

ТЕОРІЯ І МЕТОДОЛОГІЯ ГЕОФІЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

На базі нелінійної багатокомпонентної тріщинуватої моделі геологічного середовища розроблено теорію і методологію геофізичного моніторингу небезпечних геологічних процесів. Математичне моделювання ефективних геофізичних параметрів запропоновано проводити методом умовних моментних функцій з врахуванням функції орієнтації мінералів і мікротріщин, напружено-деформованого стану, тиску і температури. Розглянуто нелінійні параметри та акустопружні ефекти у середовищі з початковими напруженнями. Для збільшення кількості реалізацій запропоновано проводити статистичне моделювання випадкових процесів і полів на базі їх спектральних розкладів.

The theory and methodology of geophysics monitoring of dangerous geological process on the basis of nonlinear multicomponent crack model of geological medium are proposed. Mathematical modeling of effective geophysical parameters with the help of the method of conditional moment functions taking into function of minerals and cracks, mode of deformation, pressure and temperature are described. Nonlinear parameters and acoustoelastic effects into medium with initial effort are considered. Statistical modeling of random processes and fields for increase number of realization are proposed.

Вступ. Проблема небезпечних геологічних процесів, їх впливу на розвиток людської цивілізації постійно привертає увагу вчених. Особливо активно дослідження проводяться в останні роки. Це зумовлено тим, що наприкінці ХХ – на початку ХХІ ст. спостерігається зростання кількості природних і природно-техногенних катастроф та обсягів спричинених ними загальнолюдських та матеріальних збитків [1; 2].

В основі природних катастроф лежать закономірні геологічні та геофізичні процеси, що відбуваються в оболонках Землі (атмосфері, гідросфері, земній корі, мантії й ядрі), та які зазнають впливу космічних факторів і техногенної діяльності. Останні чинники самі можуть спричинити або посилювати природні катастрофічні явища.

Більш ніж 50-річна (а по землетрусах – більш як 100-річна) історія дослідження небезпечних природних і техногенно-природних геологічних процесів (НПТПП) не принесла помітних успіхів щодо їх прогнозу та попередження. Разом з тим, незважаючи на прорахунки та відсутність помітних результатів, проблема моніторингу НПТПП з метою запобігання їх негативних наслідків є однією із найбільш актуальних геофізичних завдань. Для успішного розв'язання цієї проблеми необхідно шукати нові методологічні та теоретичні підходи.

Класична теорія та методологія комплексної інтерпретації геофізичної інформації не забезпечують необхідної ефективності дослідження геодинаміки природних і природно-техногенних процесів. Це пояснюється, насамперед, тим, що в основу класичної наукової парадигми геофізики покладений структурно-геологічний принцип, згідно з яким геологічне середовище апроксимується абстрактними збурюючими аномальними тілами, а локальні зміни фізичних властивостей замінюються середніми статистичними значеннями параметрів у статичному варіанті.

Метою даної роботи є представлення в узагальненому вигляді результатів досліджень кафедри геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка в цілому і автора зокрема щодо розробки нового методологічного підходу та теорії геофізичного моніторингу геологічного середовища. Основні теоретичні розробки, викладені тут, є результатом співпраці з Інститутом механіки НАН України (доктори фіз.-мат. наук Л.П.Хорошун і Б.П.Маслов) та механіко-математичним факультетом університету (канд. фіз.-мат. наук З.О.Вижва), багаторічних спільних досліджень з проф. Г.Т.Продайводою. Ідеї щодо застосування розробленого теоретичного апарату до задач моніторингу доповіда-

лись на п'яти наукових конференціях "Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища", що проводились в 2001–2005 рр. на базі геологічного факультету університету, координатором і одним із організаторів яких був автор.

Природні катастрофи на початку ХХІ століття. За даними, наведеними в звітах The Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи (МНС), працях провідних учених [1–4], відзначається, що кількість природних катастроф у світі за останні роки постійно зростає, збільшується кількість загиблих і постраждалих у природних катастрофах осіб (прирости відповідно склали, в середньому, 4,3 % і 8,6 %), ще швидшими темпами ростуть економічні втрати – 10,4 % на рік. За останні 50 років кількість природних катастроф на Землі збільшилась майже в три рази і від них постраждали майже 4,4 млрд людей. Якщо економічні втрати від природних катастроф у 60-х роках минулого століття становили кілька млрд доларів США, то наприкінці століття вони досягли 85 млрд дол на рік. Сумарна величина економічних втрат у світі за 2-гу половину ХХ ст. становить 895 млрд дол. За прогнозними оцінками, до середини ХХІ ст. щорічні збитки від природних катастроф можуть досягти 300 млрд дол у рік [2].

