

УДК 550.34.056

Д.В. Малицький, канд. фіз.-мат. наук, С.В. Кравець, асп.

## ДЕФОРМОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ЗАКАРПАТТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАЗЕРНОГО РЕЄСТРАТОРА

*Розглядається високоточний лазерний пристрій для вимірювання деформацій гірських масивів. Показано важливість моніторингу за змінами напружено-деформованого стану гірських порід за допомогою комплексного аналізу різних геофізичних полів. Досліджується зв'язок між градієнтом температури в гірському масиві і змінами деформацій.*

*It is considered a high-precise Laser deformograph for deformation measurement in rock massifs. It is demonstrated the importance of monitoring the stresses and strains in rock massifs based on the complex analysis of different geophysical fields. The relation is studied between gradient in rock massif and changes of deformations.*

На сьогоднішній день в Україні і у світі надзвичайно актуальною є задача реєстрації та дослідження повільних рухів земної кори, викликаних тектонічними і сейсмотектонічними процесами, гравітаційною дією Місяця і Сонця, довгоперіодними сейсмічними хвилями, зсувними, метеорологічними і техногенними процесами. Для дослідження таких явищ використовуються деформографи, що вимірюють відносне зміщення двох точок масиву гірської породи. Деформації у гірських масивах є наслідком зміни геодинамічних процесів, які проявляються як в локальному, так і в регіональному масштабах. Перевагою таких досліджень є висока чутливість до змін деформацій, наприклад,  $10^{-9}$ - $10^{-13}$  для лазерного інтерферометра і широкий частотний діапазон (від нуля до десятків герц).

Завданням деформографічних досліджень в Закарпатті є вивчення геодинаміки літосфери регіону у контрольованих масивах гірських порід і виявлення процесів, які пов'язані з підготовкою землетрусів [1-3,5-9]. Такі дослідження раніше проводились в Закарпатті спільно з Інститутом фізики Землі РАН (Москва), але за відсутності фінансування були зупинені ще в 2003 році. На сьогоднішній день відновлено виміри деформацій на режимній геофізичній станції в районі м.Берегове (РГС "Берегове"), так як цей район є ключовим у тектонічній структурі літосфери Закарпаття. РГС "Берегове" знаходиться на північно-західному схилі гори Ардова. У штольні знаходяться дві горизонтальні штанги, на одній з

яких розміщений лазерний реєстратор. Слід відзначити, що за останні декілька десятиліть для реєстрації сейсмічних полів було розроблено і впроваджено різні модифікації перетворювачів для деформографів: механічні, світлові, п'єзо, тензо, конденсаторні і лазерні. Для механічних є характерним багатоланкова система передачі переміщення; для світлових – нестабільність освітлення і зміна характеристик фотоелементів; для п'єзо і тензо – нелінійність перетворення сигналу, малий динамічний діапазон, поступове руйнування кристалічної структури перетворювача, зміни температури і тиску; для конденсаторних – значний вплив температури і тиску, вологості, монтажних з'єднань, недовговічність і нелінійність, обмежений динамічний діапазон. Найкращі характеристики, на думку авторів має прилад, описаний у роботах [1,2,4,6,8,9]. Автори даної статті розробили і впровадити для збору деформографічної інформації перетворювач на сучасній елементній базі з відповідними характеристиками, який є простий в обслуговуванні і експлуатації, з уніфікованим цифровим і паралельним аналоговим зняттям інформації.

Методика досліджень, фізичні характеристики і застосування лазерного реєстратора для деформографічних досліджень на РГС "Берегове" опубліковані авторами в роботі [4].

Пояснимо принцип роботи запропонованого деформографа, згідно рис.1.

