

ГЕОФІЗИКА

УДК 525.62 : 551.24

А. Назаревич, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.

**МЕТОДИКО-АПАРАТУРНІ ПРОБЛЕМИ МОНІТОРИНГОВИХ
ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ШЛЯХИ ЇХ РОЗВ'ЯЗАННЯ
(НА ПРИКЛАДІ ГЕОФІЗИЧНОГО СЕЙСМОПРОГНОСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ В ЗАКАРПАТТІ)***(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол.-мінералог. наук, проф. С.А. Вижвою)**В роботі на прикладі геофізичних сейсмопрогностичних моніторингових досліджень у Закарпатті розглянуто способи розв'язання ряду проблем методико-апаратурного забезпечення таких досліджень.**In the article on example of geophysical seismoprostnostic monitoring researches in Transcarpathians the ways of solution of number of problems of methodical-apparatus supplying of such researches are considered.*

Вступ. Геофізичні дослідження активно розвиваються впродовж багатьох десятиріч і широко використовуються для розв'язання різних задач (геомоніторинг, нафтогазорозвідка, геотехнічні дослідження та ін.). Серед цих задач останнім часом у зв'язку з катастрофічними землетрусами останніх років (Суматра, 2004/2005; Китай, 2008; Гаїті, 2010; Чилі, 2010; Японія, 2011 та ін.) на перший план виходить геофізичний моніторинг сейсмотектонічних процесів та сейсмопрогностичні дослідження. Основними проблемами при цьому завжди були, зокрема, проблеми методико-апаратурного забезпечення геофізичних досліджень – дослідження нових геофізичних характеристик геологічного середовища, вивчення та аналіз нових геофізичних ефектів і явищ, застосування нових фізичних ефектів для побудови геофізичної апаратури та ін. Серед інших проблем важливе місце займає створення найбільш ефективних методик аналізу геофізичних даних – як формальних математичних (спектральних, кореляційних, статистичних тощо), так і фізико-математичних (тобто, з закладеними математичними моделями відповідних сторін та аспектів досліджуваних геофізичних процесів і явищ). До найважливіших проблем належать також проблеми фінішного (завершального) етапу – комплексний аналіз та інтерпретація геофізичних даних з врахуванням, поєднанням та взаємоузгодженням різних сторін досліджуваних процесів і явищ, різних геофізичних полів, із залученням також даних геології (в т.ч. з свердловин) та інженерної геології, геодезії (нівелювання, триангуляція, трилатерація, світловіддалемірні та GPS-дослідження), геоморфології, метеорології, астрономії. Аналізу ряду з перелічених проблем геофізики та способів їх розв'язання на прикладі геофізичних сейсмопрогностичних моніторингових досліджень у Закарпатті присвячена дана робота.

Проблеми методико-апаратурного забезпечення геофізичних досліджень. Одними з перших перед дослідниками-геофізиками постають проблеми вибору оптимальних методик геофізичних досліджень, щоб забезпечити якнайбільш ефективне розв'язання поставлених задач (з максимумом інформативності та мінімумом фінансових, матеріальних та інших затрат). Стосовно геофізичних сейсмопрогностичних моніторингових досліджень у Закарпатті, які проводяться нами вже впродовж понад 30 років [1–15, 17, 19] на мережі режимних геофізичних станцій (РГС) та пунктів спостережень, одними з найбільш ефективних щодо виявлення провісників місцевих закарпатських землетрусів виявились геоакустичні та деформографічні дослідження [1–3, 5–10, 12–15], які проводяться, зокрема, в районі Берегівського горбогір'я (рис. 1 а). Методики, апаратура та результати геоакустичних досліджень у Закарпатті вже досить широко описані нами у ряді публікацій ([1–3, 10, 14] та ін.). Тут зупинимось на деформографічних дослідженнях, які започатковані в Закарпатті О. Юркевич, Л. Латиніною, Т. Вербицьким [2, 3, 5, 6], а зараз продовжуються та розвиваються нами на РГС "Берегове" (рис. 1 б) з розроб-

кою та впровадженням нової сучасної апаратури.

