застосовувалось спеціальне контрастуюче освітлення активних поверхонь моделі та відповідні способи обробки фотоматеріалів. У результаті в подальшому під час експериментів отримано значно якісніші фото розвитку тріщинуватості, ніж на початковому етапі (див. рис. 4–7 порівняно з рис. 3). В окремих випадках (під час моделювання структуроутворення) утворені в моделі сітки тріщин прорисовувалися маркером або тушшю на накладених на бокову скляну стінку робочої камери напівпрозорих листках кальки або прозорій плівці вручну. Модельні експерименти тоді були переривчастими – інтервали навантаження з заданою швидкістю деформування чергувалися із стоп-фазами через кожні 5–10 мм зміщень основи.

Реологічні властивості модельних матеріалів

Перед тим, як перейти до аналізу отриманих результатів фізичного моделювання, зупинимось коротко на механічних, і зокрема, реологічних властивостях модельних матеріалів. Як уже вказувалося вище, під час проведення описаних тут модельних експериментів потрібно було забезпечити необхідні міцнісні та реологічні характеристики модельних матеріалів. Із згаданих вище робіт [Стоянов, 1977; Graham, 1978; Odonne, 1983; Sylvester, 1988; Richard, 1988; Семинский, 1988; Бондаренко, 1988; Бокун, 1981, 1986, 1988, 1991; Борняков, 2008] та ін.) відомо, що у тектонофізичному моделюванні для відтворення геологічних процесів найчастіше використовують вологу глину (глинисту пасту). Однак у цих роботах не наводяться всі необхідні реологічні параметри таких матеріалів, не описуються особливості їхньої поведінки під час деформації та умов навантаження в експериментах. Це ускладнює аналіз спостережуваних в експериментах деформацій і порівняння результатів моделювання з даними інших авторів.

Для приготування модельних матеріалів для описаних тут експериментів як тверда фаза, крім глини, використовували (часто як домішки) аеросил, порошки бітумного сланцю, карборунду, крейди, кварцового піску різного гранулометричного складу. Як дисперсне середовище використовувались вода, технічний гліцерин, вазелінова олія. Матеріали з різними характеристиками створювались шляхом зміни процентних співвідношень між твердою фазою та дисперсним середовищем. Отримувані матеріали – це пластично-в'язкі маси (пасти). У колоїдній хімії їх зараховують до коагуляційних структур, які відзначаються малою міцністю, яскраво вираженими пластично-в'язкими властивостями, еластичністю, здатністю до релаксації напружень і тиксотропного відновлення міцності з часом. Їх фізико-механічні властивості вивчалися шляхом побудови двох типів реологічних кривих. Один з них – це графік типу $\tau(\epsilon)$ при $\dot{\epsilon} = \text{const}$, що характеризує деформаційну поведінку матеріалу і дає змогу визначити границю текучості τ_s та в'язкість гранично порушеної структури η_m . Інший – графік кінетики деформацій, що відображає розвиток деформацій у часі за постійного навантаження з наступним розвантаженням. Ця крива дає змогу визначити модулі пружності (умовно-миттєвий E_1 , еластичний E_2 і рівноважний E), а також в'язкість повзучості η_0 .

У багатьох експериментах використовувалась глиниста паста (концентрація 54–58 %), приготувана з тонкодисперсної глини гідролітичного складу. Її реологічні властивості можна проілюструвати графіками на рис. 2. Зокрема, деформаційну поведінку глинистої пасти (графік на рис. 2, а) можна описати так – після пружної та зворотної пластичної деформації на прямолінійній ділянці виникають пластично-в'язкі деформації мінімально порушеної структури з високою в'язкістю.

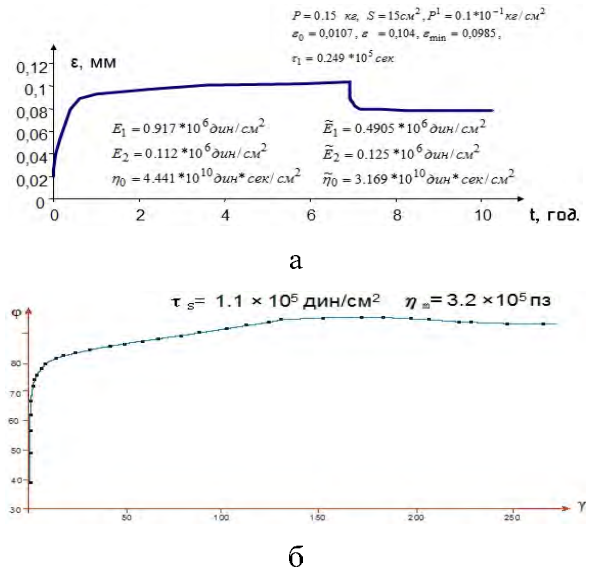


Рис. 2. Реологічні властивості модельних глинистих паст: а – крива кінетики деформації для пасти Веселовської глини (концентрація 58,6 %); б – крива для пасти складу: крейда (12,5 %), глина (37,5 %) **Fig. 2.** Rheological properties of modeling clay paste: а – curve of deformation kinetics for pasta Veselovsky clay (concentration 58.6 %); б – curve for paste of composition: chalk (12.5 %), clay (37.5 %)

На ділянці до τ_s , напруження різко зростають, що свідчить про зміщення структури пасти. Після досягнення межі текучості τ_s , напруження різко спадають, структурний каркас пасти руйнується (в моделях це момент найбільших структурних перетворень). Далі продовжуються пластично-в'язкі деформації, але уже зруйнованої структури. Місцями спостерігається незначний ріст напружень і їхній спад до встановленого рівня. Відбувається локальне руйнування залишків жорсткого каркасу.

Реологічні властивості глинистих паст з додаванням крейди (див. рис. 2, б) мають свої особливості (особливо відрізняється зона пластично-в'язких деформацій), що суттєво залежать від процентного співвідношення між крейдою та глиною.

Описані модельні матеріали подібні за своїми властивостями до широко відомої віконної замазки з крейди та оліфи. Для неї також за швидких деформацій (міліметри за секунду) наявне крихке руйнування, а для значно повільніших процесів (міліметри за хвилину і менше, враховуючи деформації під власною вагою) спостерігається навіть в'язка текучість, особливо, якщо оліфи є трохи більшими від технологічного оптимуму. Детальніше питання реології глинистих паст висвітлені у попередніх роботах ([Бокун, 1986; Бокун, Назаревич, 2013] та ін.).

Специфіка деформаційних процесів у природних та модельних середовищах

Перед тим, як перейти до аналізу конкретних результатів фізичного моделювання, розглянемо основні закономірності деформаційних процесів у гірських породах та ґрунтах (як модельованому середовищі), а також у глинах (як модельних матеріалах). Такі закономірності детально описані у працях з механіки ґрунтів і гірських порід та інженерної геології ([Демчишин, 1992; Зоценко, Коваленко, 2004; Иванов, 1991; Иванов, Тржцінський, 2001; Механика..., 2002; Швец, Бойко, 2012; Шашенко, Пустовойтенко, 2003] та ін.).

В основу методик аналізу різномасштабних геомеханічних процесів покладено теорію механічної рівноваги. Основна її ідея полягає у тому, що для стану рівноваги для кожної точки середовища сума проєкцій усіх діючих сил по кожній з осей, а також сума моментів усіх сил відносно кожної з осей дорівнює нулю. Дія на середовище різних активних сил (гравітаційних, тектонічних) до певного рівня компенсується дією реактивних сил – сил реакції порід (сил опору). Коли сили опору порід стануть не в змозі компенсувати дію активних сил, порушується стан рівноваги, середовище втрачає стійкість і розпочинаються різні (відповідні до напруженого стану та механічних властивостей середовища) деформаційні процеси – пружні, в'язкі, повзучі, крихке руйнування. Усі ці процеси описуються теоріями граничної рівноваги, теоріями граничних напружених станів, теоріями в'язких течій, теоріями крихкого руйнування.

Для нашого моделювання (як і для природних геодформаційних процесів) важливою є дія гравітаційних сил, яка завжди наявна у природі, тому треба наголосити, що гравітаційні сили – об'ємні (а отже, розподілені у просторі) й активні. Розподілені (а тим більше об'ємні) сили діють на значну частину поверхні чи весь об'єм тіла і тому мають не точку прикладання, а поверхню розподілу (чи еквівалентні поверхні розподілу в об'ємі тіла/середовища).

Стосовно нашого фізичного моделювання зміщення одного з блоків основи моделювальної установки моделює дію тектонічної сили (наприклад, зміщення блоку фундаменту в земній корі). Але, розглядаючи детально саму модель у послідовному ряді структурно-ієрархічних наближень, її можна вважати певним набором тонких пластів, набором шарів малих кубиків чи інших простих об'ємних фігур (як у методах скінчених елементів), і так аж до сукупності матеріальних точок, як це тепер часто розглядають у теоріях та методиках математичного моделювання різних процесів у середовищах та об'ємних тілах ([Ребецький, 1988; Хомяк, Хомяк, 2014] та ін.). За такого розгляду процеси механічної взаємодії можна розглядати стосовно кожного елементарного об'єму середовища чи тіла за взаємодії зі сусідніми об'ємами. Кожен такий об'єм тіла може бути як активним

елементом, так і “основою”, на яку діє такий елемент. Для цього зазначимо, що реакція основи (наприклад, розташованого нижче елемента) зазвичай дорівнює за величиною і протилежна за знаком тій дії, з якою на неї впливає розміщений вище елемент. Однак граничне значення реакції основи (чи елементів тіла/середовища, підданих дії сил) визначається властивостями цієї основи (тіла/середовища). Якщо активна сила потребує для себе реакції, більшої, ніж це граничне значення, то основа (елементи тіла/середовища) не може забезпечити рівноваги, і тіла (елементи тіла/середовища), що взаємодіють, починають рухатися (деформуватися). Для середовища зміна умов рівноваги внутрішніх сил призводить до переміщення окремих часток речовини відносно одна одної. Рух окремих частин тіла/середовища (масиву порід) із зміною їхнього положення призводить таким чином до зміни форми масиву – його деформації. Під час цих процесів діють також такі закономірності процесів перерозподілу і концентрації напружень (зокрема, девіаторних та дотичних) і руйнувань, які описуються в тектоніфізичі законами Кулона–Мора, коефіцієнтом Лоде–Надаї, тензорами напружень, діаграмами Мора та ін. [Ребецький, 2007, 2008].

Теоретично процеси та закономірності деформування та тріщиноутворення у застосуванні для задач нашого моделювання та геофізичного моніторингу зон субвертикального зсуву можуть бути у певному наближенні описані також методами механіки ґрунтів та механіки гірських порід, зокрема, теоріями розрахунку стійких відкосів для котлованів та відкритих гірничих виробок (кар'єрів) тощо ([Механика..., 2002; Шашенко, Пустовойтенко, 2003] та ін.). Але фізичне моделювання, як уже вказувалось, дає якісно наближений до реального цілісний результат завдяки простоті задання основних параметрів (кута нахилу поверхні та різних швидкостей зсуву) і відтворенню основних закономірностей цих процесів завдяки характеристикам модельних матеріалів. Результати фізичного моделювання можуть також слугувати орієнтиром під час вибору реальних параметрів для математичного моделювання таких процесів з величезної кількості формально можливих варіантів.

Зазначимо, що у природних умовах земної кори на описувані у цій роботі процеси субвертикального зсуву суттєво впливають такі параметри, як міцність порід, ступінь їх тріщинуватості та шаруватості, просторова локалізація та орієнтація тріщин і нашарувань відносно осі зсуву, флюїдний режим та інші фактори.

Результати експериментів

Із зазначеного вище бачимо, що глиниста паста – пружно-в'язко-пластичне середовище, в якому одночасно розвиваються розриви і пластичні деформації, подібно до того, як це відбувається у товщах гірських порід. Утворення та розвиток ЗСВЗ у такому матеріалі ілюструють фото на рис. 3–8.