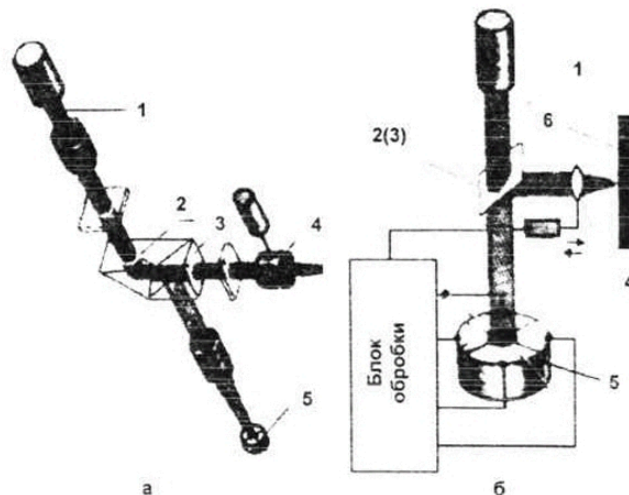


Рис.1 Схема оптичної системи реєструючого пристрою

Основою реєструючого пристрою є напівпровідниковий арсенід-галієвий лазер потужністю 2 мВт, прецизійна оптична лінза і фотодіодна матриця і монолітна електронна схема керування. За рахунок малої фокусної відстані лінзи промінь лазера проектується зменшеним

в діаметрі в 1000 раз. В 1000 разів зменшуються і всі завади на його шляху.

Промінь 1 діаметром 1 мм (рис.1а), проходячи через призму 2, заломлюється на кут  $90^\circ$ , проходить через напівпрозору призму Фуко 3 і фокусується рухомою лінзою 4 в пляму 1 мкм на відбиваючій поверхні 6

(рис.16). Максимальна відстань від лінзи до відбиваючої поверхні 1,5 – 2,5 мм. Відбитий промінь проходить назад через фокусуючу лінзу 4, попадає на напівпрозору призму Фуко 3, переломившись на кут  $90^\circ$ , попадає на фотодіодну матрицю 5. Діаметр плями на фотодіодній матриці 5 становить 1 мкм. Він перемещується електронікою і виділяється для керування позицій рухомої лінзи 4. Для стабільної відбиваючої поверхні та співпадінні за фазою відбитого і прямого променя і розмірі плями 1 мкм, яка відображена на фотодіодній матриці, керуючий сигнал розфокусування для лінзи 4 дорівнює нулю. При переміщенні відбиваючої поверхні 6 змінюється діаметр плями на фотодіодній матриці, виробляється сигнал управління рухомою лінзою 4. За рахунок електромеханічного зворотнього зв'язку, відстань між лінзою 4 і відбиваючою поверхнею дзеркала 6 підтримується з високою точністю, а сигнал керування рухомою лінзою 4 кількісно відображає переміщення відбиваючої поверхні 6 (рис.16). Підкреслимо ще раз, що сигнал розфокусування при переміщеннях, менших від довжини хвилі випромінювання (різниця фаз між прямим і відбитим променями) відстежується з високою точністю. Чутливість деформографа становить порядку 0,16 мкм. Динамічний діапазон вимірів деформацій становить від 0,16 мкм -980км [4]. Частотний діапазон (0-50 Гц) дає змогу фіксувати статичні переміщення, що в свою чергу також дозволяє приладу досить детально досліджувати припливні деформації, власні коливання Землі, сейсмічні поля, які викликані землетрусами [2,3].

Відомо, що спостережувані припливні явища діляться на півдобові, добові і довгоперіодичні.

Припливоутворюючий потенціал  $\delta W_2$  можна обчислити за формулою:

$$\begin{aligned} \delta W_2 &= D \cdot \left( \cos 2z + \frac{1}{3} \right) = \\ &= D \cdot \left( 2 \sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \delta + \cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \delta - \frac{2}{3} \right) + \\ &+ D \cdot \sin 2\varphi \cdot \sin 2\delta \cdot \cos H + \\ &+ D \cdot \cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \delta \cdot \cos 2H, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\varphi$  – широта місця спостереження,  $\delta$  – відхилення світила,  $H$  – годинний кут,

$$D = \frac{3GM_L R^2}{4r^3} - \text{постійна Дудсона}, \quad (2)$$

$R$  – радіус земної кулі,  $GM_L$  – гравітаційна постійна,  $r$  – відстань, що з'єднує центри мас взаємодіючих сил.