Апаратурне забезпечення деформографічного моніторингу. Результати проведених раніше у Закарпатті в районі Берегівського горбогір'я деформографічних досліджень [5, 6] спільно з геоакустичними даними дозволили проконтролювати зміни геомеханічного режиму літосфери Закарпаття в періоди активізації місцевого сейсмотектонічного процесу та підготовки місцевих закарпатських землетрусів (зокрема, з Виноградівської сейсмогенної зони), виявити та проаналізувати деформаційні провісники цих землетрусів і кількісно оцінити деформації у вогнищевій зоні [8, 9, 13]. Все це стало стимулом і аргументом для подальшого розвитку в регіоні деформографічних досліджень, зважаючи також на наявність на РГС "Берегове" (див. рис. 1 б і 2 а) і "Королево" вже встановлених у підземних камерах (шtolьнях) кварцових деформографів.

Принцип дії кварцового деформографа наступний [6] – прилад вимірює стиск або розширення ділянки масиву порід на віддалі, рівній базі приладу (кварцовій штанзі, яка є еталоном довжини, бо не змінює своєї довжини з часом чи під дією метеофакторів). Один з кінців кварцової штанги жорстко закріплюється в породі, а вимірювально-реєструюча система вимірює зміщення вільного кінця штанги відносно породи. Оскільки досліджувані припливні та тектонічні зміни деформацій є дуже малими (10^{-8} – 10^{-6}) і вивчаються на фоні різних завад (в першу чергу метеорологічного походження), то для мінімізації впливу метеофакторів (добових та сезонних змін температури і вологості повітря та породи) на результати вимірювань деформографи розміщуються в підземних виводах на глибині декількох метрів від денної поверхні [5, 6].

Апаратура з оптико-електронною системою вимірювання мікропереміщень. Але, оскільки використовувана раніше деформографічна апаратура з фотореєстрацією деформацій (мікропереміщень) [8] була малочутлива, ненадійна та незручна в експлуатації, постала задача її вдосконалення та модифікації на сучасному апаратурно-методичному рівні. Першим варіантом модернізації стала розробка у 1999–2002 рр. на базі старої системи з фотореєстрацією нової з оптико-електронною системою вимірювання мікропереміщень [7] та реєстрацією на чорнильні перописці з подальшим паралельним перетворенням даних у цифрову форму і реєстрацією їх на комп'ютері чи спеціальному автономному запам'ятовуючому пристрої (флеш-пам'яті). Незважаючи на обладдйливі результати дослідної експлуатації даної системи у 2001–2002 рр. (чутливість каналу складала не гірше 10 нм/мм при реєстрації на перописці) через нестійкість дзеркальної оптичної системи до кліматичних умов у шtolьні (висока вологість) та брак фінансування для переробки конструкції приладу розвиток апаратурних робіт у даному напрямку був призупинений.



Рис. 1. Розташування пунктів геофізичних спостережень у центральній частині Закарпаття (а) (на картооснові Google) та розріз штольні РГС "Берегове" (б) (показано розташування деформографів)

Комп'ютеризована система вимірювання мікропереміщень з безконтактним ємнісним датчиком. Зараз нами реалізовано інший варіант деформографічної апаратури [12] з використанням системи вимірювання мікропереміщень з ємнісним датчиком (так званого деформометра дистанційної дії), розробленої у ФМІ ім. Карпенка НАН України (м. Львів) під керівництвом проф. Б. Мицика (див. рис. 2 а). Сам пристрій складається зі спеціального ємнісного вимірювального датчика і вимірювального блока, забезпечує

цифрове вимірювання мікропереміщень з чутливістю і роздільною здатністю 10 нм, а також контроль температури датчика з чутливістю і роздільною здатністю $0,01^{\circ}\text{C}$, що дозволяє вносити в результати вимірювань відповідні температурні поправки. Прилад видає дані про переміщення та температуру датчика на рідкокристалічне цифрове табло (рис. 2 а) а також в інтерфейс типу 422. По цьому ж інтерфейсу можливе керування режимом роботи приладу з боку комп'ютера.