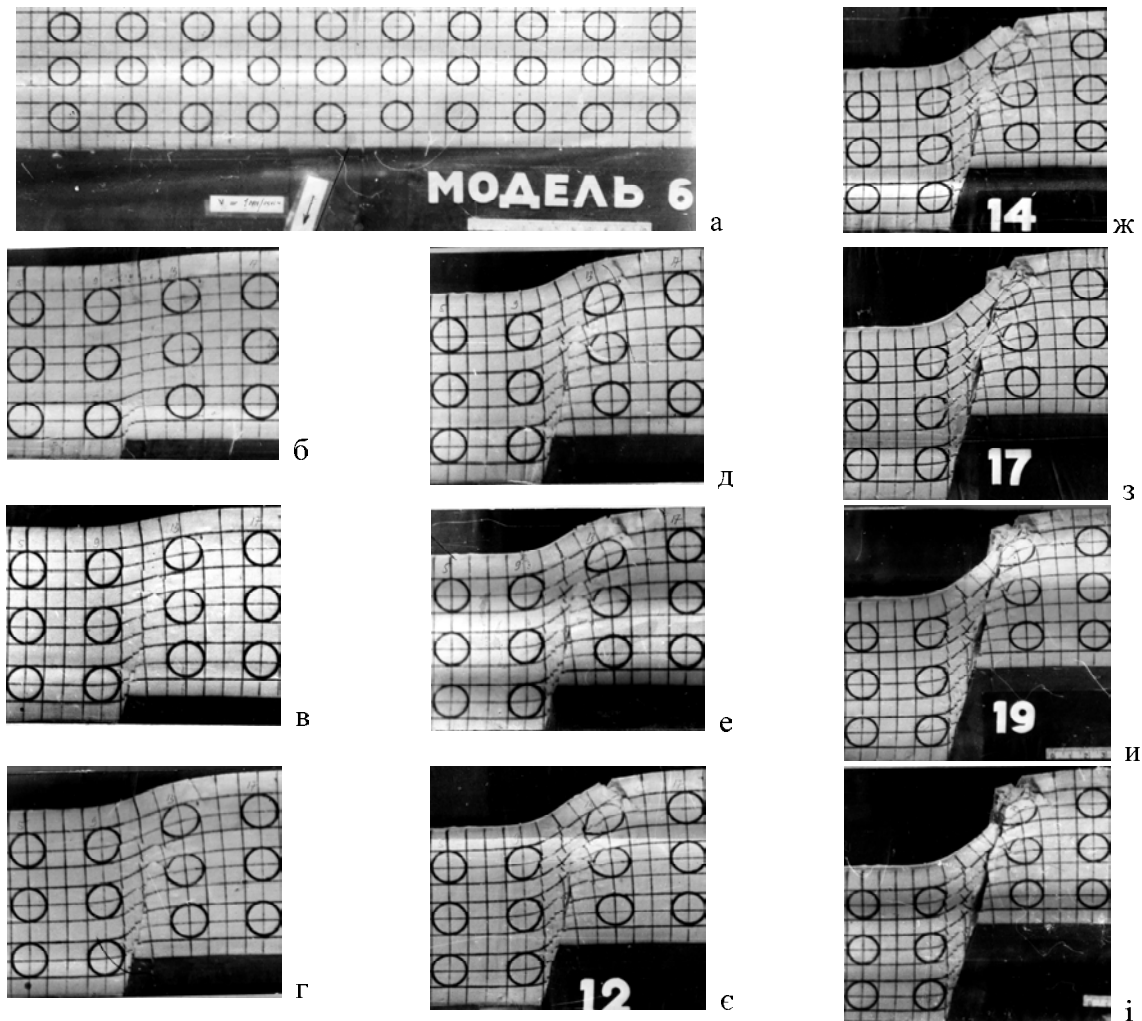


Рис. 3. Розвиток у часі модельованої скидової зони з кутом падіння розриву 75° та швидкістю опускання 1 мм/хв (пояснення в тексті)

Fig. 3. Time evolution of simulated faulting zone with break dip angle 75° and 1 mm/min lowering speed (explanations are in the text)

Порівняно з описаними раніше [Бокун, 1981, 1986, 1988, 1991; Бокун, Назаревич, 2013] процесами формування зон горизонтального зсуву активну участь у формуванні структури ЗСВЗ разом з “тектонічними” (зміщення основи) беруть гравітаційні сили. Саме глибинно-просторовий розподіл цих сил спричиняє змінну в часі концентрацію напружень у різних ділянках досліджуваної моделі і відповідні процеси деформування та тріщиноутворення у ній. Особливості цих процесів для скидових зон з різними кутами падіння і швидкостями деформацій простежено за покроковими фотографіями процесів деформування випробовуваних моделей (рис. 3–8).

У поданому на рис. 3 і 4 експерименті швидкість опускання лежачого крила (блоку II) становила 1 мм/с, кут падіння розриву – 75° . Швидкість зміщень пластин основи (опускання лежачого крила скиду) в інших серіях експериментів становила 1, 5, 20, 100 мм/хв (рис. 5–7: а, б, в та г відповідно).

Загальний характер розвитку модельованих скидових зон (див. рис. 3–8) такий. На початковому етапі деформування за невеликих (5–10 мм) опускань блоку основи під лежачим крилом скиду у прилеглий до зони зміщення області моделі починає розвиватись клиноподібна (з розширенням догори) зона тріщинуватості (так званий клин деструкції), сформована переважно тріщинами відриву, субперпендикулярними до площини зсуву. Зсувні тріщини зароджуються безпосередньо у зоні контакту блоків основи (у зоні максимальної концентрації ріжучих зсувних зусиль) і ростуть також догори, але уже в області розвитку тріщин відриву. Співвідношення між цими системами тріщин визначається описаними вище процесами пластичного деформування та крихкого руйнування, воно залежить як від стадії процесу і реологічних характеристик модельного матеріалу, так і від швидкості опускання блоку основи та кута падіння скидової зони.

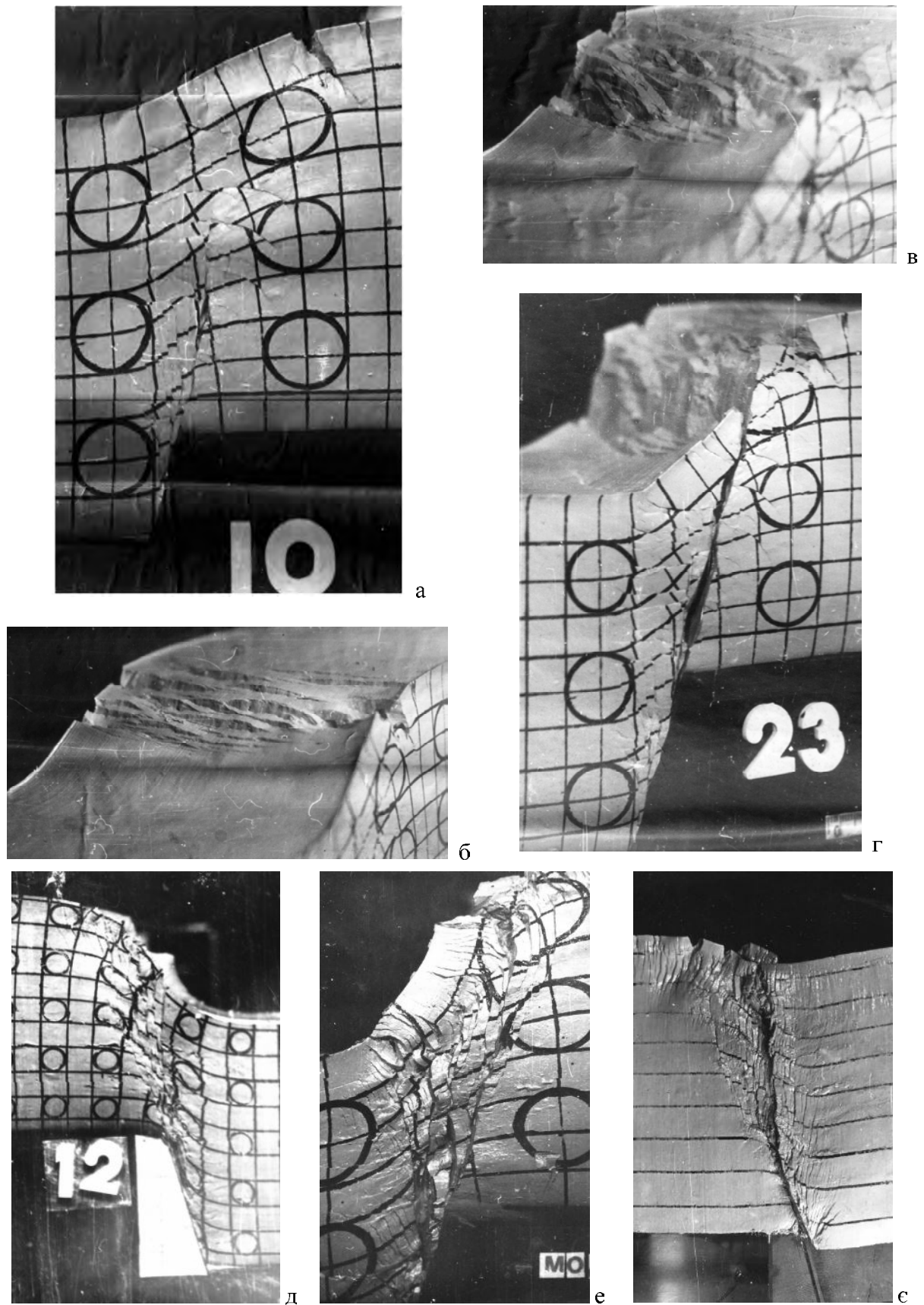


Рис. 4. Деталі розвитку в часі структур модельованої скидової зони з кутом падіння розриву 75° та швидкістю опускання 1 мм/хв (пояснення в тексті)

Fig. 4. Details of time evolution of structures of simulated faulting zone with break dip angle 75° and 1 mm/min lowering speed (explanations are in the text)

З подальшим опусканням блока основи до 15–20 мм (рис. 4–6) клиноподібна тріщинувата зона продовжує розвиватись угору (до 60–80 мм відносно грані нерухомого блока) і пропорційно розширюватись (до ± 20 –25 мм) у верхній частині. Вона захоплює сектор з кутом порядку 27–30° вверх і 20–22° донизу (для кута падіння 75°) від площини скиду (у бік занурюваного та нерухомого блоків відповідно). Тут зауважимо, що саме для цього кута падіння (рис. 4–6) тріщинувата зона є найширшою, а для кута падіння 60° – найвужчою (сектор порядку ± 17 –20° від площини скиду). Для кута падіння 45° ширина клинової тріщинуватої зони є проміжною (сектор з кутом порядку 22–25° догори і 18–20° донизу від площини скиду). До цього також зауважимо, що наведені дані стосуються експериментів з мінімальною (1 мм/хв) швидкістю опускання основи, для більших швидкостей наявні додаткові особливості тріщиноутворення, які проаналізовано далі.

Розглянемо детальніше механіку початкового етапу розвитку тріщинуватої зони з погляду пружно-пластичної (нелінійної) механіки руйнування і теорії лінійної та нелінійної спадкової повзучості. Із початком зміщення падаючого крила розриву на перші 1–2 мм відбуваються такі процеси: нижній край моделі у зоні контакту блоків основи зазнає флексурного згину, він починає припідніматися відносно пластини основи (опущеного крила розриву) і провисати, зазнаючи розтягу у діагональному (під кутом до горизонту) напрямку. У зоні контакту блоків основи з'являються зрізаючі (зсувні) зусилля – з одного боку, тиск основи, спрямований вверх, а з іншого – некомпенсована реакцією основи вага матеріалу моделі, спрямована донизу. У результаті цього в основі моделі у зоні контакту блоків основи починається зрізання (під відповідним зміщеною блоків основи кутом). За малих (1 мм/хв) швидкостей опускання матеріал моделі встигає перебудовуватися, пластично деформуватися, і основним процесом у цій зоні є формування тріщин відриву, які виникають внаслідок того, що у зрізаному нижньому умовному шарі моделі сили зчеплення у зоні зрізу зникають, і провисла над занурюваним блоком частина цього шару зазнає субвертикальних зусиль розтягу під дією власної ваги. Коли дія цих зусиль (із зростанням зміщення та товщини зрізаного шару) зростає і перевищує дію сил зчеплення матеріалу моделі, у зоні зсування (зрізу) починають утворюватись наблизені до горизонтальних (і дуже близькі до нормалі до площини зсуву) тріщини відриву. Ця їх орієнтація повністю визначається рівнодійною сили ваги та реакції опори (клина основи моделі), бокових зон кожного з уявних шарів, тангенціальних сил зчеплення та бокового розпору, пластичних деформацій, тощо, що дає можливість першочергового деформування у напрямку “найбільша сила – найменший опір – найменша міцність”. З початком появи такі тріщи-

ни відриву з'являються досить швидко (швидше, ніж йде процес зрізання у моделі). Це відбувається внаслідок своєрідного ефекту доміно – провисає і відривається (відшаровується) один шар, зникає його дія на сусідній, який, своєю чергою, провисає і відшаровується, за ним наступний, і так до досягнення певної динамічної рівноваги. Наближений до регулярного крок тріщин відриву (це добре видно на кожному з рис. 4–8) якраз і визначається співвідношенням характеристик модельного матеріалу (передовсім це питома вага / внутрішнє зчеплення).

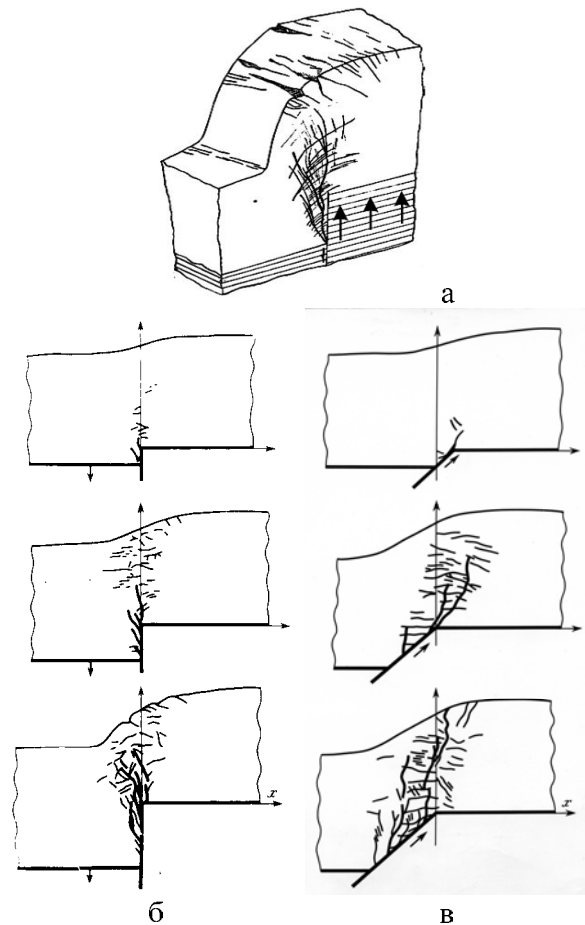


Рис. 5. Структура модельованої вертикальної “скидової” розломної зони (а) (з кутом падіння розриву 90°) та етапи розвитку скидових зон (б, в) [Михайлова, 2009]
Fig. 5. Structure of simulated vertical “faulting” zone (а) (break dip angle 90°) and the stages of evolution of faulting zones (б, в) [Mihajlova, 2009]

У зоні розвитку тріщин відриву (з помітним просторовим відставанням) зростає і зсувна тріщина у площині зсуву. Спочатку, за малих зміщень (10 мм / 10 % від товщини моделі) вона одна, у разі зростання величини зміщення до 20 мм вона може розгалужуватися на 2–3 (які

ростуть у лежаче крило моделі), або вздовж неї з'являються кілька менших опіряючих тріщин. Очевидно, цей процес пов'язаний з перевищенням силами тертя по основному розриву і силою ваги матеріалу моделі сил зчеплення цього матеріалу і бокового розпору у горизонтальних напрямках. Підтвердженням цього (що особливо чітко видно на моделі з кутом падіння розриву 75°) є значне зростання кількості субвертикальних зсувних тріщин за збільшення швидкості деформування (див. рис. 6, б–г у порівнянні з рис. 4, 5 і 6, а). Це також є одним з прикладів впливу на деформаційний процес реології середовища як залежної від швидкості деформацій.