Основними чинниками, які впливають на ріст природних катастроф, є:

- глобальні процеси космічного та літосферного походження;
- зростання чисельності населення планети;
- урбанізація;
- зростання техногенного впливу на навколишнє природне середовище.

Значна кількість природних катастроф на території України пов'язана з небезпечними геологічними процесами (зсуви, опускання і підтоплення території, карсти, провали, землетруси).

Масштаби небезпечних геологічних і природно-техногенних процесів на території України визначаються такими чинниками: зонами підвищеної сейсмічної небезпечності, значними паводками (особливо на річках Карпат і Криму), розвитком гравітаційних процесів, високим рівнем урбанізації (в містах проживає понад 68 % населення країни і тут у найбільш концентрованому вигляді виявляються наслідки техногенної дії на навколишнє природне середовище – наведена сейсмічність, зсуви, карсто-суфозійні процеси, техногенні фізичні поля), значна

частина території страждає від природного та техногенного підтоплення, осідання території тощо.

Установлено, що при розробці стратегії прогнозування стану геологічного середовища на території України необхідно враховувати дві основні складові розвитку НППТП:

- еволюційну (безперервна самоорганізація речовини оболонки планети з виділенням та поглинанням енергії) – для її вивчення необхідно проводити фундаментальні наукові дослідження з переважним використанням дистанційних методів;

- антропогенну (вплив техногенних факторів на еволюцію природних процесів) – необхідна розробка нових високоефективних геофізичних технологій діагностики середовища в польових, свердловинних і лабораторних умовах.

Вирішення завдання контролю за небезпечними геологічними процесами та прогноз їх розвитку можливі лише на основі постійної реєстрації даних про стан довкілля та надійної інтерпретаційної системи оцінки його стану.

При розробці оптимальної системи геофізичного моніторингу довкілля в першу чергу необхідно брати до уваги специфіку різних типів небезпечних геологічних і геофізичних явищ та масштаби їх виявлення. При цьому необхідно виявити найбільш чутливі геофізичні параметри та розробити відповідні методологічні і теоретичні підходи до опису такого середовища, розрахунки його ефективних характеристик і методик прогнозу їх зміни в просторі та часі.

Методологічні принципи геофізичного моніторингу небезпечних геологічних процесів. Для боротьби зі шкідливими наслідками природних і природно-техногенних катастроф використовуються два шляхи: передбачення і запобігання. Кожний із них має свої позитивні та негативні аспекти. На жаль, сьогодні загально визнаних методів оцінки потенціальної небезпеки не існує.

Основна причина – відсутність фундаментальної теорії еволюції Землі, не зовсім достовірні знання про структуру, речовинний склад і напружений стан геологічного середовища. Крім того, не відомі основні чинники та закономірності, що за нормального перебігу процесів несподівано спричиняють стрибкоподібні зміни стану речовини чи швидкості природних перетворень. Надзвичайна складність проблеми зумовлена тим, що для її розв'язання необхідно враховувати широкий спектр природних і техногенних факторів на різних структурних рівнях дослідження: локальному, регіональному та глобальному.

При вирішенні складних завдань моніторингу геологічного середовища виникають значні труднощі, пов'язані з обмеженими можливостями існуючої наукової парадигми сучасної геофізики. Вона ґрунтується на структурно-геологічному принципі, згідно з яким розподіл фізичних властивостей геологічного середовища контролюється його статичною структурою та речовинним складом.

У роботах [4; 5] пропонується новий методологічний і теоретичний підхід до проблеми комплексної інтерпретації даних моніторингу небезпечних природних і техногенних процесів, що базується на новій науковій парадигмі геофізики. В її основі лежить поняття **геологічного середовища**, яке розглядається не лише як носій матеріальної субстанції, але й геодинамічних процесів і геофізичних полів (внутрішніх і зовнішніх). Природним атрибутом такого середовища є динамічний напружено-деформований і термопружний стан. Небезпечні природні та техногенно-природні процеси в такому середовищі виникають унаслідок динамічної взаємодії ієрархізованих структурних неоднорідностей різного масштабу. Вони контролюються рядом механізмів:

ростом і виникненням мікро- та макротріщин, зміною об'єму пустотного простору, фільтрацією флюїдів і газу, механізмом деформації та градієнтом температур. Разом ці механізми перетворюють геологічне середовище на динамічну нелінійну геосистему, в якій неминучі процеси самоорганізації та дисипації енергії. Такі відкриті динамічні нелінійні геосистеми є термодинамічно нерівноважними, здатними накопичувати і трансформувати енергію. Процеси, що проходять у геологічному середовищі, мають багаторівневий, циклічний незворотний характер і широкий релаксаційний спектр з різними часовими змінами.