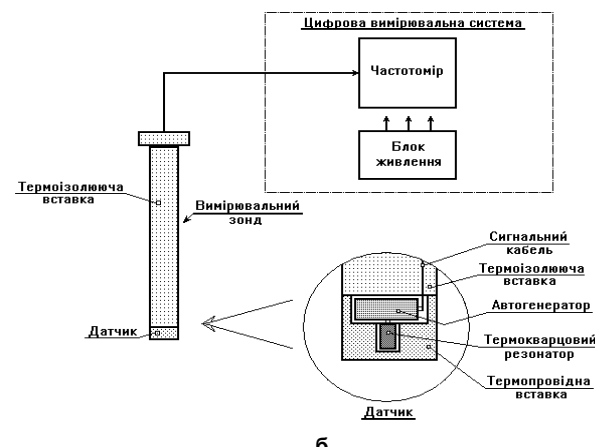


Рис. 2. Вимірювальний блок деформометричної системи з ємнісним датчиком на "короткому" ($L=6,5$ м, аз. 52°) деформографі в штольні РГС "Берегове" (а) та апаратура геотермічного моніторингу для РГС "Берегове" з кварцовим геотемпературним датчиком (структурно-функціональна блок-схема)

На базі цього приладу нами створена комп'ютеризована вимірювально-реєструюча деформографічна система (рис. 2 а), яка включає комп'ютер, спеціальний блок інтерфейсу 422 (створений на базі мікропрограмованих PIC-процесорів і вбудований у системний блок комп'ютера як плата розширення), блок безперебійного живлення (ББЖ) для комп'ютера та сам вимірювальний прилад. Керування роботою системи, зчитування, пре-процесинг і реєстрація даних на жорсткий диск з прив'язкою до системного часу здійснюється комп'ютером за допомогою спеціально розробленого і адаптованого програмного забезпечення [12, 16]. Забезпечення роботи системи при короткочасних (до кількох хвилин) перебоїв в електроживленні та коректне автоматичне відключення і наступне включення системи при більш довготривалих відключеннях електромережі забезпечує інтелектуальний ББЖ, зв'язаний з комп'ютером за допомогою інтерфейсу USB. Система пройшла тестові лабораторні та дослідні польові випробування і запущена в дослідну експлуатацію з кінця 2009 р.

Основні технічні характеристики даного апаратурного комплексу такі:

- діапазон вимірювання переміщень (деформацій) – $\pm 0,5$ мм

- чутливість вимірювання переміщень (деформацій) – 10 нм ($1,5 \times 10^{-9}$)
- частота вимірювання переміщень (деформацій) – 2 вим/с

- діапазон вимірювання температури – $0 \div 500^\circ\text{C}$
- чутливість вимірювання температури – $0,010^\circ\text{C}$
- частота вимірювання температури – 1 вим/8 с
- прив'язка по часу – до комп'ютерного часу.

Комплекс зберігає накопичені впродовж кожної години дані (деформація і температура, а також час кожного відліку (що нейтралізує вплив переривів у роботі)) в окремих годинних файлах об'ємом 270 кБ. Приклад отриманих цим комплексом деформографічних даних, оброблених згаданими вище спеціально розробленими утилітами [12, 16], наведено на рис. 3 а.

Підсумовуючи викладене з врахуванням відомих (10^{-7} – 10^{-6} у відносних одиницях [8, 9]) величин деформаційних сейсмотектонічних ефектів, можна стверджувати, що досягнутий рівень характеристик деформографічної апаратури здатен (при збільшенні хоча б до 4–5 кількості деформографічних пунктів) забезпечити контроль розвитку сейсмотектонічного процесу в основних сейсмогенних зонах Закарпатського прогину та реєстрацію деформаційних провісників відчутних місцевих землетрусів.