Що стосується приповерхневих шарів моделі, то спочатку вони деформуються пружно-пластично. Але оскільки за подальшого зміщення опущеного блока донизу ці приповерхневі шари видовжуються, вони зазнають зусиль розтягу за рахунок сил зчеплення у матеріалі моделі та

рівнодійної сил ваги шару та реакції опори (розташованого нижче шару). Як тільки ці зусилля починають перевищувати сили зчеплення у матеріалі моделі, на її поверхні з'являються тріщини відриву, які ростуть углиб моделі під кутом $45\text{--}60^\circ$ до поверхні, у протилежну від опускання сторону (рис. 4, г, 6, а). Це відбувається тоді (для моделі з кутом падіння розриву 75°), коли зміщення основи наближається до 20 мм, а зростаюча знизу тріщинувата зона охоплює близько 60% товщини модельного зразка. Причому такі тріщини з'являються швидше при малих ($1\text{--}5$ мм/хв) швидкостях опускання, коли напруження у моделі встигають "краще" перерозподілитися (мігруючи від підлошви моделі до її поверхні) за рахунок реології матеріалу та пластичних деформацій. Подібну закономірність показують і наведені на рис. 5 приклади моделювання вертикальної (з кутом падіння розриву 90°) ЗСВЗ (скид/підкид) [Ребелкий, 2008; Михайлова, 2009].

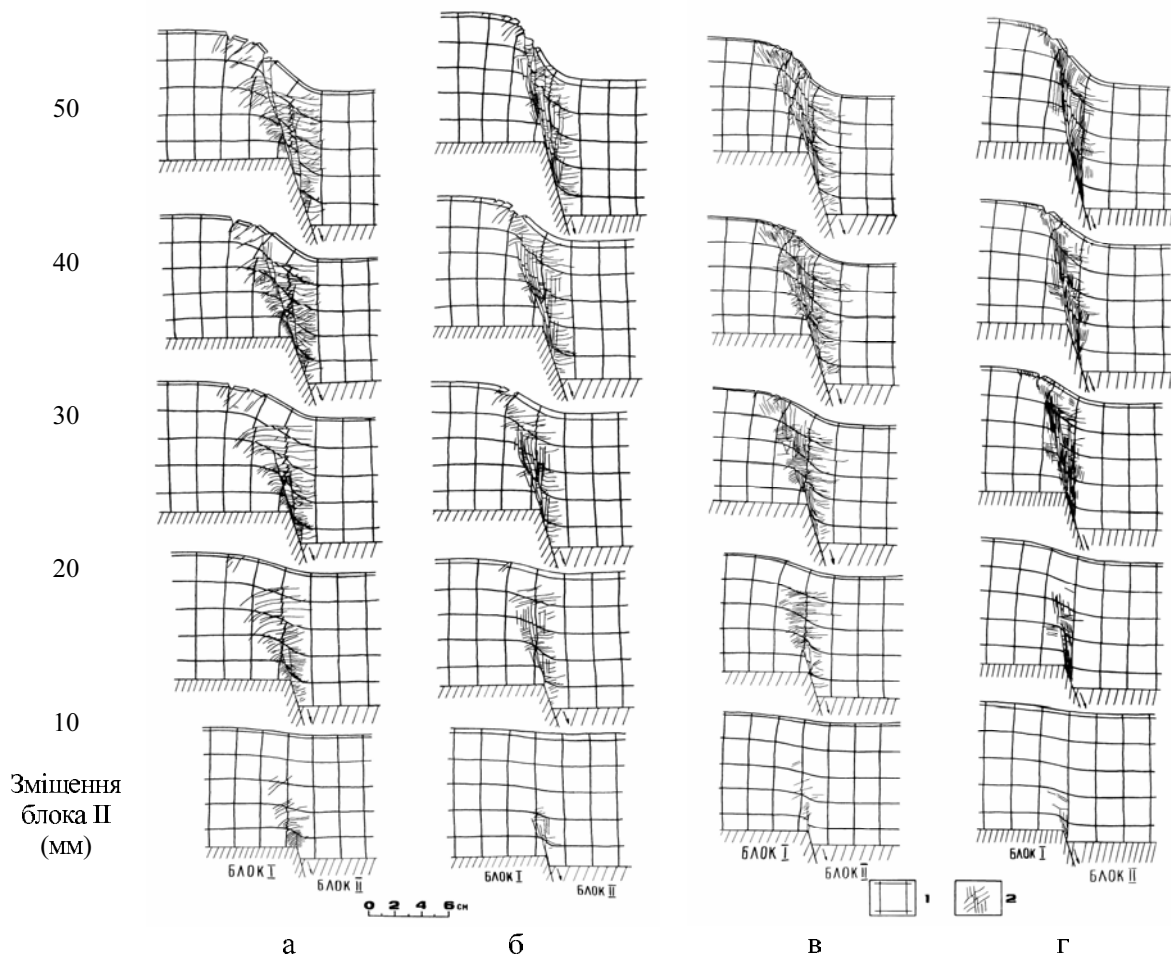


Рис. 6. Розвиток у часі модельованої скидової зони з кутом падіння 75°

(швидкість опускання лежачого крила 1 мм/хв (а), 5 мм/хв (б), 20 мм/хв (в), 100 мм/хв (г);

1 – маркувальна координатна сітка з кроком 20×20 мм; 2 – тріщини)

Fig. 6. Time evolution of simulated faulting zone with break dip angle 75° (lowering speed 1 mm/min (a), 5 mm/min (b), 20 mm/min (v), 100 mm/min (z);

1 – marking grid with 20×20 mm grid pitch; 2 – cracks)

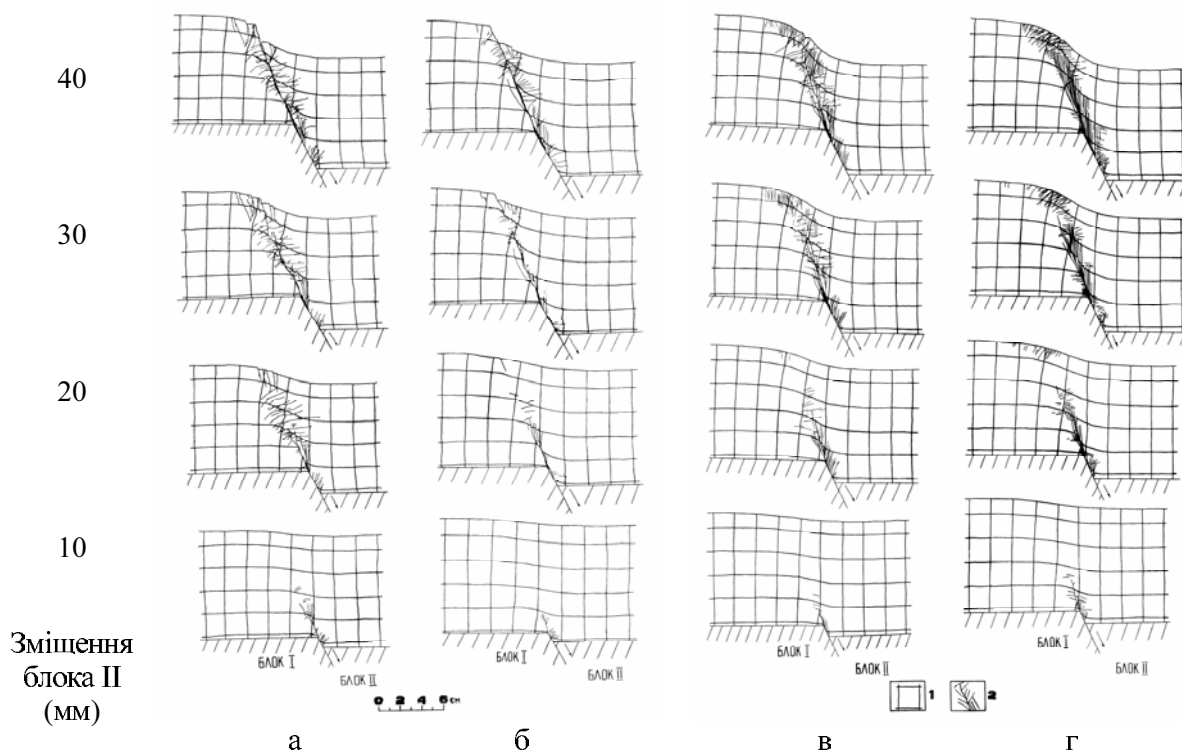


Рис. 7. Розвиток у часі модельованої скидової зони з кутом падіння 60° (швидкісні режими і умовні позначення, як на рис. 6)

Fig. 7. Time evolution of simulated faulting zone with break dip angle 60° (speed modes and legend as in Fig. 6)

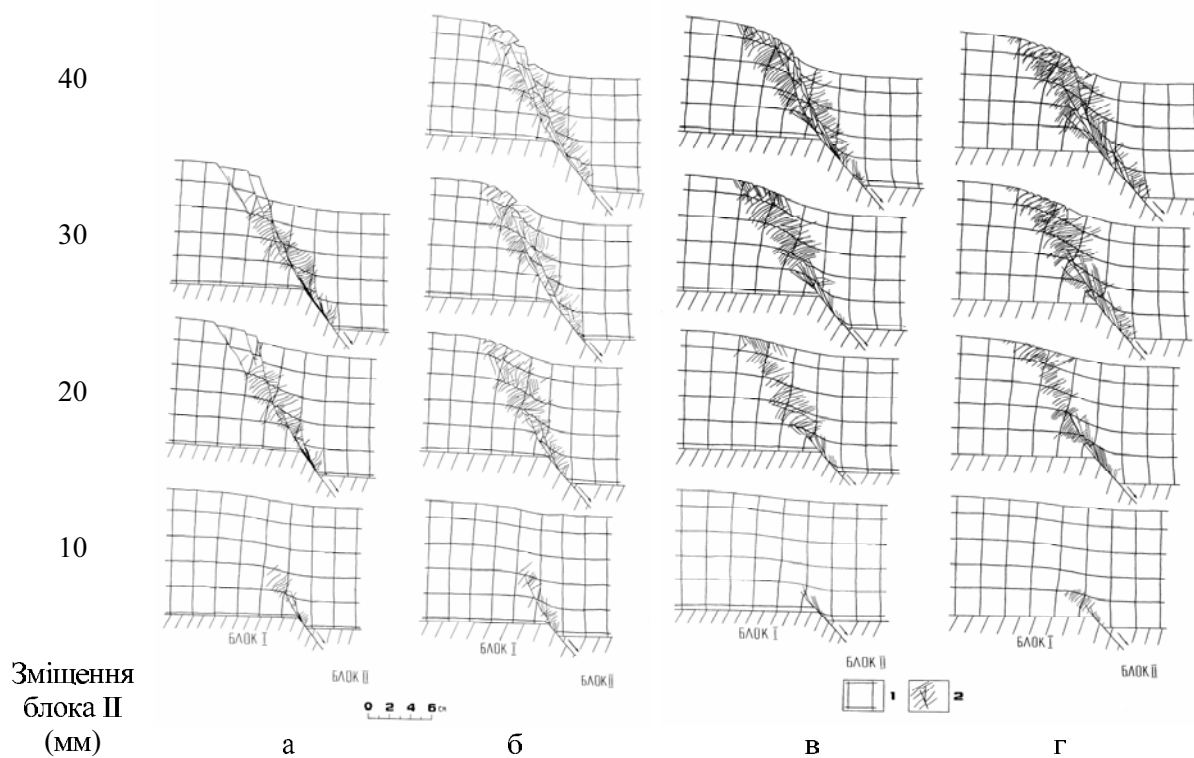


Рис. 8. Розвиток у часі модельованої скидової зони з кутом падіння 45° (швидкісні режими і умовні позначення, як на рис. 6)

Fig. 8. Time evolution of simulated faulting zone with break dip angle 45° (speed modes and legend as in Fig. 6)

За подальшого опускання лежачого крила скиду до 30 мм (30 % від товщини моделі) глибинна та приповерхнева тріщинуваті зони, сформовані тріщинами відриву, зливаються (перевсім за рахунок зростання на 80–90 мм угору глибинної зони – на відстань у 2,5–3 рази більшу від величини зміщення основи. На поверхні моделі у зоні проекції на неї площини скиду (зона найбільших приповерхневих деформацій) за рахунок зміщень берегів утворених тут раніше приповерхневих тріщин (див. рис. 4, *д–є*, 5, *а, б, в, а*) починається формування скидового уступу.

З подальшим зануренням лежачого крила скиду до 40 мм (40 % від товщини моделі) в області утвореної до цього сітки тріщин відриву активно ростуть тріщини зсуву, які прорізують цю зону практично до поверхні, формуючи магістральну тріщину – площину зсуву, і за дальшого опусканні блоку основи до 50 мм зміщення відбуваються вже практично тільки по цій площині (див. рис. 4, *ж–і*, 5, *в, з, б, а*).