Природні процеси відбуваються під впливом великої кількості факторів. Виділити регулярну і флуктуаційну складові процесу та закономірності їх часових змін дуже важко. Формально інтенсивність природного процесу можна представити у вигляді деякої функції $A(t)$, яка є суперпозицією трьох складових [5]:

$$A(t) = A_p(t) + A_n(t) + A_s(t),$$

де $A_p(t)$ – регулярна складова; $A_n(t)$ – повільні зміни; $A_s(t)$ – короткоперіодичні варіації.

Розрахунки ефективних фізичних властивостей моделі такого середовища пропонується проводити за допомогою методу умовних моментних функцій з врахуванням мінералогічного складу, параметрів мікро- і макротріщин (сухих і флюїдонасичених), напруженого стану і температури.

Традиційний підхід до проблеми комплексної геофізичної інтерпретації даних дистанційних спостережень за станом геологічного середовища, у розвиток якого зробили значний внесок Г.Я.Голіздра, Ф.М.Гольцман, Г.І.Каратаєв, С.С.Красовський, Е.Д.Кузьменко, В.І.Старостенко, В.М.Страхов, має низку суттєвих обмежень. Він базується на розв'язку прямих і обернених геофізичних задач у рамках прийнятої моделі середовища і поля, а також на кореляційних взаємозв'язках між фізичними параметрами геологічного середовища. Основні труднощі застосування класичного підходу до вирішення завдань геофізичного моніторингу зумовлені різною просторовою самоспряженістю джерел геологічного середовища, що визначають геофізичні поля спостережень.

В основі нового підходу до теорії комплексної інтерпретації геофізичних полів, що протягом останніх років розробляється на кафедрі геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, лежить локалізована нелінійна багатокомпонентна тріщинувата модель геологічного середовища [4–7]. Схематично модель представлено на рис. 1.

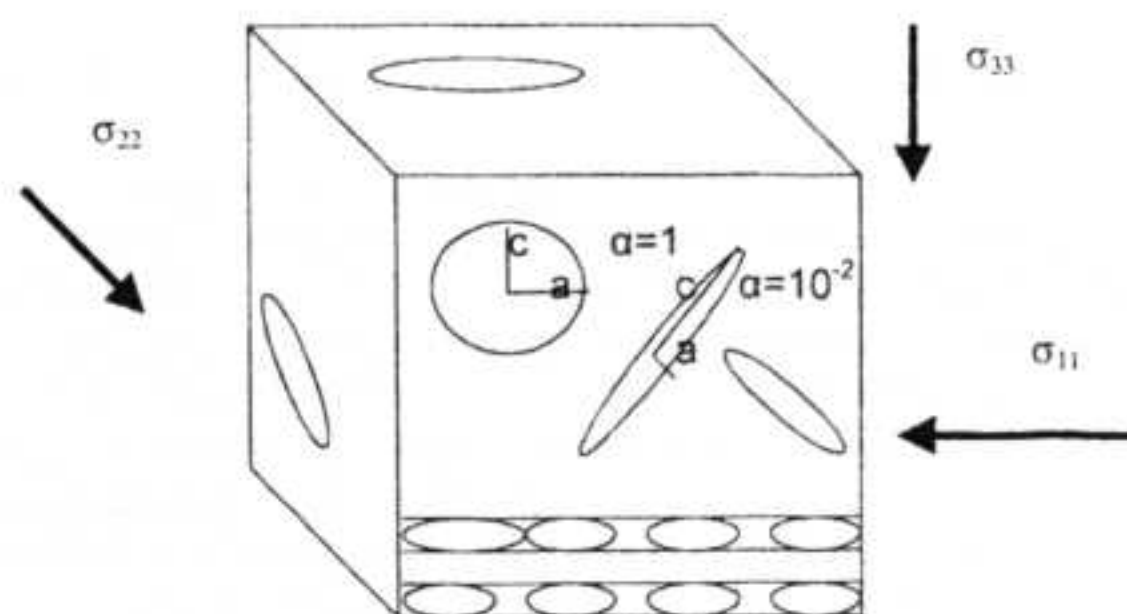


Рис. 1. Модель багатокомпонентного геологічного середовища

Модель являє собою мінеральний скелет, що складається із зерен різноманітних мінералів, стійких за заданих тисків і температур. Цей скелет прорізаний порами і тріщинами (сухими або флюїдонасиченими) і

перебуває в напруженому стані в умовах високих температур. Жодних обмежень на джерела геофізичних аномалій і геометричні параметри геологічного середовища не накладається, а також немає необхідності в апіорній інформації про кореляційні зв'язки між фізичними властивостями і полями.

При дослідженнях літосфери реальне гетерогенне геологічне середовище за допомогою апроксимації по сітці можна розбити на апроксимуючі комірки – тіла простої геометричної форми, розмір яких визначається масштабом досліджень і роздільною здатністю геофізичних технологій, що використовуються.