Є зрозумілим, що постійна Дудсона не є постійною величиною: для Місяця, Сонця, Землі вона має різні значення. Перша група членів в (1) не залежить від годинного кута. Тут змінюється тільки кут відхилення світила  $\delta$ . Тому це є довгоперіодна частина припливоутворюючого потенціалу. Другий член в (1) є функцією від годинного кута  $H$ , який змінюється від 0 до  $2\pi$  на одну добу. Отже, він формує добовий приплив. Третій член є аргументом  $2H$ . Отже, цей член дає півдобовий приплив. Спостереження за деформаціями на РГС "Берегове" дозволяють нам виявляти компоненти припливоутворюючого потенціалу. На добовому записі 28.08.2006р. на РГС "Берегове" лазерним реєстратором (рис.2) достатньо чітко виділяється припливоутворюючий потенціал.

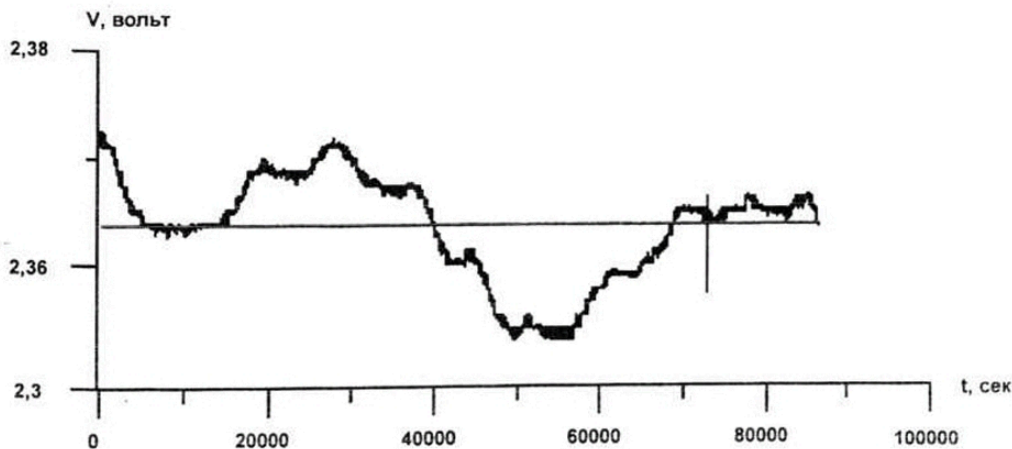


Рис. 2. Добовий запис припливоутворюючого потенціалу, записаний лазерним реєстратором 28.08.2006р. на РГС "Берегове"

На графіку відносно переміщення у вольтах відповідає 7 мкм діючого амплітудного значення припливоутворюючого потенціалу. Як було відзначено вище, деформографічні спостереження у Закарпатті проводяться з метою виявлення процесів, пов'язаних з підготовкою землетрусу.

Берегове знаходиться у зоні ланцюжка горбогір, що прилягають до зони одного з сейсмічно найактивніших у регіоні - Прип'янського глибинного розлому (рис.3)[3].

Сучасну активність Закарпатської сейсмогенної зони підтверджують її геотермічний і сейсмічний режими.

На рис.4 (а.б.) показано, що в загальному сейсмічна активність Закарпатської сейсмогенної зони має тенденцію до зростання за останні роки. Тому моніторинг за змінами напружено-деформованого стану гірських масивів за допомогою комплексного аналізу різних геофі-

зичних полів набуває особливого значення в цьому регіоні. Записи деформацій і температури на Закарпатті дають підстави стверджувати, що вплив температури в штольні є суттєвим, особливо підчас зміни пори року. Тому важливим є знайти зв'язок між градієнтом температури в гірському масиві і змінами деформацій, що є предметом досліджень на РГС "Берегове".

Співробітниками Інституту геофізики НАН України були проведені довгострокові безперервні спостереження за змінами температури гірських порід у свердловині на РГС "Тросник". Свердловина була ізольована від масиву порід обсадними трубами і заповнена рідиною. Заміри проводились на глибині 500 метрів. Сумарне зниження температури за шість років (1989-1998) становило майже  $0,21^\circ\text{C}$  [3]. Із 1997 почалося поступове підвищення температури.