Щодо зони формування тріщин зсуву зазначимо, що вони формуються у значно вужчому, ніж тріщини відриву, клині (див. рис. 5–8). Так для зсуву з кутом 75° (рис. 6) – це у зоні від площини зсуву і до вертикалі відносно точки занурення основи опущеного крила моделі, тобто в клині з кутом порядку 25° , і майже не порушують лежаче крило (в зоні нижче площини зсуву). З поширення угору такі тріщини відхиляються у напрямку вертикалі або зароджуються вже як субветрикальні (див. рис 5, *д–є*, рис. 6, для зміщень 40 і 50 мм). Активність утворення зсувних тріщин (їхня кількість і густина) помітно зростає із збільшенням швидкості деформування до 5, 20 і 100 мм/хв. (рис. 6, *б–з*). Також під час зростання швидкості деформування значно зменшується зона (клин) розвитку тріщин відриву, особливо у лежачому крилі скиду (див. рис. 6, *б–з* порівняно з рис. 6, *а*), а за великої швидкості (100 мм/хв.) – і у висячому, наближаючись до розмірів клину тріщин зсуву (рис. 6, *з*).

Порівнюючи зсуви з кутом падіння розриву 45° і 60° (рис. 7 і 8 відповідно) з описаним вище зсувом з кутом падіння розриву 75° (рис. 6), відзначимо таке. Конус порушень (тріщинуватості) для зсуву з кутом падіння розриву 60° є, як уже зазначалося вище, найвужчим (порівняно з таким для кута 75°), а для кута 45° – середнім. За швидкостей деформацій (зміщень основи) 1 і 5 мм/хв магістральна тріщина зсуву для кута 60° (аналогічно і для кута 45°) формується вже за зміщення основи у 40 мм, а не за 50 мм як це наявне для кута 75° .

Стосовно особливостей, пов'язаних із швидкістю деформацій, можна зазначити таке. Магістральна тріщина для кутів падіння площини зсуву 75° і 60° (рис. 6 і 7) активніше формується за малих (1 і 5 мм/хв) і великої (100 мм/хв) швидкостей деформації, а за швидкості 20 мм/хв навіть у разі

зміщень 50 мм (рис. 6) зона деформацій порушена тільки сіткою тріщин зсуву вялової структури (у клині деструкції). Невипадковість цього доводить і рис. 7 (кут 60°), де для швидкості 20 мм/хв також наявна не магістральна тріщина, а тільки клин деструкції з сіткою тріщин зсуву і відриву, причому останні тут є помітними в сумарних деформаціях і зміщеннях.

Для кута падіння розриву 60° зазначимо мінімальну ширину клина деструкції та мінімальну кількість другорядних тріщин, особливо для швидкості деформації 5 мм/хв.

Для кута падіння розриву 45° масмо пришвидшений розвиток зони деструкції вгору – вже в разі зміщень 20 мм вона захоплює всю товщину моделі, а за малої (1 мм/хв) швидкості деформації встигає навіть сформуватись магістральна тріщина. Ще одна характерна для цього кута падіння розриву особливість – помітне відхилення зони деструкції і тріщин зсуву (зокрема магістральної) вгору від площини зміщення (рис. 8), тобто ці елементи структури під час поширення вгору відхиляються в напрямку вертикалі (стають більш крутими), змінюючи свій напрямок (кут падіння) на шораз ближчий до 60° . Також ще раз відзначимо, що для кута 45° магістральна тріщина при малій швидкості деформації (1 мм/хв) формується вже за зміщень 20 мм, а при більшій (5 мм/хв) – за 30 мм.

Також треба зазначити вплив співвідношень між механічними характеристиками модельного матеріалу і коефіцієнтом тертя в зоні розлому на активність розвитку зони тріщинуватості вглиб по падінню площини скиду, ці особливості проявляються під час порівняння результатів, отриманих А. В. Михайловою (рис. 5, *в*) і даних нашого моделювання (рис. 6–8).

Проблема врахування впливу літостатичного тиску та інших природних факторів

Описане вище фізичне моделювання добре відтворює “прості” геомеханічні процеси (наближений природний еквівалент – деформування осадочного чохла на глибинах до 1,5–2 км під час субветрикальних рухів блоків фундаменту), тобто процеси, у яких основним фактором є механічні навантаження на модель (аналог тектонічних сил). У такому моделюванні, як показують оцінки низки авторів [Ребецький, 1988, 2008; Ребецький, Михайлова, 2009], слабо (з коефіцієнтом порядку 0,1 і менше) відтворюється вплив масових сил – сили ваги (літостатичного тиску) на стан, характеристики та особливості деформування порід у природних умовах. Також тут зовсім не відтворюється вплив зростання температури з глибиною, вплив на процеси структуроутворення тиску флюїдів (зокрема високотемпературних глибинних) та інших факторів.

Зокрема, як було показано, наприклад, у [Ребецький, 2008], для початкового гравітаційного на-

пруженого стану (присутнього завжди, незалежно від наявності тектонічних сил) досягнення межі тріщинної “текучості” в консолідованих гірських породах можливе уже на глибинах 1–2 км у разі їх підвищеної тріщинуватості (зниженої когезії – ефективної міцності зчеплення) і з урахуванням розушільнювального впливу флюїдного тиску. У цих умовах починає проявлятися так зване катакlastичне деформування (течія) гірських мас, яке відбувається за рахунок активізації сукупності крихких мікротріщин (масштабу менше 1% від масштабу розглядуваної тріщинуватої зони). Воно виглядає подібно до пластичної течії за рахунок масштабу усереднення і фактично є псевдопластичністю.

Для фізичного моделювання описаних у попередніх підрозділах процесів з пропорційним до природних умов відтворенням впливу лігостатичного тиску необхідне центрифугування моделей, що значно ускладнює експерименти, тому в цих випадках останнім часом поширенішим є математичне моделювання ([Ребелкий, 1988, 2008; Осокіна, 2000; Томилин, 2005; Дамаскинская, Томилин, 2005, 2009; Хомяк, Хомяк, 2014] та ін.). У такому моделюванні часто використовується критерій Кулона–Мора (він добре описує квазікатакlastичну текучість порід – мезорівень), що дає можливість отримати прості аналітичні розв’язки задачі. Може використовуватись критерій Друкер–Прагера, який краще описує процеси мікрорівня – квазіпластичну текучість (за рахунок мікротріщинуватості порід).

Моделювання деяких геофізичних ефектів у зонах СВЗ

Цікаві результати отримано під час моделювання геофізичних ефектів у зонах СВЗ. Зокрема, вивчення динаміки змін електричного опору гірських порід під час розвитку ЗСВЗ скидової кінематики за методиками, аналогічними до реалізованих О. М. Бокуном, проведено В. І. Шамотком з колегами [Шамотко та ін., 1993]. Відмінність від описаних вище експериментів полягала у тому, що в моделі, виконаній з бентонітової глини, поблизу майбутньої тріщинуватої зони створювалась каверна, в яку заливався модельний флюїд з низьким питомим опором (розчин кухонної солі). У різних ділянках моделі встановлювались електроди, за допомогою яких контролювались зміни опору. Розвиток тріщин у моделі на різних стадіях деформування ілюструє рис. 9, а, зміни опору у різних ділянках моделі ілюструють криві 1 і 2 на рис. 9, б).

Упродовж моделювання під час розвитку тріщинуватої зони (див. рис. 9, а) розчин спочатку проникає у тріщину цієї зони, знижуючи тут опір (рис. 9, а, стадія 3, рис. 9, б – етап II), пізніше з деяких зон (де починає переважати режим стику) він витискається (рис. 9, а, стадія 3), і тут опір зростає (рис. 9, б – етап III, початок, крива 1). За подальшого розвитку тріщиноутворення (аж до

утворення магістральної тріщини (рис. 9, а, стадія 4) провідний флюїд міг знову проникати у тріщинувату зону, знижуючи її опір (рис. 9, б – етап III,), що особливо яскраво ілюструє крива 2.

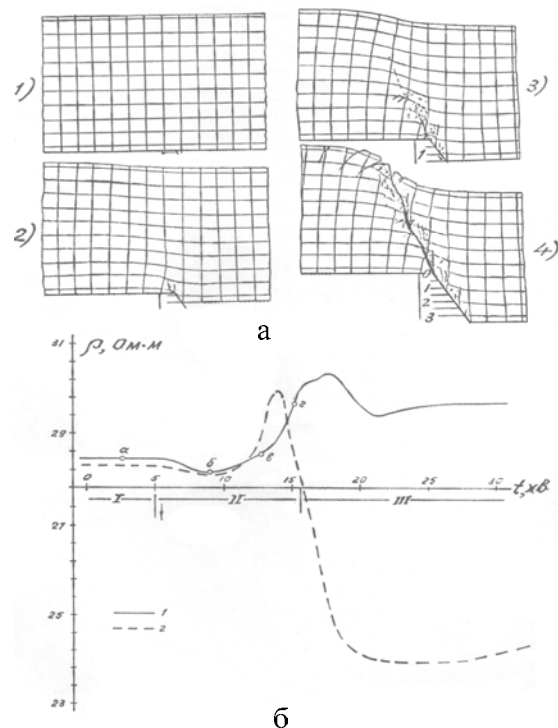


Рис. 9. Моделювання ефектів змін опору / провідності у активних скидових зонах [Шамотко та ін., 1993]:

тут а – стадії деформування моделі;
б – зміни опору в різних зонах моделі)

Fig. 9. Modeling of electrical resistance / conductivity changes effects in active faulting zones [Shamoto et al., 1993] (a – model deformation stages;

b – changes of resistance in different parts of the model

Наукова новизна

За даними фізичного моделювання, встановлено характерні часово-просторові закономірності розвитку процесів субвертикального розривоутворення, їх залежність від кута падіння розриву та швидкості зміщення блоку основи. Оцінено вплив різних механічних характеристик середовища на характер розвитку процесу та структуру тріщинуватих зон.

Практична значущість

Результати досліджень дають можливість, з одного боку, надійніше прогнозувати (а значить, і моніторити) зони проявів приповерхневих ефектів від глибинних ЗСВЗ, а з іншого, за результатами поверхневих досліджень прогнозувати наявність, локалізацію та характеристики глибинних ЗСВЗ, а

також характер і характеристики геодинамічних та сейсмотектонічних процесів у таких зонах. Це є важливим для геодинамічного моніторингу, для пошуків нафти і газу та інших корисних копалин, для інженерної геології і геофізики, для гео-екології та ін.

Висновки

Підсумовуючи це дослідження, можна констатувати, що результати фізичного моделювання і різноманітних польових геолого-геофізичних досліджень висвітлюють з різних сторін і часово-просторових масштабних рівнів складну, але закономірну динаміку поширених у природних умовах зон субвертикального зсуву (ЗСВЗ) і, зокрема, скидових зон.

У межах платформ і складчастих областей жорсткі блоки фундаменту, рухаючись вертикально по розломах, деформують розташовані вище осадові товщі гірських порід, формуючи у них складки (зокрема, флексурні згини) і розривні порушення скидової кінематики. За фізичного моделювання таких процесів простежено формування системи розривів різного рангу та генезису, які в сукупності формують субветрикальну розривну зону. Упродовж моделювання отримано інформацію про генезис різних розривних порушень під час формування таких зон, про просторово-часові зв'язки між системами розривних порушень різної кінематики та просторово-часові закономірності їх формування. Основний висновок – простягання розривної зони визначається нахилом розлому в жорсткій основі (фундаменті), а її внутрішня структура – швидкістю руху блоку основи. Цією швидкістю визначаються кількісні співвідношення між тріщинами різних систем та ширина зони загалом. Така інформація є важливою, наприклад, у нафтогазопошукових дослідженнях, зокрема, під час обґрунтування місць закладання пошукових та розвідувальних свердловин.

Література

Бобров А. А. Исследование объемной активности района в разломных зонах Приольхонья и южного Приангарья : методика и предварительные результаты / А. А. Бобров // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск : Изд. ИрГТУ. – 2008. – № 6 (32). – С. 124–129.

Бойко Г. Ю. Глибинна геологічна будова Карпатського регіону / Г. Ю. Бойко, П. Ю. Лозиняк, Х. Б. Заяць, С. Г. Анікєсв, М. Й. Петрашківич, В. В. Колодій, О. П. Гайванович // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2003. – № 2. – С. 52–61.

Бокун А. Н. Зоны скальвания в однослойных моделях из влажной глины / А. Н. Бокун // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в

образовании месторождений полезных ископаемых. – Л. : МТК АН СССР. – 1988. – Вып. 1. – С. 83–85.

Бокун А. Н. Развитие и характер трещин в моделях флексурного изгиба / А. Н. Бокун // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. – М. : Наука, 1985. – С. 220–227.

Бокун А. Н. Результаты тектонофизического моделирования зон горизонтального сдвига и использование их при поисках углеводородов / А. Н. Бокун // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы докладов Всероссийской конференции. 13–17 октября 2008 г. – М. : ИФЗ РАН. – 2009. – С. 135–137.

Бокун А. Н. Соляные структуры Солотвинской впадины / А. Н. Бокун. – К. : Наук. думка, 1981. – 135 с.

Бокун А. Н. Структурообразование в слабokonсолидированных осадках северо-восточной котловины Тихого океана (по данным моделирования) / А. Н. Бокун // Механизмы структурообразования в литосфере и сейсмичность. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума “Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии”. – М. : ИФЗ, 1991. – С. 116–118.

Бокун О. М. Структура і динаміка зон горизонтального зсуву (за результатами фізичного моделювання і польових досліджень) / О. М. Бокун, А. В. Назаревич // Геодинаміка. – 2013. – № 1 (14) – С. 129–141.

Бондаренко П. М. Моделирование полей напряжений и прогноз дислокаций в сдвиговых зонах / П. М. Бондаренко // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. – Л. : МТК АН СССР. – 1988. – Вып. 1. – С. 71–74.

Борняков С. А. Внутренняя структура сдвиговых зон (по результатам физического моделирования) / С. А. Борняков // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М. В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы докладов Всероссийской конференции. 13–17 октября 2008 г. – М. : ИФЗ РАН. – 2009. – С. 138–139.