Ефективні фізичні властивості апроксимуючої комірки визначаються мінералогічним складом, структурою мінерального скелету (формою й орієнтацією мінеральних зерен) і тріщинно-порового простору (сухого або флюїдо-насиченого), напруженим станом і температурою. Числові розрахунки лінійних і нелінійних ефективних фізичних властивостей комплексної моделі здійснюються сучасними методами механіки стохастичних середовищ з врахуванням реальної структури геологічного середовища.

Завдання комплексної інтерпретації даних активного геофізичного моніторингу в ізотропному наближенні зводиться до розв'язку задачі нелінійної однокритеріальної багатопараметричної оптимізації лінійної згортки функціоналів:

$$\begin{aligned} & \theta_1 \left\| \psi_1^{(e)}(\bar{x}) - \psi_1^{(r)}[\bar{x}, c', \lambda', \mu', \rho', \xi', P, T] \right\| + \\ & + \theta_2 \left\| \psi_2^{(e)}(\bar{x}) - \psi_2^{(r)}[\bar{x}, c', \rho', \xi', P, T] \right\| + \\ & + \theta_3 \left\| \psi_3^{(e)}(\bar{x}) - \psi_3^{(r)}[\bar{x}, c', \gamma', \xi', P, T] \right\| = \min, \end{aligned}$$

де $\psi_1^{(e)}, \psi_2^{(e)}, \psi_3^{(e)}$ – спостережені значення сейсмічного, гравітаційного та магнітного полів; $\psi_1^{(r)}, \psi_2^{(r)}, \psi_3^{(r)}$ – обчислені на r -му кроці ітерації значення сейсмічного, гравітаційного, магнітного та інших геофізичних полів; $c'(\bar{x}), \lambda'(\bar{x}), \mu'(\bar{x}), \gamma'(\bar{x}), \rho'(\bar{x}), \xi'(\bar{x})$ – об'ємна концентрація порот, пружні параметри Ламе, магнітна проникність, густина i -го мінералу та густина тріщин скелета середовища в апроксимуючій елементарній комірці; P, T – тиск і температура, θ_i – вагові коефіцієнти.

Локальні ефективні фізичні властивості в апроксимуючій комірці такого середовища визначаються методами геофізичної томографії, а задача інверсії локальних ефективних фізичних властивостей розв'язується з використанням сучасних методів глобальної оптимізації.

Математичне моделювання ефективних геофізичних параметрів. Основою для реалізації запропонованого підходу є математичне моделювання ефективних геофізичних параметрів, що дає змогу віднайти найбільш чутливі параметри для контролю за станом геологічного середовища та розробити методики оцінки його стану.

Задача визначення ефективних фізичних властивостей багатокомпонентного середовища належить до класу задач багатьох тіл, яка не має точного розв'язку. Існує низка методів, що дозволяють визначити можливу верхню і нижню межу ефективних фізичних характеристик такого середовища.

Вагомий внесок у розв'язання цієї проблеми зробили В.Фойгт, А.Реусс, Р.Хілл, З.Хашін і С.Штрікман, Л.П.Хорошун, Б.П.Маслов, Г.Т.Продайвода, Т.Д.Шермегор. Серед великої кількості методів найбільш ефективним виявився метод умовних моментних функцій, розроблений Л.П.Хорошуном і Б.П.Масловим та адаптований до геологічних задач Г.Т.Продайводою. Цей метод

задовольняє всі жорсткі вимоги до одержаних за його допомогою числових результатів.

Прийнята матрична модель анізотропного багатокомпонентного геологічного середовища являє собою жорстку матрицю, в якій стохастично розташовані по представницькому об'єму включення еліпсоїдальної або сфероїдальної форми (див. рис. 1). Включення можуть бути рівномірно орієнтовані згідно з прийнятою функцією розподілу орієнтації.

У роботах [8; 9] поставлена і розв'язана задача вивчення напружено-деформованого стану, ефективних пружних і акустичних властивостей анізотропного багатокомпонентного тріщинуватого геологічного середовища.

Воно розглядається як кусково-неперервне середовище, пружні властивості структурних неоднорідностей якого є випадковими функціями просторових координат. Вважається, що в будь-якій точці середовища справедливий закон Гука:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^* \varepsilon_{kl}, \quad (1)$$

де $\sigma_{ij}, \varepsilon_{kl}$ – тензори напруг і деформацій у мікроточках; C_{ijkl} – тензор пружних постійних.