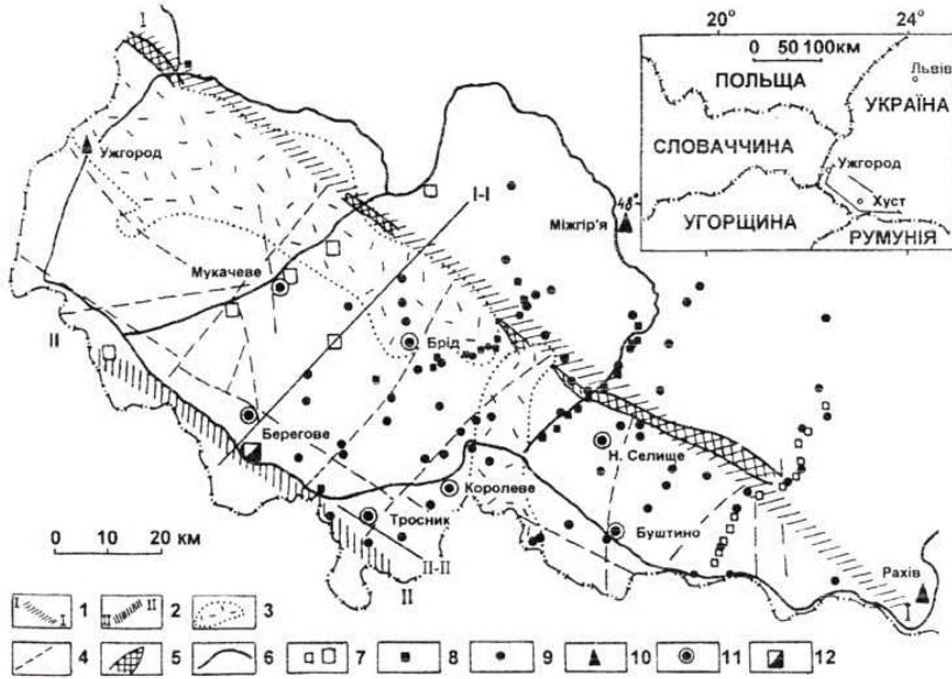


Рис. 3. Карпатський геодинамічний полігон: 1 – Закарпатський глибинний розлом, 2 – Припанонський глибинний розлом, 3 – Вигорлат-Гутинське вулканічне пасмо, 4 – розломи донеогенового фундаменту прогину, 5 – Пенінська зона, 6 – лінії повторного нівелювання, 7 – вікові універсальні репери, 8 – репери для комплексних (геомагнітних і геодезичних) спостережень, 9 – пункти вікового ходу, 10 – сейсмічні станції, 11 – режимні геофізичні станції, 12 – штольня