Борняков С. А. Динамические критерии самоорганизации системы разрывов в сдвиговой среде (по результатам физического моделирования) / С. А. Борняков // Доклады РАН. – 2008. – Т. 420, № 6. – С. 822–824.

Борняков С. А. Диссипативные структуры зон разломов и критерии их диагностики (по результатам физического моделирования) / С. А. Борняков, А. В. Черемных, В. А. Трусков // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 2. – С. 179–187.

Васильев Е. П. Модель присдвигового куполообразования / Е. П. Васильев // Сдвиговые текто-

- нические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых (Тезисы докладов Первого Всесоюзного совещания). Вып. 1. – Л. : ЛГИ, 1988. – С. 64–66.
- Гзовский М. В. Волнистость простирания крупных тектонических разрывов / М. В. Гзовский // Изв. АН СССР. – 1953. – № 2. – С. 101–114.
- Гзовский М. В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория / М. В. Гзовский. – М. : Изд. АН СССР. – 1963. – Ч. 3, 4. – 544 с.
- Гзовский М. В. Основы тектонофизики / М. В. Гзовский. – М. : Наука, 1975. – 536 с.
- Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины / О. Б. Гинтов. – К. : Феникс, 2005. – 572 с.
- Гинтов О. Б. Дилатансионное разуплотнение в сдвиговых зонах Украинского щита / О. Б. Гинтов, В. М. Исай, Л. В. Исай // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых (Тезисы докладов Первого Всесоюзного совещания). Вып. 1. – Л. : ЛГИ, 1988. – С. 88–91.
- Гончарук А. Ф. Рудоконцентрирующие структуры и этапы вулканотектонического развития Берегово-Беганської золотоносної зони Закарпаття / А. Ф. Гончарук, В. А. Степанов, Л. І. Веремесенко, В. М. Кулібаба, Т. І. Шемякіна // Вісн. ЛНУ. Сер. геол. – 1994. – Вип. 12. – С. 168–177.
- Гордиенко В. В. Украинские Карпаты (геофизика, глубинные процессы) / В. В. Гордиенко, И. В. Гордиенко, О. В. Завгородняя, С. Ковачикова, И. М. Логвинов, В. М. Тарасов, О. В. Усенко. – К. : Логос, 2011. – 129 с.
- Григорчук Г. Ю. Геолого-структурна позиція золотого і поліметалевого зруденіння – критерій глибинного прогнозу руд / Г. Ю. Григорчук. – Вісн. ЛНУ ім. І. Франка. Сер. геол. – 1992. – Вип. 11. – С. 153–159.
- Дамаскинская Е. Е. Моделирование напряженного состояния тектонических разломов методом конечных элементов / Е. Е. Дамаскинская, Н. Г. Томилин // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М. В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Матер. докл. Всеросс. конф. 13–17 октября 2008 г. – М. : ИФЗ РАН. – 2009. – С. 143–144.
- Демчишин М. Г. Современная динамика склонов на территории Украины / М. Г. Демчишин. – К. : Наук. думка, 1992. – 254 с.
- Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат / під ред. В. І. Старостенка. – К. : Наук. думка. – 2005. – 256 с.
- Зоценко М. Л. Инженерная геология. Механика грунтов. Основы та фундаменти / М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко. – Полтава : ПНТУ, 2004. – 446 с.
- Иванов И. П. Инженерная геодинамика / И. П. Иванов, Ю. Б. Тржцинский. – СПб. : Наука, 2001. – 416 с.
- Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П. Л. Иванов. – М. : Высшая школа, 1991. – 447 с.
- Исай В. М. Реологические свойства консолидированной коры и некоторые закономерности разломообразования (на примере Украинского щита) / В. М. Исай // Геофиз. журн. – 1989. – 11, №3. – С. 40–52.
- Китык В. И. Галогенные формации Украины : Закарпатский прогиб / В. И. Китык, А. Н. Бокун, Г. М. Панов, Е. П. Сливко, В. С. Шайдецкая. – К. : Наук. думка, 1983. – 168 с.
- Ковалишин З. И. Флюидный режим гидротермальных процессов Закарпаття / З. И. Ковалишин, М. Д. Братусь. – К. : Наук. думка, 1984. – 86 с.
- Кравчук Я. С. Геоморфология Полонинсько-Черногірських Карпат / Я. С. Кравчук. – Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2008. – 188 с.
- Крупський Ю. З. Геодинамічні умови формування і нафтогазоносність Карпатського та Волино-Подільського регіонів України / Ю. З. Крупський. – К. : УкрДГРІ, 2001. – 144 с.
- Куксенко В. С. Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях / В. С. Куксенко. – М. : Наука, 1987. – С. 12–36.
- Лозиняк П. Ю. Неогенова та сучасна геодинаміка і сейсмічність літосфери Закарпаття / П. Ю. Лозиняк, А. В. Назаревич, Л. Є. Назаревич // Геодинаміка. – 2011. – 2 (11). – С. 170–172.
- Лукьянов А. В. Горизонтальные движения по разломам, происходящие при современных катастрофических землетрясениях / А. В. Лукьянов // Тр. ГИН АН СССР. – М. : Изд. АН СССР. – 1963. – Вып. 80. – С. 34–112.
- Лящук Д. Н. Геоелектромагнітноемісійний метод в моніторинзі локальних геодинамічних процесів / Д. Н. Лящук, А. В. Назаревич, Л. Є. Назаревич // Вісник КНУ ім. Т. Шевченка. Геологія. – 2003. – № 26–27. – С. 92–97.
- Максимчук В. Динаміка аномального магнітного поля Землі / В. Максимчук, Ю. Городиський, В. Кузнецова. – Львів : Євросвіт, 2001. – 306 с.
- Матковський О. І. Родовища та рудопрояви золота Українських Карпат / О. І. Матковський // Вісник ЛНУ ім. І. Франка. Сер. геол. – 1992. – Вип. 11. – С. 96–120.
- Механика грунтов, оснований и фундаментов / под ред. С. Б. Ухова. – Для вузов 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2002. – 586 с.
- Михайлова А. В. Изучение механизмов деформирования тектонических структур в слое над движущимися блоками фундамента (на моделях) / А. В. Михайлова // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М. В. Гзовским лаборатории текто-

- нофізики в ИФЗ РАН. Материалы докладов Всероссийской конференции. 13–17 октября 2008 г. – М. : ИФЗ РАН. – 2009. – С. 145–147.
- Михайлова А. В. Методика количественной оценки перемещений и напряжений в пластических непрозрачных моделях / А. В. Михайлова // Тектонофизика и механические свойства горных пород. – М. : Наука. – 1971. – С. 38–48.
- Назаревич А. В. Геодинаміка і особливості сейсмотектонічного процесу Берегівської горстової зони (Закарпаття) / А. В. Назаревич, Л. Є. Назаревич // Геодинаміка. – 2000. – № 1(3). – С. 131–147.
- Назаревич А. В. Геодинаміка і тріщинуватість породних масивів (на прикладі Берегівського горбогір'я в Закарпатті) / А. В. Назаревич, Л. Є. Назаревич // Науковий вісник НГАУ. – 2001. – № 4. – С. 23–24.
- Назаревич А. В. Геодинаміка, тектоніка та сейсмічність Карпатського регіону України / А. В. Назаревич, Л. Є. Назаревич // Геодинаміка. – 2013. – № 2(15) – С. 247–249.
- Назаревич А. В. Глибинні особливості сейсмотектонічного процесу в Українських Карпатах / А. В. Назаревич, Л. Є. Назаревич // Матер. XII Міжнар. конф. “Геоінформатика : теоретичні та прикладні аспекти”, 12–15 травня 2014 року, м. Київ. – Київ. – 2014 (CD). 05/2014; DOI :10.3997/2214-4609.20140419.
- Назаревич А. В. Масштабно-енергетичні кореляційні співвідношення для вогнищ землетрусів Закарпаття : деякі наслідки та енергетична верифікація / А. В. Назаревич, Л. Є. Назаревич // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2009. – С. 279–298.
- Назаревич А. В. Параметричні сейсмогеоакустичні методи і комплексні технології моніторингу природних та техногенних геодинамічних процесів та прогнозу катастроф / А. В. Назаревич, Л. Є. Назаревич // Вісник КНУ ім. Т. Шевченка. Геологія. – 2002. – № 23–24. – С. 43–47.
- Назаревич Л. Є. Сейсмічність і деякі особливості сейсмотектоніки Українських Карпат / Л. Є. Назаревич, А. В. Назаревич // Геодинаміка. – 2012. – № 1(12). – С. 145–151.
- Назаревич Л. Є. Особливості вогнища Берегівського землетрусу 1965 року за комплексом даних (геоінформаційні аспекти) / Л. Є. Назаревич, А. В. Назаревич // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2005. – Т. 2. – С. 74–79.
- Назаревич Л. Є. Особливості підготовки та характеристики вогнища Берегівського землетрусу 1965 року (за макросейсмічними даними) / Л. Є. Назаревич, А. В. Назаревич // Геодинаміка. – 2006. – № 1(5). – С. 61–74.
- Назаревич Л. Є. Характеристики сейсмічності і сейсмотектонічного процесу в зонах Карпатського регіону : автореф. дис. ... канд. геол. наук / Л. Є. Назаревич. – К. : ІГФ. – 2006. – 21 с.
- Назаревич Л. Є. Характерні риси сейсмотектонічного процесу в літосфері Буковини та прилеглих територій / Л. Є. Назаревич, А. В. Назаревич // Геодинаміка. – 2007. – № 1(6). – С. 49–54.
- Осокина Д. Н. Исследование механизмов деформирования массива в зоне разрыва на основе изучения трехмерного поля напряжений (математическое моделирование) // М. В. Гзовский и развитие тектонофизики. – М. : Наука, 2000. – С. 220–245.
- Осокина Д. Н. Поле напряжений в окрестностях конца разлома как фактор, определяющий развитие нарушений второго порядка, характер роста разлома, разрушения массива и сейсмичности / Д. Н. Осокина // Фундаментальные проблемы геотектоники : матер. X Тектонического совещания. – М. : ГЕОС. – 2007. – Т. 2. – С. 62–66.
- Полівцев А. В. Карта вертикальних голоценових рухів Волино-Поділля та Передкарпаття / А. В. Полівцев // Геодинаміка. – 2011. – № 1(10). – С. 58–70.
- Ребецкий Ю. Л. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных перемещений / Ю. Л. Ребецкий // Физ. мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 66–73.
- Ребецкий Ю. Л. Напряженное состояние слоя при продольном сдвиге / Ю. Л. Ребецкий // Известия АН СССР. сер. Физика Земли. – 1988. – № 9. – С. 29–35.
- Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов / Ю. Л. Ребецкий. – М. : Наука, 2007. – 406 с.
- Сеинский К. Ж. Моделирование крупных сдвиговых зон и специфика развития их крыльев / К. Ж. Сеинский // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. – Л. : МТК АН СССР. – 1988. – Вып. 1. – С. 74–77.
- Сеинский К. Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект / К. Ж. Сеинский, А. С. Гладков, О. В. Лунина, М. А. Тугарина. – Новосибирск : Наука, 2005. – 293 с.
- Скакун Л. З. Золоте зруденіння Берегівського рудного поля (геолого-структурна позиція і мінералогічна типізація) / Л. З. Скакун, О. І. Магковський, М. Ф. Гожиц, Б. Г. Ремешило, В. М. Шклянка // Вісник ЛНУ ім. І. Франка. Сер. геол. – 1992. – Вип. 11. – С. 128–145.
- Стоянов С. С. Механизм формирования разрывных зон / С. С. Стоянов. – М. : Недра, 1977. – 144 с.
- Толстой М. І. Вивчення провісників локальних землетрусів засобами їх прямої оцінки / М. І. Толстой, О. В. Шабатура // Геодинаміка. – 2014. – № 1(16). – С. 103–112.

- Томилині Н. Г. Статистическая кинетика разрушения горных пород и прогноз сейсмических явлений / Н. Г. Томилині, Е. Е. Дамаскинская, П. И. Павлов // ФТТ. – 2005. – Т. 47, № 5. – С. 955–959.
- Хомяк Л. М. Моделювання напружено-деформованого стану осадового комплексу автохтону в зоні динамічного впливу насувного клину / Л. М. Хомяк, М. М. Хомяк // Геодинаміка. – 2014. – № 1(16). – С.61–74.
- Чебаненко И. И. Особенности развития трещиноватости пород кристаллического фундамента в разломных зонах Днепровско-Донецкой впадины / И. И. Чебаненко, Б. И. Малюк, А. Н. Бокун, В. П. Ключко, М. И. Пономаренко // Тектоника и стратиграфия. – 1990. – Вып. 31. – С. 9–12.
- Шамотко В. І. Електрометричний контроль геодинамічних процесів / В. І. Шамотко, А. І. Білінський, І. П. Мороз // Геолого-геофізичні проблеми сейсмічного районування території західних областей України. – Львів, 1993. – С. 53–55. (препр. / АН України. ППММ; 17–93).
- Шашенко А. Н. Механика горных пород / А. Н. Шашенко, В. П. Пустовойтенко. – К. : Новый друк, 2003. – 400 с.
- Швец В. Б. Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти / В. Б. Швец, І. П. Бойко. – Дніпропетровськ : Пороги, 2012. – 231 с.
- Юркевич О. И. Повторное нивелирование Береговского землетрясения 24 октября 1965 г. / О. И. Юркевич, Б. И. Волосепкий, Н. С. Зяблюк // Сейсмичность Украины. – К. : Наук. думка, 1969. – С. 103–106.
- Chemenda A. Strain partitioning and interpolate friction in oblique subduction zones : Constraints provided by experimental modeling / A. Chemenda, S. Lallemand, A. Bokun // J. Geophys. Res. S. E. – 2000. – Vol. 105. – Issue B3. – P 5567–5581.
- Graham R. H. Wrench faults, arcuate fold and deformation in the southern French Alps / R. H. Graham // Proc. Geol. Assoc. – 1978. – No 89. – P. 125–142.
- Harding T. P. Petroleum Traps associated with wrench faults / T. P. Harding // Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. – 1974. – No 58. – P. 1290–1304.
- Kuksenko V. A two-stage model of fracture of rocks / V. Kuksenko, N. Tomilin, E. Damaskinskaya and D. Lockner // Pure Appl. Geophys. – 1996. – Vol. 146. – No 2. – P. 253–263.
- Odonne F. and Vialon P. Analogue models of folds above a wrench fault // Tectonophysics. – 1983. – No 99. – P. 31–46.
- Osokina D. N. Second rank fractures and 3D stress & strain local fields of fault with sides friction as ones development stages evidence : theory, experiment and natural examples (on the basis of “fracture-crack” and “fracture – shear zone” models study) / D. N. Osokina, F. L.Yakovlev, V. N. Voitenko // Geophysical Research Abstract. – 2007. – Vol. 9. – P. 10465.
- Richard P. Structures en fleur positives et décrochements crustaux : modelisation analogique et interpretation mecanique / P. Richard and P. R. Cobbold // C. R. Acad. Sci. Paris. – 1989. – No 308, II. – P. 553–560.
- Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen / W. Riedel // Zentral bl. Fur Mineralogie. Abt. Geol. Und Palaont. – Berlin. – 1929. – P. 354–368.
- Sylvester A. G. Strike-slip faults / A. G. Sylvester // Geol. Soc. Am. Bull. – 1988. – № 100. – P. 1666–1703.
- Tchalenko J. S. Similarities between shear zones of different magnitudes / J. S. Tchalenko // Geol. Soc. Am. Bull. – 1970. – No 81. – P. 1625–1640.
- Wilcox R. E. Basik Wrench tectonics / R. E. Wilcox, T. P. Harding and D. R. Seely // Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. – 1973. – No 57. – P. 74–96.