Ефективні пружні постійні C_{ijkl}^* багатокомпонентного геологічного середовища визначаються співвідношеннями:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = C_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl} \rangle, \quad (2)$$

які зв'язують середні по макрооб'єму тіла напруги $\langle \sigma_{ij} \rangle$ і деформації $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ при однорідних поверхневих навантаженнях.

Якщо розміри тіла значно перевищують розміри мікронеоднорідностей, то область, яку займає тіло, можна розглядати як нескінчену. У цьому випадку за дії однорідного навантаження випадкові поля напруг і деформацій статистично однорідні і задовольняють умову ергодичності, що дозволяє замінювати усереднення по об'єму статистичним усередненням по ансамблю реалізацій. Тоді, здійснюючи статистичне усереднення (1), одержимо

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = c_{1n} \sum_{n=1}^Q C_{ijkl}^{(1)} \varepsilon_{kl}^{(1n)} + c_2 C_{ijkl}^{(2)} \varepsilon_{kl}^{(2)} = C_{ijkl}^{(1)} \langle \varepsilon_{kl}^{(1n)} \rangle + c_2 C_{ijkl}^{(2)} \varepsilon_{kl}^{(2)}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{kl}^{(1n)}$ – мікродоформації у включеннях, орієнтованих у n -му напрямку; $\varepsilon_{kl}^{(2)}$ – мікродоформації в твердому скелеті гірської породи; $C_{ijkl}^{(1)}$ – тензор пружних постійних включень; $C_{ijkl}^{(2)}$ – тензор пружних постійних твердого скелета; c_{1n} – об'ємна концентрація включень, орієнтованих у n -му напрямку; $c_1 = \sum_{n=1}^Q c_{1n}$ – об'ємна концентрація включень; Q – кількість компонент; c_2 – об'ємна концентрація матриці; $(c_1 + c_2) = 1$; $\langle \varepsilon_{kl}^{(1n)} \rangle$ – математичні очікування тензора деформацій, який усереднений за об'ємом V_{1n} включень n -го напрямку; $\langle \varepsilon_{kl}^{(2)} \rangle$ – математичні очікування тензора деформацій твердого скелета.

Враховуючи (2) та макроскопічні деформації гірської породи, знаходимо співвідношення для обчислення ефективних пружних постійних гірської породи

$$C_{ijkl}^* = \langle C_{ijkl} \rangle + c_1 c_2 C_{ijmn}^{(3)} (I_{mnpq} + c_1 \bar{Z}_{mnpq} C_{\alpha\beta\gamma\delta})^{-1} \bar{Z}_{pqrs} C_{rskl}^{(3)}. \quad (4)$$

де $\bar{Z}_{ijkl} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} a_{im} a_{jn} a_{pk} a_{ql} Z_{mnl} f(\varphi_1, \theta, \varphi_2) d\varphi_1 \sin \theta d\theta d\varphi_2$,

$f(\varphi_1, \theta, \varphi_2)$ – функція розподілу орієнтації включень;

Z_{mnl} – тензор, компоненти якого визначають за допомогою інтегрального оператора типу згортки, ядром якого є похідні від функцій Гріна.

У випадку багатокомпонентних геологічних середовищ, поряд з методом умовних моментних функцій, для визначення полів середніх деформацій у включеннях використовується розрахункова схема Морі – Танка [9].

На відміну від методу умовних моментів для односпрямованої орієнтації мікротріщин, узагальнений метод умовних моментів можна застосовувати при розрахунках ефективних пружних постійних більш широкого класу гірських порід – з просторовою орієнтацією мікротріщин. Це досягається завдяки використанню додаткової операції усереднення відомого розв'язку для матричної моделі з еліпсоїдальними мікротріщинами, напівосі яких орієнтовані вздовж координатних осей, за всіма можливими орієнтаціями з використанням функції розподілу орієнтації мікротріщин у гірській породі, яка розкладається в ряд за узагальненими сферичними функціями. При розрахунках ефективних пружних постійних анізотропних гірських порід не накладається ніяких обмежень на концентрацію мікротріщин.

Установлено [9], що системи тріщинуватості можна успішно розрізнити за допомогою стереопроєкцій ізольованих рівних значень диференціального коефіцієнта пружної анізотропії, за кількістю та просторовим розташуванням повздовжніх нормалей і акустичних осей. Системи тріщинуватості виявляються у вигляді інтенсивних поляризаційних ефектів хвиль повздовжньої та поперечної поляризації.

Математичне моделювання впливу тиску і температури на швидкості поширення пружних хвиль у геологічному середовищі. Геологічне середовище постійно перебуває в умовах напруженого стану, який зумовлений дією гравітаційних і тектонічних сил та градієнтів температур. Неврахування цих факторів може призвести до значних похибок при інтерпретації даних геофізичного моніторингу та оцінці напружено-деформованого стану середовища [4; 10].