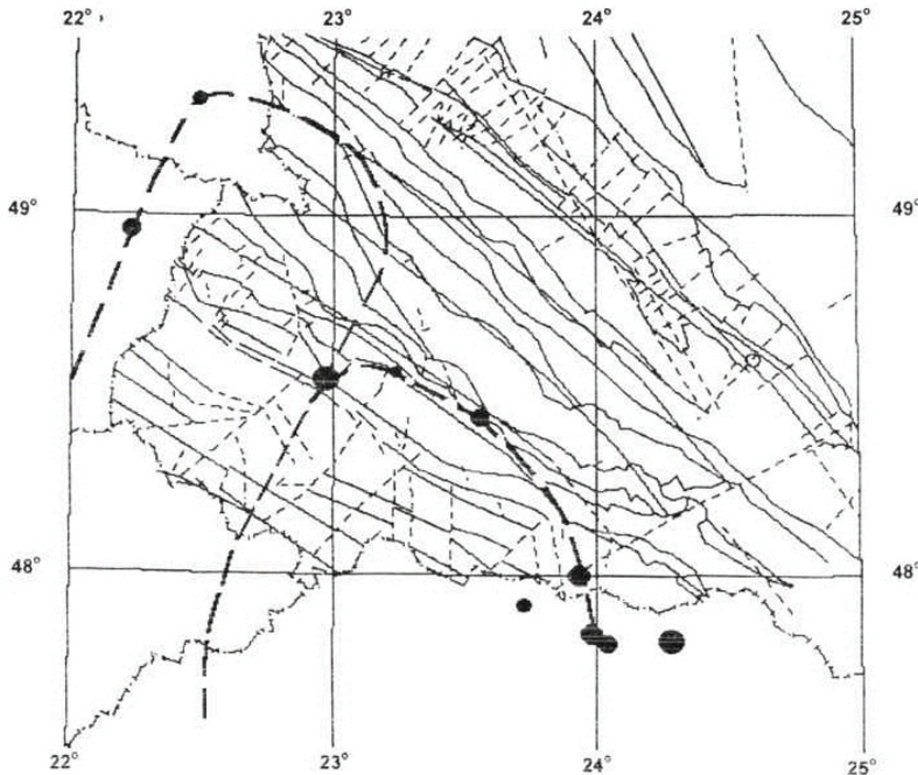


Рис. 4. а. Сейсмічна активність в Закарпатській сейсмогенній зоні у 1997 р.

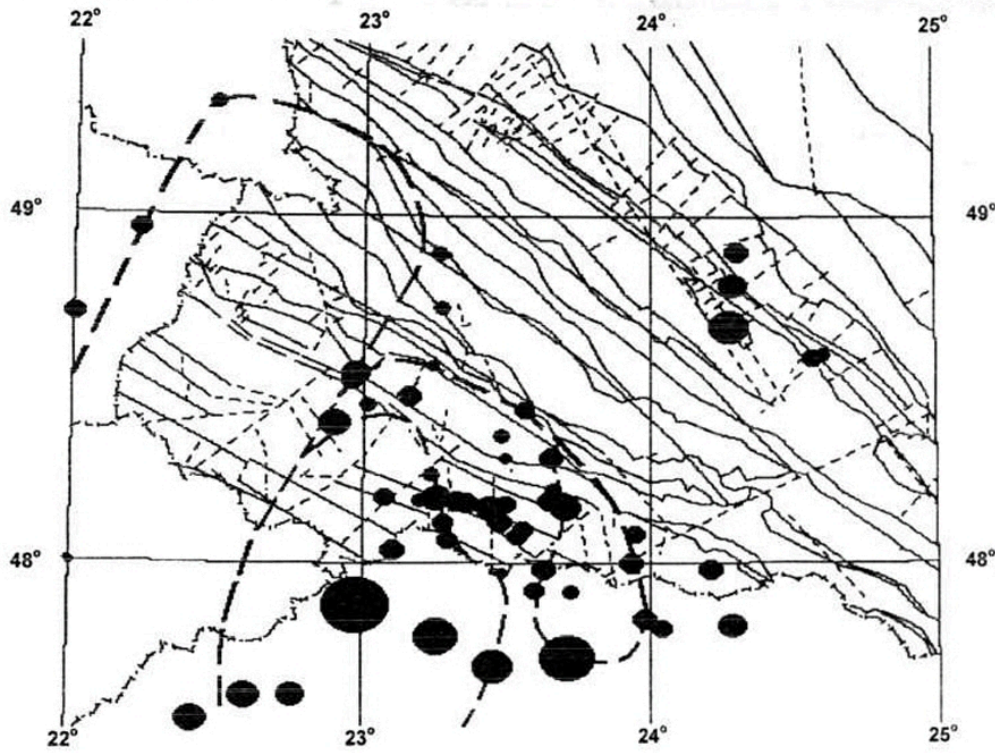


Рис. 4. 6. Сейсмічна активність в Закарпатській сейсмогенній зоні з 1997р. по 2004 р.