А. В. НАЗАРЕВИЧ¹, А. Н. БОКУН², Л. Е. НАЗАРЕВИЧ³

¹Карпатское отделение Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, 79060, г. Львов, ул. Научная, 3-б, тел. +38 (032) 2648563, эл. почта nazarevych-a@cb-igph.lviv.ua

²Институт геологии и геохимии горючих ископаемых НАН Украины, 79060, г. Львов, ул. Научная, 3-а.

³Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, отдел сейсмичности Карпатского региона, 79012, г. Львов, ул. Ярославенко, 27, тел. +38 (032) 2706100, эл. почта nazarevych.l@gmail.com

СТРУКТУРА, ДИНАМИКА И СЕЙСМОТЕКТОНИКА СБРОСОВЫХ ЗОН

(по результатам физического моделирования и полевых исследований)

Часть 1: Физическое моделирование

Цель. Целью работы является представить и проанализировать результаты физического моделирования и полевых исследований процессов образования, развития, а также современной геодинамической и сейсмотектонической активности зон субвертикального сдвига (ЗСВС), в частности, сбросовой кинематики. **Методика.** Физическое моделирование проведено на специальной моделирующей установке для углов падения разрыва 75°, 60° и 45°. Как пластично-вязкие модельные материалы для него использованы специальные пасты на основе глины. Полевые исследования включали геоакустосейсмический, ЕИЭМПЗ, деформографический, наклономерный и сейсмологические методы. **Результаты.** В части 1 (физическое моделирование) воспроизведены закономерности развития процессов субверти-

кального разрывообразования в осадочных толщах во времени и с глубиной в модельных экспериментах, проанализировано развитие различных систем трещин в зависимости от скорости смещения и угла падения разрыва. Прослежено развитие приповерхностных трещиноватых зон (как по латерали, так и с глубиной) над зонами ЗСВС. В части 2 (полевые исследования) приведены примеры зон такого типа в реальных геологических структурах, в частности, в зоне Береговского холмогорья в Закарпатье и некоторые результаты геофизического мониторинга их современного геодинамического режима деформометрическим и параметрическим геоакустическим методами, а также методами естественных геоакустоэмиссионного и импульсного геоэлектромагнитноэмиссионного (метод ЕИЭМПЗ) полей. По сейсмологическим данным прослежены особенности сейсмотектонического процесса в одной из характерных сейсмогенных зон сбросовой кинематики в районе Береговского холмогорья в Украинском Закарпатье. **Научная новизна.** По данным физического моделирования установлены характерные пространственно-временные закономерности развития процессов субвертикального разрывообразования, их зависимость от угла падения разрыва и скорости смещения блока основания. По данным многолетних полевых геоакустических, деформографических и наклономерных исследований на сети пунктов наблюдений в зоне Береговского холмогорья в Украинском Закарпатье обнаружена повышенная геодинамическая активность таких субвертикальных трещиноватых зон и связь деформационных процессов в них с геодинамикой земной коры Закарпатья и всей Земли. По комплексу сейсмологических, геологических и геодезических данных на примере характерных землетрясений Береговской сейсмогенной зоны в Украинском Закарпатье (зоны на пересечении Припаннонского (запад – северо-западного простирания) и Береговского меридионального разломов – зоны развития горст-грабенной (“клавишной”) тектоники) прослежены характерные особенности сейсмотектоники сбросовых зон. **Практическая значимость.** Результаты исследований дают возможность, с одной стороны, более надежно прогнозировать (а значит, и мониторить) зоны проявлений приповерхностных эффектов от глубинных ЗСВС, а с другой, по результатам поверхностных исследований прогнозировать наличие, локализацию и характеристики глубинных ЗСВС, а также характер и характеристики геодинамических и сейсмотектонических процессов в таких зонах. Это важно для сейсмологии и геодинамического мониторинга, для поисков нефти и газа и других полезных ископаемых, для инженерной геологии и геофизики, для геоэкологии и др.

Ключевые слова: физическое моделирование тектонических процессов; зоны субвертикального сдвига (ЗСВС); сбросовые зоны; системы трещин; структурообразование; полевые исследования; деформации пород; наклономер-маятник; геоакустоэмиссионный метод; метод ЕИЭМПЗ; механизмы землетрясений; Украинское Закарпатье.

A.V. NAZAREVYCH¹, O.N. BOKUN², L.Ye. NAZAREVYCH³

¹Institute of geology and geochemistry of combustible minerals of NAS of Ukraine, Naukova st., 3-a, 79060, Lviv, Ukraine

²Carpathian Branch of Subbotin Name Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, Naukova st., 3-b, 79060, Lviv, Ukraine, tel. +38(032)2648563, e-mail nazarevych-a@cb-igph.lviv.ua

³Subbotin Name Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, Department of seismicity of Carpathian region, Yaroslavenko st., 27, 79012, Lviv, Ukraine, tel. +38(032)2706100, e-mail nazarevych.l@gmail.com

STRUCTURE, DYNAMICS AND SEISMOTECTONICS OF FAULTING ZONES

(by results of physical modelling and field studies)

Parth 1: Physical modelling

Purpose. The aim of the work is to present and to analyze the results of physical modeling and field studies of processes of formation, evolution and modern geodynamic and seismotectonic activity of subvertical shear zones (SVShZ), in particular of faulting kinematics. **Methods.** Physical modeling was conducted on the special modeling machine for break dip angle 75°, 60° and 45°. As a plastic-viscous modeling materials for this were used a special paste which are based on clay. Field researches included geoacoustic emission, PIEMPZ, extenzometric, tiltmetric and seismological methods. **Results.** In the parth 1 (physical modelling) the regularities of evolution of processes of subvertical ruptures formations in sedimentary strata in time and on the depth in modeling experiments was reproduced, the evolution of different systems of crack depending from the speed of displacement and break dip angle was analyzes. Evolution of subsurface fractured zones (as on lateral as in depth) over zones of the SVSh was traced. In the parth 2 (field studies) examples of this type zones in the real geological structures, particularly in the area of Beregovo hill-land in Transcarpathians and some results of geophysical monitoring of its modern geodynamic regime by extenzometric and parametric geoacoustic methods and also by methods of natural geoacoustic emission and impulse geoelectromagnetic emission (method PIEMPZ (NIEMFE)) fields. By seismological data the features of seismotectonic process in one of the typical seismogenic zones of faulting kinematics in the Beregovo hill-land area in Ukrainian Transcarpathians were traced. **Originality.** By the data of the physical modeling the typical time-spatial regularities of evolution of

processes of subvertical ruptures formations and their dependence from the break dip angle and speed of displacement of basis unit were determined. By the data of long-term field geoacoustic, extenzometric and tiltmetric researches on observation points network in the area of Beregovo hill-land in Ukrainian Transcarpathians high geodynamic activity of such subvertical fractured zones and the relationship of deformation processes in them with the geodynamics of the crust of Transcarpathians and all the Earth was found. By complex of seismological, geological and geodetic data on example of typical earthquakes of Beregovo seismogenic zone in the Ukrainian Transcarpathians (zone at the intersection of Perypannonian (west – northwest direction) and Beregovo meridional fault – zone of horst-graben (“keyboard”) tectonics distribution) the features of faulting zones seismotectonics was traced. **Practical significance.** The researches results make it possible, on the one hand, more reliably predict (and therefore monitor) zone of near-surface effects display from deep SVShZ, and on the other hand, on the results of surface studies to predict the presence, location and characteristics of deep SVShZ and the nature and characteristics of geodynamic and seismotectonic processes in these zones. It is important for seismology and geodynamic monitoring, for searching for oil and gas and other minerals, for engineering geology and geophysics, for geoecology and others.

Key words: physical modeling of tectonic processes; zones of subvertical shearing (SVShZ); faulting zone; systems of cracks; structure formation; field researches; deformation of rocks; inclinometer-pendulum; geoacoustic emission method; PIEMPZ method; mechanisms of earthquakes; Ukrainian Transcarpathians.

REFERENCES

- Bobrov A. A. *Issledovanie objemnoj aktivnosti radona v razlomnyh zonah Priol'hon'ja i juzhnogo Priangar'ja: metodika i predvaritel'nye rezul'taty* [Studies of volume activity of radon in fault zones of Priol'honya and southern Priangarya: methods and preliminary results], *Izvestija Sibirskogo otdelenija Sekcii nauk o Zemle RAEN, Geologija, poiski i razvedka rudnyh mestorozhdenij* [Proceedings of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of Russian Academy of Natural Sciences, Geology, searching and exploration of ore deposits], Irkutsk, Izd. IrGTU [Publ. of Irkutsk State Technical University], 2008, no. 6(32), pp. 124–129 (in Russian).
- Boyko G. Yu., Lozynyak P. Yu., Anikeev S. G., Petrashkevych M. Y., Kolodiy V. V., Gaivanovych O. P. *Hlybynna heolohichna budova Karpats'koho rehionu* [Deep geological structure of Carpathian region], *Heolohiya i heokhimiya horyuchykh kopalyn* [Geology and Geochemistry of Combustible Minerals], 2003, no. 2, pp. 52–61 (in Ukrainian).
- Bokun A. N. *Zony skalyvanija v odnoslojnyh modeljah iz vlazhnoj gliny* [Zone of cleavage in single layer models of wet clay], *Sdvigovyje tektonicheskie narushenija i ih rol' v obrazovanii mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [Shear tectonic discontinuities and their role in the formation of mineral deposits (Abstracts of the First All-Union Conference)], MTK AN SSSR [Interdepartmental Tectonic Committee (ITC) of AS USSR], Leningrad, Izd. LGI, [Leningrad Mining Institute Publ.], 1988, Vol. 1, pp. 83–85 (in Russian).
- Bokun A. N. *Razvitie i harakter treshhin v modeljah fleksurnogo izgiba* [Evolution and nature of cracks in models of flexure] *Eksperimental'naja tektonika v teoreticheskoj i prikladnoj geologii* [Experimental tectonics in theoretical and applied geology], Moscow, Izd. Nauka [Science Publ.], 1985, pp. 220–227 (in Russian).
- Bokun A. N. *Rezul'taty tektonofizicheskogo modelirovanija zon gorizontalnogo sdviga i ispol'zovanie ih pri poiskah uglevodorodov* [Results of tectonophysical modeling of horizontal shear zones and use them in the searching for hydrocarbons], *Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle, k 40-letiju sozdanija M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN, Materialy dokladov Vserossijskoj konferencii, 13-17 oktjabrja 2008 g.* [Tectonophysics and topical problems of the Earth Sciences, on the 40th anniversary of creation by M.V. Gzovsky of Tectonophysical laboratory in IPhE RAS, Proceedings of the All-Russian Conference, October 13-17, 2008], Moscow, Izd. IFZ RAN [IPhE RAS Publ.], 2009, pp. 135–137 (in Russian).
- Bokun A. N. *Soljanye struktury Solotvinskoj vpadiny* [Salt structures of Solotvyno depression], Kyiv, Izd. Nauk. Dumka [Scientific thought Publ.], 1981, 135 p. (in Russian).
- Bokun A. N. *Strukturoobrazovanie v slabokonsolidirovannyh osadkah severo-vostochnoj kotloviny Tihogo okeana (po dannym modelirovanija)* [Structure formation in weakly consolidated sediments of north-eastern kettle of the Pacific Ocean (by data of modeling)], *Mehanizmy strukturoobrazovanija v litosfere i sejsmichnost'. Tezisy dokladov III Vsesojuznogo simpoziuma "Eksperimental'naja tektonika v reshenii zadach teoreticheskoj i prakticheskoj geologii"* [Mechanism of structure formation in the lithosphere and seismicity. Abstracts of the Third All-Union Symposium "Experimental tectonics in solving the problems of theoretical and practical geology"], Moscow, Izd. IFZ RAN [IPhE RAS Publ.], 1991, pp. 116-118 (in Russian).
- Bokun O. M., Nazarevych A. V. *Struktura i dinamika zon horyzontal'noho zsuvu (za rezul'tatamy fizychnoho modeljuvannja i pol'ovykh doslidzhen')* [Structure and dynamics of horizontal shear zones (by results of physical modelling and field studies)], *Geodynamics*, 2013, No 1(14), pp. 129–141 (in Ukrainian).