Вважається, що у будь-якій точці геологічного середовища виконується термопружне рівняння

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - \beta_{ij} \theta, \quad \beta_{ij} = C_{ijkl} \alpha_{kl}, \quad (5)$$

де C_{ijkl} – тензор пружних постійних; σ_{ij} , ε_{kl} – тензори напруг і деформацій; β_{ij} , α_{kl} – тензори термонапруг і коефіцієнтів лінійного термічного розширення; θ – приріст температури, викликаний зовнішнім нагріванням.

Для макроскопічних напруг $\langle \sigma_{ij} \rangle$, деформацій $\langle \varepsilon_{kl} \rangle$ і приросту температури θ буде мати місце таке термопружне рівняння:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = C_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl} \rangle - \beta_{ij}^* \theta, \quad \beta_{ij}^* = C_{ijkl}^* \alpha_{kl}^*, \quad (6)$$

де C_{ijkl}^* – ефективний тензор пружних постійних гірської породи; β_{ij}^* , α_{kl}^* – ефективні тензори термонапруг і коефіцієнтів лінійного термічного розширення гірської породи.

Спочатку обмежимося двокомпонентним середовищем і виконаємо операцію статистичного усереднення лінійного термопружного рівняння (6):

$$\langle \sigma \rangle = \sum_{v=1}^2 c_v \left(C_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl} \rangle - \beta_{ij}^{(v)} \theta \right). \quad (7)$$

Після усереднення за всіма можливими орієнтаціями мікротріщин та низки перетворень знаходимо загальний

вираз для ефективних термопружних модулів ізотропного тріщинуватого геологічного середовища:

$$K^* = \frac{1}{3} [K_1 - c_2 K_3 / (1 + c_1 K_2 K_3)]; \quad (8)$$

$$G^* = \frac{1}{2} [G_1 - c_2 G_3 / (1 + c_1 G_2 G_3)]; \quad (9)$$

$$\beta^* = \beta^{(1)} - c_2 \beta_3 / (1 + 3c_1 K_2 K_3); \quad (10)$$

де K^* , G^* , β^* – ефективні коефіцієнт об'ємного стискування, модуль зсуву, тензор термонапруг; c_1 , c_2 – концентрація матриці та включень; $K_3 = K_1 - K_2$; $G_3 = G_1 - G_2$; $\beta_3 = \beta_1 - \beta_2$; $K_2 = \bar{Z}_{11} + 2\bar{Z}_{12}$; $G_2 = \bar{Z}_{11} - 2\bar{Z}_{12}$.

Одержані результати можна узагальнити на випадок багатокомпонентного геологічного середовища, скориставшись розрахунковою схемою Морі – Танка.

Загальний вираз для ефективного тензора термопружних напруг багатокомпонентного анізотропного геологічного середовища має такий вигляд:

$$\beta^* = \sum_{r=1}^N c_r C_r \alpha_{Ar}, \quad (11)$$

де $\alpha_{Ar} = r_\beta A_r - \bar{Z}_\beta \beta_r$; $\alpha_{Ar} = r_m A_m$; $r_\beta = \sum_{r=1}^N c_r \bar{Z}_r \beta_r$;

$r_m = \sum_{r=1}^N c_r \bar{Z}_r \alpha_r$; $\beta_r = \beta_r - \beta_m$; $\alpha_r = c_r - c_m$; $m = N + 1$.

Зміни формату мікротріщин за зміни температури і тиску вираховувались за формулою

$$\alpha(P, T) = \alpha(P_0, T_0) \frac{[1 + \langle \varepsilon_{33}(P, T) \rangle]}{[1 + \langle \varepsilon_{33}(P_0, T_0) \rangle]}, \quad (12)$$

де $\alpha(P_0, T_0)$ – формат мікротріщин за початкових тиску і температури (P_0, T_0) .

Нелінійні параметри багатокомпонентного геологічного середовища. Щодо встановлення нових найбільш чутливих до зміни стану середовища геофізичних параметрів найбільші перспективи застосування мають методи нелінійної сейсмоакустики. Дослідження небезпечних природних процесів без врахування початкового напруженого стану, реальної структури геологічного середовища і рівня середніх напруг на його ієрархізованих структурних елементах є малоефективним.

У роботах [4; 11] розглядається постановка та розв'язок задачі визначення ефективних нелінійних пружних постійних багатокомпонентного тріщинуватого геологічного середовища.