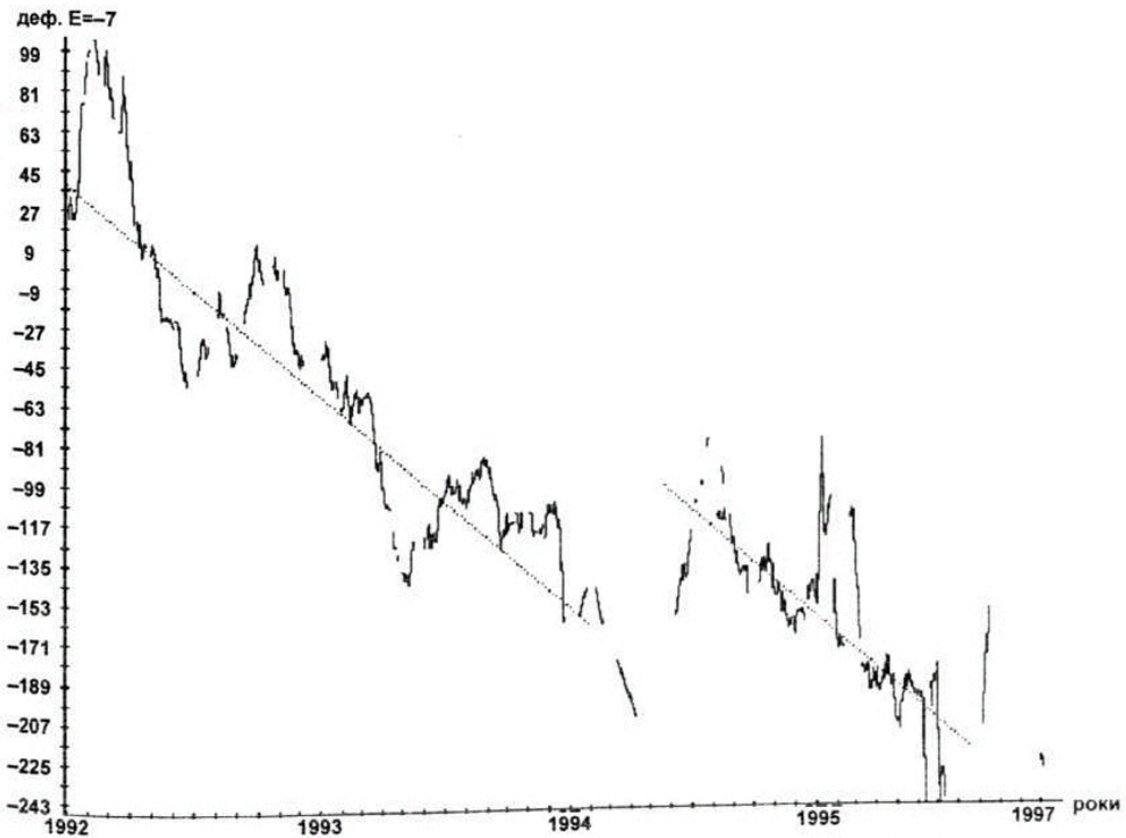


Рис.5. Деформації гірських порід на РГС "Берегове" за 1992-1997 роки (пунктиром показано трендову компоненту)

Спостереження за змінами температури проводились і на РГС "Берегове" на віддалі 26 км. від станції "Тросник". Зміни температури в часі і горизонтальної компоненти деформацій підтвердили зв'язок між градієнтом температури в гірському масиві і змінами дефо-

рмацій. Щодо природи такого зв'язку, то однозначного висновку зробити неможливо. Найімовірніше, це пов'язано із порушеннями гідрогеологічного режиму.

На рис. 5. приведено графік деформації гірських порід на РГС "Берегове" за 1992-1995 роки, взятий із мо-

нографії [3]. Як було сказано вище, на сьогоднішній день відновлено безперервні спостереження за змінами температури і деформацій на цій РГС.