- Bondarenko P. M. *Modelirovanie polej naprjazhenij i prognoz dislokacij v sdvigovyh zonah* [Modeling of the stress fields and prognosis of dislocations in the shear zones], *Sdvigovye tektonicheskie narusheniya i ih rol' v obrazovanii mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [Shear tectonic discontinuities and their role in the formation of mineral deposits (Abstracts of the First All-Union Conference)], MTK AN SSSR [ITC (Interdepartmental Tectonic Committee) of AS USSR], Leningrad, Izd. LGI, [LMI (Leningrad Mining Institute) Publ.], 1988, Vol. 1, pp. 71–74 (in Russian).
- Bornjakov S. A. *Vnutrennjaja struktura sdvigovyh zon (po rezul'tatam fizicheskogo modelirovanija)* [Internal structure of shear zones (on results of physical modeling)] *Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle, k 40-letiju sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN, Materialy dokladov Vserossijskoj konferencii, 13-17 oktjabrja 2008 g., Moskva* [Tectonophysics and topical problems of the Earth Sciences, on the 40th anniversary of creation by M.V. Gzovskyy of Tectonophysical laboratory in IPE RAS, Proceedings of the All-Russian Conference, Moscow, October 13–17, 2008], Moscow, Izd. IFZ RAN [IPhE (Institute of the Physics of the Earth) RAS Publ.], 2009, pp. 135–137 (in Russian).
- Bornjakov S. A. *Dinamicheskie kriterii samoorganizacii sistemy razryvov v sdvigovoj srede (po rezul'tatam fizicheskogo modelirovanija)* [Dynamic criteria of self-organization of breaks in the shear environment (on results of physical modeling)], *Doklady RAN* [Reports of RAS], 2008, Vol. 420, no. 6, pp. 822–824 (in Russian).
- Bornjakov S. A., Cheremnyh A. V., Truskov V. A. *Dissipativnye struktury zon razlomov i kriterii ih diagnostiki (po rezul'tatam fizicheskogo modelirovanija)* [Dissipative structures of fault zones and criteria of their diagnostic (on results of physical modeling)], *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 2008, Vol. 49, no. 2, pp. 179–187 (in Russian).
- Vasil'ev E. P. *Model' prisdvigovogo kupoloobrazovanija* [Model of near-shear cupola-formation], *Sdvigovye tektonicheskie narusheniya i ih rol' v obrazovanii mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [Shear tectonic discontinuities and their role in the formation of mineral deposits (Abstracts of the First All-Union Conference)], MTK AN SSSR [ITC (Interdepartmental Tectonic Committee) of AS USSR], Leningrad, Izd. LGI [LMI (Leningrad Mining Institute) Publ.], 1988, Vol. 1, pp. 64–66 (in Russian).
- Gzovskij M. V. *Volnistost' prostiraniya krupnyh tektonicheskikh razryvov* [Sinuosity of extension of large tectonic faults], *Izv. AN SSSR* [Proceedings of AS USSR], 1953, No 2, pp. 101–114 (in Russian).
- Gzovskij M. V. *Osnovnye voprosy tektonofiziki i tektonika Bajdzhansajskogo antiklinorija* [Main questions of tectonophysics and tectonics of Baydzhansay anticlinorium], Moscow, Izd. AN SSSR [AS USSR Publ.], 1963, Parts 3, 4, 544 p. (in Russian).
- Gzovskij M. V. *Osnovy tektonofiziki* [Fundamentals of tectonophysics], Moccow, Izd. Nauka [Science Publ.], 1975, 536 p. (in Russian).
- Gintov O. B. *Polevaja tektonofizika i ee primenenie pri izuchenii deformacij zemnoj kory Ukrainy* [Field tectonophysics and its application for the studies of deformations of the earth's crust of Ukraine], Kiev, Izd. Feniks [Phoenix Publ.], 2005, 572 p. (in Russian).
- Gintov O. B., Isaj V. M., Isaj L. V. *Dilatatsionnoe razuplotnenie v sdvigovyh zonah Ukrainського shhita* [Dilatancy decompaction in the shear zones of the Ukrainian Shield], *Sdvigovye tektonicheskie narusheniya i ih rol' v obrazovanii mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [Shear tectonic discontinuities and their role in the formation of mineral deposits (Abstracts of the First All-Union Conference)], MTK AN SSSR [ITC (Interdepartmental Tectonic Committee) of AS USSR], Leningrad, Izd. LGI, [LMI (Leningrad Mining Institute) Publ.], 1988, Vol. 1, pp. 88–91 (in Russian).
- Honcharuk A. F., Stepanov V. A., Veremeyenko L. I., Kulibaba V. M., Shemyakina T. I., *Rudokontsentryuyuchi struktury i etapy vulkano-tektonichnoho rozvytku Berehovo-Behans'koyi zolotonosnoyi zony Zakarpattya* [Ore-concentrate structures and steps of volcano-tectonic evolution of Berehovo-Began` gold-bearing zone in Transcarpathians], *Visn. LNU im. I.Franka, Ser. Heol.* [Bulletin of I.Franko name LNU (Lviv National University), series Geological], 1994, No. 12, pp. 168–177 (in Ukrainian).
- Gordienko V. V., Gordienko I. V., Zavgorodnjaja O. V., Kovachikova S., Logvinov I. M., Tarasov V. M., Usenko O. V. *Ukrainskie Karpaty (geofizika, glubinnye processy)* [Ukrainian Carpathians (geophysics, deep processes)], Kyiv, Izd. Logos [Logos Publ.], 2011, 129 p. (in Russian).
- Hryhorchuk H. Yu. *Heoloho-strukturna pozytsiya zolotoho i polimetalevoho zrudeninnya – kryteriy hlybynnoho prohozu rud* [Geological-structural position of gold and polymetallic mineralization as a criterion of deep prognosis of ore], *Visn. LNU im. I.Franka, Ser. Heol.* [Bulletin of I.Franko name LNU (Lviv National University), series Geological], 1992, No 11, pp. 153–159 (in Ukrainian).
- Damaskinskaja E. E., Tomilin N. G. *Modelirovanie naprjazhennogo sostojanija tektonicheskikh razlomov metodom konechnykh elementov* [Modeling of stress state of tectonic faults by finite element method], *Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle, k 40-letiju sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN, Materialy dokladov Vserossijskoj konferencii, 13-17 oktjabrja 2008 g.* [Tectonophysics and topical problems of the Earth Sciences, on the 40th anniversary of creation by M.V. Gzovskyy of Tectonophysical laboratory in IPE RAS, Proceedings of the All-Russian Conference,

- October 13–17, 2008], Moscow, Izd. IFZ RAN [IPhE (Institute of the Physics of the Earth) RAS Publ.], 2009, pp. 143–144 (in Russian).
- Demchishin M. G. *Sovremennaja dinamika sklonov na territorii Ukrainy* [The current dynamics of the slopes on the territory of Ukraine], Kiev, Izd. Naukova Dumka [Scientific Thought Publ.], 1992, 254 p. (in Russian).
- Doslidzhennya suchasnoyi heodynamiky Ukrayins'kykh Karpat* [Studies of modern geodynamics of Ukrainian Carpathians]. Ed. V. I. Starostenko, Kyiv, Izd. Naukova dumka [Scientific Thought Publ.], 2005, 256 p. (in Ukrainian).
- Zotsenko M. L., Kovalenko V. I. *Inzhenerna heolohiya. Mekhanika hruntiv. Osnovy ta fundamenty* [Engineering geology. Soil mechanics. Bases and foundations], Poltava, Izd. PNTU [PNTU (Poltava National Technical University) Publ.], 2004, 446 p. (in Ukrainian).
- Ivanov I. P., Trzhcinskij Ju. B. *Inzhenernaja geodinamika* [Engineering Geodynamics], Sankt-Peterburg, Izd. Nauka [Science Publ.], 2001, 416 p. (in Russian).
- Ivanov P. L. *Grunty i osnovanija gidrotehnicheskikh sooruzhenij* [Soils and grounds of waterworks], Moscow, Izd. Vysshaja shkola [Higher School Publ.], 1991, 447 p. (in Russian).
- Isaj V. M. *Reologicheskie svojstva konsolidirovannoj kory i nekotorye zakonomernosti razlomoobrazovanija (na primere Ukrainskogo shhita)* [The rheological properties of solid crust and some regularities of faulting (on example of Ukrainian Shield)], *Geofiz. zhurn.* [Geophysical journal], 1989, Vol. 11, No 3, pp. 40–52 (in Russian).
- Kityk V. I., Bokun A. N., Panov G. M., Slivko E. P., Shajdeckaja V. S. *Galogenne formacii Ukrainy: Zakarpat'skij progib* [Halogen formation of Ukraine: Transcarpathian trough], Kiev, Izd. Naukova Dumka [Scientific Thought Publ.], 1983, 168 p. (in Russian).
- Kovalishin Z. I., Bratus' M. D. *Fljuidnyj rezhim gidrotermal'nyh processov Zakarpat'ja* [Fluid regime of hydrothermal processes in Transcarpathians], Kiev, Nauk. dumka Publ. [Scientific Thought Publ.], 1984, 86 p. (in Russian).
- Kravchuk Ya. S. *Heomorfologiya Polonyns'ko-Chornohirs'kykh Karpat* [Geomorphology of Polonyna-Montenegrin Carpathians], L'viv, VTs LNU im. I.Franka [Publishing centre of I.Franko name Lviv National University], 2008, 188 p. (in Ukrainian).
- Krups'kyy Yu. Z. *Heodynamichni umovy formuvannya i naftohazonosnist' Karpat's'koho ta Volyno-Podil's'koho rehioniv Ukrainy* [Geodynamic conditions of formation and oil and gas content in the Carpathian and Volyno-Podillya regions of Ukraine], Kyiv, Izd. UkrDGRI [UkrSGPI (Ukrainian State Geological Prospecting Institute) Publ.], 2001, 144 p. (in Ukrainian).
- Kuksenko V. S. *Fizicheskie osnovy prognozirovanija razrushenija gornyh porod pri zemletrjasenijah* [Physical basis of the prediction of rock destruction during earthquakes]. Moscow, Izd. Nauka [Science Publ.], 1987, pp. 12–36 (in Russian).
- Lozynyak P. Yu., Nazarevych A. V., Nazarevych L. Ye. *Neohenova ta suchasna heodynamika i seysmichnist' litosfery Zakarpat'tya* [Neogene and modern geodynamics and seismicity of Transcarpathians lithosphere], *Geodynamics*, 2011, no. 2 (11), pp. 170–172 (in Ukrainian).
- Luk'janov A. V. *Gorizontal'nye dvizhenija po razlomam, proishodjashhie pri sovremennykh katastroficheskikh zemletrjasenijah* [Horizontal movements along faults occurring in today's catastrophic earthquakes], *Tr. GIN AN SSSR* [Proceedings of GIN (Geological Institute) of AS USSR], Moscow, Izd. AN SSSR [AS USSR Publ.], 1963, no. 80, pp. 34–112 (in Russian).
- Lyashchuk D. N., Nazarevych A. V., Nazarevych L. Ye. *Heoelektromahnitnoemisiynnyy metod v monitorynzii lokal'nykh heodynamichnykh protsesiv* [Geelectromagnetic emission method in monitoring of local geodynamic processes] *Visnyk KNU im. T. Shevchenka, Heolohiya* [Bulletin of T.Shevchenko name KNU (Kyiv National University), Geology], 2003, No 26–27, pp. 92–97 (in Ukrainian).
- Maksymchuk V., Horodys'kyy Yu., Kuznetsova V. *Dynamika anomal'noho mahnitnoho polya Zemli* [Dynamics of anomalous magnetic field of the Earth], L'viv, Izd. Yevrosvit, [Euroworld Publ.], 2001, 306 p. (in Ukrainian).
- Matkovs'kyy O. I. *Rodovyshcha ta rudoproyavy zolota Ukrayins'kykh Karpat* [Gold deposits and ore-shows in Ukrainian Carpathians], *Visn. LNU im. I.Franka, Ser. Heol.* [Bulletin of I.Franko name LNU (Lviv National University), series geological], 1992, No 11, pp. 96–120 (in Ukrainian).
- Mehanika gruntov, osnovanij i fundamentov* [Mechanics of soils, bases and foundations], Ed. S.B. Ukhov (For universities, 2nd ed., Rev. and add.), Moscow, Izd. Vysshaja shkola [Higher School Publ.], 2002, 586 p. (in Russian).
- Mihajlova A. V. *Izuchenie mehanizmov deformirovanija tektonicheskikh struktur v sloe nad dvizhushhimisja blokami fundamenta (na modeljah)* [Studying the mechanisms of deformation of tectonic structures in the layer above the moving blocks of the basement (in the models)] *Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle, k 40-letiju sozdanija M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN, Materialy dokladov Vserossijskoj konferencii, 13-17 oktjabrja 2008 g., Moskva* [Tectonophysics and topical problems of the Earth Sciences, on the 40th anniversary of creation by M.V. Gzovskyy of Tectonophysical laboratory in IPE