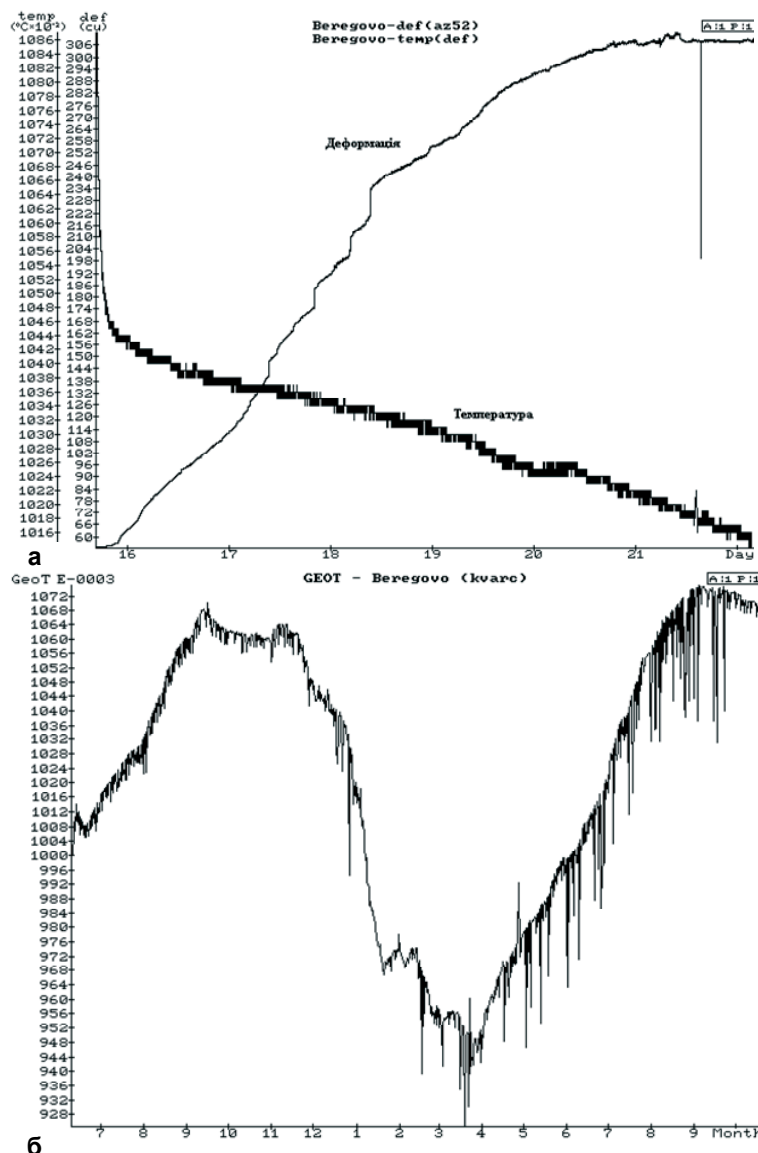


Рис. 3. Зміни деформацій по "короткому" (аз. 52°) деформографу (шкала в умовних одиницях) і температури повітря (шкала в сотих долях $^\circ\text{C}$) в зоні його розташування (тижневий ряд, з 15 до 22 грудня 2009 р.) (а) та зміни температури масиву порід штольні РГС "Берегове" (шкала в сотих долях $^\circ\text{C}$) за даними системи з кварцовим температурним датчиком за період з 10.06.2008 р. до 20.10.2009 р.

Апаратне забезпечення геотермічних досліджень. Як видно з викладеного вище, при проведенні деформографічних а також інших геофізичних досліджень, зважаючи на малі величини досліджуваних ефектів (10^{-8} – 10^{-6} по деформаціях) важливим є забезпечення мінімального (не більше 0,01–0,02°C для добових, і 0,2–0,5°C – для сезонних температурних варіацій) температурного впливу на породи в зоні вимірювань та апаратуру, а також надійний контроль змін температури порід, повітря та апаратури, що дозволяє в подальшому приносити в отримані дані відповідні температурні поправки.