Слід відзначити, що важливе місце у деформографічних дослідженнях зайняли роботи з вдосконалення апаратури і забезпечення безперебійної її роботи. Важливим є, також, проведення робіт на РГС "Берегове" по реєстрації геоакустичного поля і проведення кореляцій-

ного аналізу всіх зареєстрованих геофізичних полів. Але вже за даними деформографічних спостережень можна підтвердити висновок, що літосфера у районі Березівського горбогір'я знаходиться у складному напружено-деформованому стані. На записах деформацій у 2005 і 2006 рр. виявлено події, що пов'язані з сейсмічною активністю регіону. Зокрема, 19 липня 2005 р. (рис. 6) виявлена подія, яка по своїй формі дуже близька до сейсмічної.

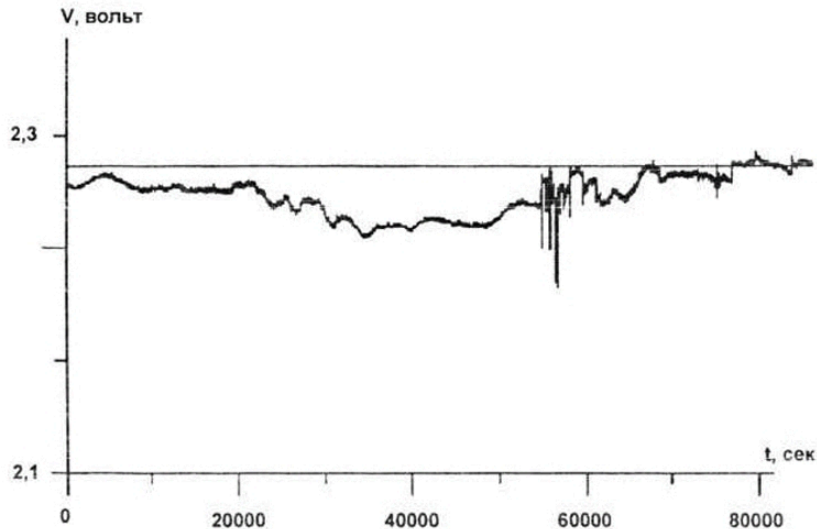


Рис.6. Добовий запис приливуотворюючого потенціалу, записаний лазерним реєстратором 19.07.2005р. на РГС "Берегове". На фоні запису зафіксована сейсмічна подія

Записи деформацій за 2005 і 2006 рр зареєстрували аналогічні події. За результатами спектрального і кореляційного аналізу отриманих даних, зареєстрованих лазерним реєстратором у варіаціях деформацій (рис. 7) на РГС "Берегове" чітко виділено тектонічні (найбільш

великоамплітудні і низькочастотні) складові, виражені добові, півдобові і 2-годинні складові припливних деформацій, у 2-3 рази порівняно менші метеотемпературні впливи і зміна температури у штольні.