- RAS, Proceedings of the All-Russian Conference, Moscow, October 13–17, 2008], Moscow, Izd. IFZ RAN [IPhE (Institute of the Physics of the Earth) RAS Publ.], 2009, pp. 145–147 (in Russian).
- Mihajlova A. V. *Metodika kolichestvennoj ocenki peremeshhenij i naprjazhenij v plasticheskikh neprozrachnykh modeljah* [Methods of quantifying of displacement and stress in the plastic opaque models], *Tektonofizika i mehanicheskie svojstva gornyh porod* [Tectonophysics and mechanical properties of rocks], Moscow, Izd. Nauka [Science Publ.], 1971, pp. 38–48 (in Russian).
- Nazarevych A. V., Nazarevych L. Ye. *Heodynamika i osoblyvosti seysmotektonichnoho protsesu Berehivs'koyi horstovoyi zony (Zakarpattya)* [Geodynamics and peculiarities of seismotectonic process in Beregovo horst zone (Transcarpathians)], *Geodynamics*, 2000, No 1(3), pp. 131–147 (in Ukrainian).
- Nazarevych A. V., Nazarevych L. Ye. *Heodynamika i trishchynuvatist' porodnykh masyviv (na prykladi Berehivs'koho horbohir"ya v Zakarpatti)* [Geodynamics and fracturing of rock massifs (in example of Berehovo Hill-land in Transcarpathians)], *Naukovyy visnyk NHAU* [Scientific Bulletin of NMAU (National Mining Academy of Ukraine)], 2001, No 4, pp. 23–24 (in Ukrainian).
- Nazarevych A. V., Nazarevych L. Ye. *Heodynamika, tektonika ta seysmichnist' Karpat-s'koho rehionu Ukrayiny* [Geodynamics, tectonics and seismicity of Carpathian region of Ukraine], *Geodynamics*, 2013, NO 2(15), pp. 247–249 (in Ukrainian).
- Nazarevych A. V., Nazarevych L. Ye. *Hlybynni osoblyvosti seysmotektonichnoho protsesu v Ukrayins'kykh Karpatakh* [Deep features of seismotectonic process in the Ukrainian Carpathians], *Materialy XII Mizhnarodnoyi konferentsiyi «Heoinformatyka: teoretychni ta prykladni aspekty», 12-15 travnya 2014 roku, Kyiv* [Proceedings of XII International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects", May 12-15, 2014, Kyiv], Kyiv, 2014 (CD), 05/2014; DOI:10.3997/2214-4609.20140419 (in Ukrainian).
- Nazarevych A. V., Nazarevych L. Ye. *Masshtabno-enerhetychni korelyatsiyi spivvidnoshennya dlya vohnyshch zemletrusiv Zakarpattya: deyaki naslidky ta enerhetychna veryfikatsiya* [Scale-energy correlation values for foci of Transcarpathian earthquakes: some consequences and energy verification], *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky* [Theoretical and applied aspects of geoinformatics], Kyiv, 2009, pp. 279–298 (in Ukrainian).
- Nazarevych A. V., Nazarevych L. Ye. *Parametrychni seysmoheoakustychni metody i kompleksni tekhnolohiyi monitorynhu pryrodnykh ta tekhnohennykh heodynamichnykh protsesiv ta prohnozu katastrof* [Parametric seismogeoaoustic methods and integrated technologies of monitoring of natural and technogenic geodynamic processes and prognosis of catastrophes], *Visnyk KNU im. T. Shevchenka, Heolohiya* [Bulletin of T. Shevchenko name KNU (Kyiv National University), Geology], 2002, No 23–24, C. 43–47 (in Ukrainian).
- Nazarevych L. Ye., Nazarevych A. V. *Seysmichnist' i deyaki osoblyvosti seysmotektoniky Ukrayins'kykh Karpat* [Seismicity and some features of seismotectonics of Ukrainian Carpathians], *Geodynamics*, 2012, № 1 (12), pp. 145–151 (in Ukrainian).
- Nazarevych L. Ye., Nazarevych A. V. *Osoblyvosti vohnyshcha Berehivs'koho zemletrusu 1965 roku za kompleksom danykh (heoinformatsiyi aspekty)* [Peculiarities of a source of 1965 Beregovo earthquake by the complex of data (geoinformatic aspects)], *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky* [Theoretical and applied aspects of geoinformatics], Kyiv, 2005, Vol. 2, pp. 74–79 (in Ukrainian).
- Nazarevych L. Ye., Nazarevych A. V. *Osoblyvosti pidhotovky ta kharakterystyky vohnyshcha Berehivs'koho zemletrusu 1965 roku (za makroseysmichnymy danymy)* [Peculiarities of preparation and characteristics of a source of 1965 Beregovo earthquake (by macroseismic data)], *Geodynamics*, 2006, no. 1(5), pp. 61–74 (in Ukrainian).
- Nazarevych L. Ye. *Kharakterystyky seysmichnosti i seysmotektonichnoho protsesu v zonakh Karpat-s'koho rehionu*. [Characteristics of seismicity and seismotectonic process in Carpathian region zones], *Avtoref. dys. ... kand. heol. nauk* [Author Thesis ... PhD in Geol. Sciences], Kyiv, Izd. IHF [IGPh (Institute of Geophysics) Publ.], 2006, 21 p. (in Ukrainian).
- Nazarevych L. Ye., Nazarevych A. V. *Kharakterni rysy seysmotektonichnoho protsesu v litosferi Bukovyny ta prylehlykh terytoriy* [Features of seismotectonic process in lithosphere of Bucovina and adjoining territories], *Geodynamics*, 2007, no. 1 (6), pp. 49–54 (in Ukrainian).
- Osokina D. N. *Issledovanie mehanizmov deformirovaniya massiva v zone razryva na osnove izuchenija trehmernogo polja naprjazhenij (matematicheskoe modelirovanie)* [Study of mechanisms of deformation in the rupture zone on the base of study of three-dimensional stress field (mathematical modeling)], *M. V. Gzovskij i razvitie tektonofiziki* [M.V. Gzovskii and development of tectonophysics], Moscow, Izd. Nauka [Science Publ.], 2000, pp. 220–245 (in Russian).
- Osokina D. N. *Pole naprjazhenij v okrestnostjakh konca razloma kak faktor, opredelajushhij razvitie narushenij vtorogo porjadka, harakter rosta razloma, razrushenija massiva i seysmichnosti* [The stress field in the vicinity of the end of the fault as a factor which determining the evolution of the second-order ruptures, the behavior of growth of the fault and the destruction of the rocks massif and seismicity], *Fundamental'nye problemy geotektoniki. Materialy X Tektonicheskogo soveshhanija* [Fundamental problems of Geotectonics. Proceedings of the X meeting of the Tectonic], Moscow, izd. GEOS [GEOS Publ.], 2007, Vol. 2, pp. 62–66 (in Russian).

- Polivtsev A. V. *Karta vertykal'nykh holotsenovykh rukhiv Volyno-Podillya ta Peredkarpattya* [Map of Holocene vertical movements of Volyn'-Podillia and Precarpathians], *Geodynamics*, 2011, No 1(10), pp. 58-70 (in Ukrainian).
- Rebeckij Ju. L. *Mehanizm generacii tektonicheskikh naprjazhenij v oblastjakh bol'shix vertikal'nyh peremeshhenij* [Mechanism of generation of tectonic stress in the areas of large vertical displacements], *Fiz. Mezomehanika*, [Phys. mesomechanics], 2008, Vol. 11, No 1, pp. 66-73 (in Russian).
- Rebeckij Ju. L. *Naprjazhennoe sostojanie sloja pri prodol'nom sdvige* [The stress state of layer in the longitudinal shear], *Izvestija AN SSSR. ser. Fizika Zemli* [Proceedings of AS USSR. Ser. Physics of the Earth], 1988, No 9, pp. 29-35 (in Russian).
- Rebeckij Ju. L. *Tektonicheskie naprjazhenija i prochnost' gornyh massivov* [Tectonic stress and the strength of rock masses], Moscow, Izd. Nauka [Science Publ.], 2007, 406 p. (in Russian).
- Seminskij K. Zh. *Modelirovanie krupnyh sdvigovyh zon i specifika razvitija ih kryl'ev* [Modeling of large shearing zones and specificity of their sides evolution], *Sdvigovyte tektonicheskie narushenija i ih rol' v obrazovanii mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [Shear tectonic discontinuities and their role in the formation of mineral deposits (Abstracts of the First All-Union Conference)], MTK AN SSSR [Interdepartmental Tectonic Committee (ITC) of AS USSR], Leningrad, LGI Publ., [Leningrad Mining Institute Publ.], 1988, Vol. 1, pp. 74-77 (in Russian).
- Seminskij K. Zh., Gladkov A. S., Lunina O. V., Tugarina M. A. *Vnutrennjaja struktura kontinental'nyh razlomnyh zon. Prikladnoj aspekt.* [The internal structure of continental faults zones. Applied aspect.], Novosibirsk, Izd. Nauka [Science Publ.], 2005, 293 p. (in Russian).
- Skakun L. Z., Matkovs'kyy O. I., Hozhyk M. F., Remeshylo B. H., Shklyanka V. M. *Zolote zrudenninnya Berehivs'koho rudnoho polya (heoloho-struktorna pozytsiya i mineralohichna typizatsiya)* [Gold mineralization of Beregovo ore area (geological-structural position and mineralogical typification)], *Visn. LNU im. I.Franka, Ser. Heol.* [Bulletin of I.Franko name Lviv National University, series geological], 1992, No 11, pp. 128-145 (in Ukrainian).
- Stojanov S. S. *Mehanizm formirovanija razryvnyh zon* [The mechanism of formation of discontinuous zones], Moscow, Izd. Nedra [Subsoil Publ.], 1977, 144 p. (in Russian).
- Tolstoy M. I., Shabatura O. V. *Vyvchennya provisykiv lokal'nykh zemletrusiv zasobamy yikh pryamoyi otsinky* [Study of local earthquakes precursors by tools of its direct estimation], *Geodynamics*, 2014, No 1(16), pp. 103-112 (in Ukrainian).
- Tomilin N. G., Damaskinskaja E. E., Pavlov P. I. *Statisticheskaja kinetika razrushenija gornyh porod i prognoz sejsmicheskikh javlenij* [Statistical kinetics of rocks destruction and prognosis of seismic events], *FTT* [PhCB (Physics of Solid Body)], 2005, Vol. 47, No. 5, pp. 955-959 (in Russian).
- Khomyak L. M., Khomyak M. M. *Modelyuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu osadovoho kompleksu avtokhtonu v zoni dynamichnoho vplyvu nasuvnoho klynu* [The stress-strain state modelling of the autochthonous sedimentary complex in the dynamic influence zone of the thrust wedge], *Geodynamics*, 2014, No 1(16), pp. 61-74 (in Ukrainian).
- Chebanenko I. I., Maljuk B. I., Bokun A. N., Klochko V. P., Ponomarenko M. I. *Osobennosti razvitija treshhino-vatosti porod kristallicheskogo fundamenta v razlomnyh zonah Dneprovsko-Donckoj vpadiny* [Peuliarities of evolution of rocks fracturing of the crystalline basement in faults zones of the Dnieper-Donets depression], *Tektonika i stratigrafija* [Tectonics and stratigraphy], 1990, Vol. 31, pp. 9-12 (in Russian).
- Shamotko V. I., Bilins'kyy A. I., Moroz I. P. *Elektrometrychnyy kontrol' heodynamichnykh protsesiv* [Electrometric control of geodynamic processes], *Heoloho-heofizychni problemy sejsmichnoho rayonuvannya terytoriyi zakhidnykh oblastey Ukrayiny* [Geological-geophysical problems of seismic zoning of the territory of western regions of Ukraine], Prepr., AN Ukrayiny, IPPMM; 17-93 [Preprin., AS of Ukraine, IAPMM (Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics); 17-93.], Lviv, 1993, pp. 53-55 (in Ukrainian).
- Shashenko A. N., Pustovojtenko V. P. *Mehanika gornyh porod* [Rock mechanics], Kiev, Izd. Novij druk [New Print Publ.], 2003, 400 p. (in Russian).
- Shvets V. B., Boyko I. P. *Mekhanika hruntiv. Osnovy ta fundamenti.* [Mechanics of soil. Bases and foundations.] Dnipropetrovs'k, Izd. Porohy [Thresholds Publ.], 2012, 231 p. (in Ukrainian).
- Jurkevich O. I., Voloseckij B. I., Zjabljuk N. S. *Povtornoe nivelirovanie Beregovskogo zemletrjasenija 24 oktjabrja 1965 g.* [Repeated leveling of Beregovo earthquake of October 24, 1965], *Sejsmichnost' Ukrainy* [Seismicity of Ukraine], Kiev, Izd. Naukova Dumka [Scientific Thought Publ.], 1969, pp. 103-106 (in Russian).
- Chemenda A., Lallemand S., Bokun A. Strain partitioning and interpolate friction in oblique subduction zones: Constraints provided by experimental modeling. *J. Geophys. Res. S. E.* 2000. Vol. 105, Issue B3. pp. 5567-5581.
- Graham R. H. Wrench faults, arcuate fold and deformation in the southern French Alps. *Proc. Geol. Assoc.*, 1978, No 89, pp. 125-142.

- Harding T. P. Petroleum Traps associated with wrench faults. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 1974, No 58, pp. 1290–1304.
- Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaya E. and Lockner D. A two-stage model of fracture of rocks. *Pure Appl. Geophys.* 1996. V. 146, No 2., pp. 253–263.
- Odonne F. and Vialon P. Analogue models of folds above a wrench fault. *Tectonophysics*, 1983, No 99, pp. 31–46.
- Osokina D. N., Yakovlev F. L., Voitenko V. N. Second rank fractures and 3D stress & strain local fields of fault with sides friction as ones development stages evidence: theory, experiment and natural examples (on the basis of “fracture-crack” and “fracture – shear zone” models study). *Geophysical Research Abstract.* – 2007. Vol. 9. – P. 10465.
- Richard P. and Cobbold P. R. Structures en fleur positives et décrochements crustaux: modelisation analogique et interpretation mecanique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1989, No 308, II, pp. 553–560.
- Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Zentral bl. Fur Mineralogie. Abt. Geol. Und Palaont. Berlin*, 1929, pp. 354–368.
- Sylvester A. G. Strike-slip faults. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1988, No 100, pp. 1666–1703.
- Tchalenko J. S. Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1970, No 81, pp. 1625–1640.
- Wilcox R. E., Harding T. P. and Seely D. R. Basik Wrench tectonics. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 1973, No 57, pp. 74–96.

Надійшла 15.05.2015 р.