Високочутлива геотермічна апаратура з кварцовим датчиком. Оскільки, в описану вище деформографічну систему з ємнісним датчиком уже включено високочутливий (0,01°C) датчик температури, іншим завданням було забезпечити надійний контроль змін температури порід у штольні РГС "Берегове". Для такого контролю нами використана геотермічна апаратура типу геотермічної станції ГС-1 розробки спеціалістів ІГГК НАН України (В. Осадчий з колегами [17, 18]), модифікована відповідно до умов досліджень на РГС "Берегове" (рис. 2 б). Перевагами цієї апаратури є висока чутливість кварцового датчика та всієї системи до змін температури (коефіцієнт перетворення – ~ 180 Гц/°C, приведена апаратурна точність вимірювань температури (по частоті) порядку $\pm 0,0025$ °C, а роздільна здатність $\sim 0,0005$ °C.) та зручність організації спостережень (сигнал частотою близько 5 МГц від датчика передається кабелем у апаратуру РГС і там вимірюється частотоміром і реєструється). Термодатчик встановлений у штольні РГС "Берегове" у пройденому на глибину 0,6 м у її підлозі шпурі (приблизно посередині довгого деформографа – див. рис. 1 б). Дана система працює на РГС "Берегове" вже з літа 2006 р. і показала себе надійною та ефективною. Отримані дані (рис. 3 б) дозволили спочатку простежити шляхи проникнення метеотемпературних впливів у штольню РГС, на цій основі розробити та реалізувати ряд заходів з їх мінімізації і в подальшому підтвердити ефективність цих заходів (сезонні варіації температури порід у штольні зменшились більш як у 3 рази (з 5,5°C у 2006 р. до 1,3°C у 2008 р.).

Свердловинний варіант геотермічної апаратури. Друга така ж система, тільки з зондом спеціальної конструкції та модифікованої схематехніки, здатним витримувати високий тиск води у свердловині при опусканні на глибину в кілька сотень метрів та передавати сигнал по кабелю на велику відстань [11], з кінця 2010 р. впроваджена нами для свердловинних геотермічних геомоніторингових досліджень і встановлена у геотермальній свердловині на пункті геотермічних спостережень "Косино" (Косонь), розташованому за 12 км на захід від РГС "Берегове" (див. рис. 1 а).

Враховуючи відомі [3, 11] величини вертикальних геотермічних градієнтів, зокрема, в геотермальних свердловинах Закарпаття, можна констатувати, що описана вище геотермічна апаратура здатна забезпечити надійний контроль змін тиску термальних флюїдів у глибинних флюїдонасичених тріщинуватих зонах величиною від 0,02–0,1 атм, і тим самим забезпечити контроль розвитку сейсмотектонічного процесу в Закарпатті та реєстрацію геотермічних провісників відчутних місцевих землетрусів.

Висновки. Беручи до уваги все викладене вище, можна зробити загальний висновок – сучасний стан розвитку геофізичних досліджень, електроніки та апаратних розробок, фізики загалом як основи для побудови високоефективних геофізичних приладів та систем, комп'ютерів як засобів сучасної обробки геофізичних даних, дозволяють при належному фінансуванні та організаційно-технічному забезпеченні робіт ефективно реалізувати всі ті завдання, які стоять перед геофізичним моніторингом сейсмотектонічних процесів та сейсмопрогностичними дослідженнями як у світовому, так і в регіональному (включаючи Українське Закарпаття) масштабі.