Розглянуто нелінійно пружне багатокомпонентне геологічне середовище, пружні властивості якого задані термодинамічним потенціалом

$$\Psi = \frac{1}{2} \lambda A_1^2 + \mu A_2 + \frac{1}{6} v_1 A_1^3 + v_2 A_1 A_2 + \frac{4}{3} v_3 A_3, \\ A_1 = tr(\mathbf{E}); \quad A_2 = tr(\mathbf{E}^2); \quad A_3 = tr(\mathbf{E}^3),$$

де A_i – алгебраїчні інваріанти тензора деформацій Гріна λ , μ , v_1 , v_2 , v_3 – пружні постійні Ламе другого і третього порядків, tr – оператор тензорної згортки, $\mathbf{E}$ – тензор деформації Гріна.

Одержані методом умовних моментних функцій із застосуванням розрахункової схеми Морі – Танка ефективні пружні постійні Ламе другого і третього порядків визначаються формулами

$$\lambda^* = 3 \sum_{r=1}^{n+1} c_r K_r \kappa_{Ar} - 2\mu^* / 3; \quad \mu^* = 2 \sum_{r=1}^{n+1} c_r \mu_r \mu_{Ar};$$

$$\begin{aligned}
 v_1^* &= \sum_{r=1}^{n+1} 3c_r \left[\frac{l_A \left[2\lambda_{A_r} (3\kappa + \mu)_{A_r} + n_{A_r} f_{A_r} \right] + 9v_1 \kappa_{A_r}^3}{6v_2 l_A \kappa_{A_r} (3\kappa + 2\mu)_{A_r} + 8v_3 l_A^2 n_{A_r}} \right]_r; \\
 v_2^* &= \sum_{r=1}^{n+1} c_r \left[4\mu_{A_r}^2 \left(\frac{1}{2} f_{A_r} + 3v_2 \kappa_{A_r} + 4v_3 l_{A_r} \right) - \frac{1}{2} (3\lambda_{A_r} + 2\mu_{A_r}) \right]_r; \\
 v_3^* &= \sum_{r=1}^{n+1} c_r \left[\frac{3}{2} \mu_{A_r} (4\mu_{A_r}^2 - 1) + 8v_3 \mu_{A_r}^3 \right]_r. \quad (13) \\
 K_{A_r} &= A_{11}^{(r)} + 2A_{12}^{(r)}; \mu_{A_r} = A_{11}^{(r)} - 2A_{12}^{(r)}; \\
 \lambda_{A_r} &= K_{A_r} - \frac{2}{3} \mu_{A_r}.
 \end{aligned}$$

Тут позначено $f_{A_r} = (3\lambda_{A_r} + 6\mu_{A_r})_r$; $\mu_r, \lambda_r, v_{1r}, v_{2r}, v_{3r}$ – постійні пружності другого і третього порядків r – компоненти; c_r – об'ємна концентрація r – компоненти.

У результаті проведеного моделювання для різноманітних типів гірських порід з різноманітною структурою пустотного простору відмічається висока чутливість нелінійних постійних від концентрацій мікротріщин та параметрів насичення пустотного простору.

Досліджені акустопружні ефекти, що індукуються напруженим станом. В ізотропному геологічному середовищі вони виявляються в азимутальній залежності фазових і променевих швидкостей хвиль повздовжньої і поперечної поляризації; у відхиленні векторів пружних переміщень і векторів променевої швидкості хвиль повздовжньої і поперечної поляризації від напрямку хвильової нормалі та наявності різниці між фазовими і променевими швидкостями; в розщепленні хвиль поперечної поляризації [11]. Збільшення анізотропії напруженого стану, тобто девіаторних напруг, приводить до збільшення величини коефіцієнта пружної анізотропії.

На основі наведеного теоретичного апарату розроблена технологія сейсмоакустичної діагностики небезпечних природних і техногенних процесів [12].

Статистичне моделювання випадкових процесів та полів у задачах геофізичного моніторингу небезпечних геологічних процесів. Методи статистичного моделювання дозволяють доповнювати експериментальні реалізації додатковими даними, що неможливо отримати польовими геофізичними дослідженнями при вирішенні поставленої задачі (нерегулярність мережі спостережень при проведенні геофізичних досліджень, неможливість проведення прямих спостережень під фундаментами споруд при вирішенні задач інженерної геології, різна глибина свердловин при спостереженнях; необхідність виявлення закономірностей і тенденцій у зміні напружено-деформованого стану гірських масивів за відсутності можливості проводити регулярні спостереження; розробка систем пасивного та активного моніторингу небезпечних геологічних процесів тощо).

Розроблено алгоритми для статистичного моделювання стаціонарних гауссівських періодичних випадкових процесів і однорідних та ізотропних гауссівських випадкових полів на площині та у тривимірному просторі. У загальному вигляді розроблений підхід є таким:

1. Проводиться статистичний аналіз наявних експериментальних даних, визначається тип їх розподілу та вигляд кореляційної функції.
2. На основі теорії спектральних розкладів з урахуванням визначеної кореляційної функції будується математична модель випадкового процесу або поля значень параметрів, що досліджуються.
3. На базі моделі будується алгоритм, який дає змогу отримати реалізації з необхідною просторовою густотою.

Наведені алгоритми можуть бути використані для практично важливих у геофізиці прикладів кореляційних функцій стаціонарних випадкових процесів та однорідних і ізотропних випадкових полів, а також за допомогою деяких перетворень для інших випадкових процесів і полів, які не мають властивостей стаціонарності, однорідності та ізотропності [4].

Розроблені алгоритми статистичного моделювання випадкових процесів дво- та тривимірних полів пройшли апробацію при обробці та інтерпретації даних режимних геофізичних спостережень, що ставились з метою моніторингу та прогнозування карстово-суфозійних процесів на території Рівненської АЕС [13; 14].

Висновки. У результаті фундаментальних і прикладних досліджень кафедри геофізики розроблений новий методологічний підхід та теорія геофізичного моніторингу небезпечних геологічних процесів на основі багатокомпонентної математичної моделі з врахуванням напружено-деформованого стану, термопружних і нелінійних ефектів.

Доведено, що об'єктом геофізичного моніторингу мають бути ієрархізовані неоднорідності різного структурного рівня геологічного середовища, які є концентраторами напруг і деформацій і відіграють вирішальну роль у флюїдному режимі геологічного середовища та визначають його стійкість.

Розроблено і реалізовано методику статистичного моделювання випадкових процесів і полів, що дозволяє отримати додаткові реалізації параметрів в будь-якій точці середовища та в будь-який момент часу.

Подальша реалізація отриманих наробок планується при організації моніторингу за станом геологічного середовища на промайданчиках потенційно небезпечних об'єктів, територіях великих промислових агломерацій і розробках систем активного та пасивного моніторингу небезпечних геологічних процесів.

Робота виконана за підтримки Фонду фундаментальних та прикладних наукових досліджень Київського національного університету імені Тараса Шевченка в рамках тем 01БФ049-02 та 05БП049-01.

1. Осипов В.И. Природные катастрофы на рубеже XXI века // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2001. – № 6. – С. 483–488.
2. Осипов В.И. Оценка и прогнозирование рисков природных катастроф на территории России (доклад на заседании Президиума РАН 17 февраля 2004 г.) // Институт геоэкологии РАН. – М., 2004.
3. Стан техногенної та природної безпеки в Україні в 2001 р. – К., 2002.
4. Вижева С.А. Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. – К., 2004.
5. Продайвода Г.Т., Вижева С.А. Проблеми комплексної геодинамічної інтерпретації даних геофізичного моніторингу природних і техногенних процесів // Доп. НАН України. – 2004. – № 3. – С. 121–127.
6. Продайвода Г.Т., Вижева С.А. Проблеми геофізичного моніторингу небезпечних природних і техногенних явищ // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2001. – Вип. 19. – С. 8–15.
7. Продайвода Г.Т. Нова інтерпретаційна технологія геофізичного моніторингу небезпечних природних і техногенних процесів // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2002. – Вип. 23. – С. 5–7.
8. Продайвода Г.Т., Вижева С.А. Математичне моделювання геофізичних параметрів: Навчальний посібник. – К., 1999.
9. Маслов Б.П., Продайвода Г.Т., Вижева С.А. Математичне моделювання анізотропії швидкості розповсюдження пружних хвиль у тріщинуватому геологічному середовищі // Геофиз. журн. – 2000. – Т. 22, № 2. – С. 27–38.
10. Маслов Б.П., Продайвода Г.Т., Вижева С.А. Математическое моделирование влияния давления и температуры на скорость распространения упругих волн в трещиноватых горных породах // Геофиз. журн. – 2000. – Т. 22, № 3. – С. 113–118.
11. Маслов Б.П., Продайвода Г.Т., Вижева С.А. Акустопружні ефекти в мікротріщинуватому геологічному середовищі // Геофиз. журн. – 2001. – Т. 23. – № 5. – С. 92–100.
12. Продайвода Г.Т., Маслов Б.М., Вижева С.А. Сейсмоакустична діагностика небезпечних природних і техногенних процесів // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2003. – № 26. – С. 5–7.
13. Вижева С.А., Вижева З.О., Демидов В.К. Статистичне моделювання карстово-суфозійних процесів на території потенційно-небезпечних об'єктів // Геоінформатика. – 2004. – № 2. – С. 78–86.
14. Вижева С.А., Вижева З.О., Демидов В.К. Дослідження можливостей практичного застосування методів статистичного моделювання дво- та тривимірних полів для контролю за небезпечними геологічними процесами // Матеріали V Міжнар. наук. конф. "Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища". – К., 2004. – С. 9–11.