1. Вербицкий Т.З., Бойко Б.Д., Струк С.С., Назаревич А.В. Геоакустические и микросейсмические исследования состояния земной коры на Карпатском прогностическом полигоне // Современные геодинамические процессы и прогноз землетрясений. – К., 1987. – С. 57–61.
2. Вербицкий Т.З., Гнип А.Р., Малицкий Д.В. та ін. Микросейсмічні і деформаційні дослідження в Закарпатті: результати та перспективи // Геофіз. журн. – 2003. – 23, № 3. – С. 99–112.
3. Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат / Під ред. В.І. Старостенка. – К., 2005.
4. Карпатский геодинамический полигон / Под ред. Я.С. Подстригача и А.В. Чекунова. – М., 1978.
5. Латынина Л.А., Байсарович И.М., Брымых Л., Варга П., Юркевич О.И. Деформационные измерения в Карпато-Балканском регионе // Физика Земли. – 1993. – № 1 – С. 3–6.
6. Латынина Л.А., Юркевич О.И., Байсарович И.М. Результаты деформационных измерений в районе Берегового // Геофіз. журн. – 1992. – 14, № 2. – С. 63–67.
7. Назаревич А. Деформографічні дослідження в районі м. Берегового на Закарпатті // Праці НТШ. Т. XVII: Геофізика. – Львів, 2006. – С. 129–139.
8. Назаревич А.В. Геофізичні провісники деяких відчутних закарпатських землетрусів як відображення процесів формування вогнищевих зон // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2010. – С. 274–285.
9. Назаревич А.В. Деформаційні провісники відчутних Виноградівських землетрусів Закарпаття: аналіз деформаційних процесів та оцінка величин деформацій у вогнищі // Вісник Київського університету. Геологія. – 2008. – № 45. – С. 23–30.
10. Назаревич А.В. Експериментальне дослідження спектрально-часової структури варіацій параметрів пружних хвиль в масивах гірських порід: Автореф. дис... кандидата фіз.-мат. наук. – К., 1997.
11. Назаревич А.В., Микита А.Ю. Метеотемпературні поля в масивах порід (як фактор впливу на результати деформографічних спостережень на РГС "Берегове" у Закарпатті) // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2010. – С. 286–299.
12. Назаревич А.В., Мицик Б.Г., Баштевич М.В., Назаревич Р.В. Деформографічні дослідження сейсмотектонічних процесів в Українському Закарпатті (геоінформаційні аспекти) // Geoinformatics – Theory and Applied Aspects: IX International Conference, Kyiv, Ukraine, 11–14 May 2010. – Kyiv, 2010 (CD).
13. Назаревич А.В., Назаревич Л.Є. Деформаційні провісники закарпатських землетрусів: методики виділення та результати аналізу // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2008. – С. 311–320.
14. Назаревич А.В., Назаревич Л.Є. Нелінійна пружність і тензочутливість гірських порід (дослідження та застосування для геодинамічного моніторингу) // Вісник Київського університету. Геологія. – 2002. – № 23–24. – С. 33–38.
15. Назаревич А.В., Насонкин В.А., Боборыкина О.В., Назаревич Л.Є. Оценка деформаций в очагах землетрясений по величине предвестниковых деформационных аномалий (на примере землетрясений Черноморского региона и данных лазерного интерферометра в Севастополе, Украина) // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. – Ташкент, 2010. – № 7, Т. 1. – С. 166–170.
16. Назаревич Р., Мархивка В., Струк С., Назаревич А. Конвертація та препроцесинг даних деформографічного моніторингу // Вісник НУ "ЛП" "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". – Львів, 2011. – № 694. – С. 334–340.
17. Осадчий В.Г., Назаревич А.В., Назаревич Л.Є. Характеристики температурного режиму приповерхневих шарів гірських порід за даними досліджень на геофізичній станції "Лисовичі" (Передкарпаття) // Геодинаміка. – 2008. – 1 (7). – С. 96–102.
18. Чекалюк Э.Б., Федорцов И.М., Осадчий В.Г. Полевая геотермическая съемка. – К., 1974.
19. Nazarevych A., Nazarevych L., Nasonkin V., Boborykina O. Extensometric researches in Ukraine: methods, instruments, results // Геофіз. журн. – 2010. – 32, № 4. – С. 121–123.

Надійшла до редколегії 28.05.09