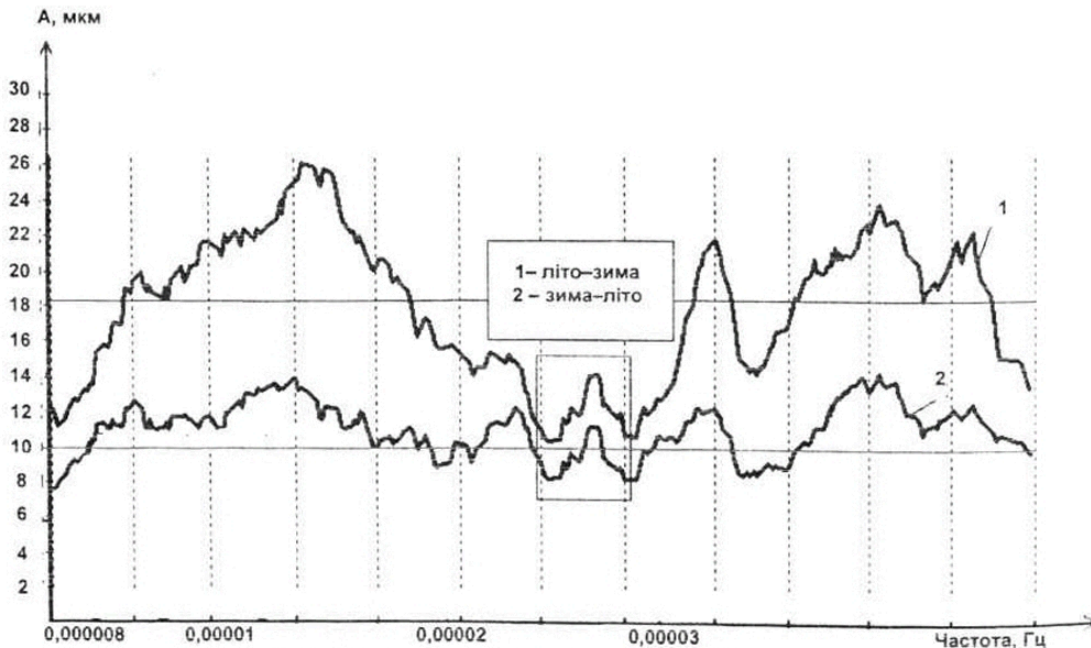


Рис. 7. Добовий амплітудний спектр приливних деформацій масиву на РГС "Берегове" (за даними вимірів лазерним реєстратором на протязі 2005-2006р. і його залежність від пори року)

Графіки на рис. 7 одержані у випадку чітких і безперервних записів деформацій за 2005 і 2006 рр. і від-

ображають добовий амплітудний спектр приливних деформацій в залежності від пори року. Перервані записи

за рахунок неполадок апаратури чи відключення електроенергії на протязі доби, не враховувалися.

На основі одержаних результатів можна зробити висновок, що деформографічні дослідження є важливими для вивчення напружено-деформованого стану гірських масивів.

Крім цього, зв'язок деформацій і сейсмічних подій, зареєстрованих на РГС дозволить вийти на прогностичні параметри землетрусів, що є однією з найважливіших задач сейсмології. Отримані за час спостережень дані про деформаційні процеси в земній корі досліджуваних районів в комплексі з іншими даними дозволять зробити важливі висновки про зв'язок цих деформацій з тектонікою, геодинамікою і сейсмічним режимом даної території, а також про особливості геомеханічного режиму літосфери цілого регіону.

1. Алешин В.А., Горшков А.С., Дубров М.Н., Иванов И.П., Скепко А.Г. Лазерный интерферометр для деформографических наблюдений в зоне Сурхобского тектонического разлома, Известия АН СССР, Физика Земли,

1986, №3, С.80-87. 2. Алешин В.А., Дубров М.Н., Яковлев А.П. Геофизический лазерный деформограф штольневго типа, Физика Земли, 1993, №4, С.62-68. 3. Максимчук В.Ю. та інші. Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат, Київ, Наукова думка, 2005, С.254. 4. Кравець С.В., Малицький Д.В. Лазерний реєстратор для деформографічних досліджень, Науковий вісник Ів.-Франківського НТУ нафти і газу, 2005, №1(10), С.37-41. 5. Bobroff N. Recent Advances in Displacement Measuring Interferometry, Measurement Science and Technology, 1993, Vol 4, Iss 9, P. 907-926. 6. Araya A., Kawabe K., Sato T., Mio N., Tsubono K. Highly Sensitive Wide-Band Seismometer Using a Laser Interferometer, Review of Scientific Instruments, 1993, Vol 64, Iss 5, P. 1337-1341. 7. Дубров М.Н., Латынина Л.А., Матвеев Р.Ф., Пономарев А.В. Наблюдение сверхдлиннопериодных деформационных колебаний земной поверхности, связанных с малыми вариациями атмосферного давления, Физика Земли, 1998, №12, С.22-30. 8. Alyoshin V.A., Mahmoud S.M., Loskutov V. Laser strainmeter at Helwan Geodynamical Observatory for high resolution measurements of Earth's crustal deformation, The Ninth International Symposium on Recent Crustal Movements CRCM'98, November 14-19, 1998, Cairo, Egypt, Abstracts, Cairo, NRIAG, A1, 1998. 9. Дубров М.Н., Матвеев Р.Ф. Разработка и исследование многокомпонентных геофизических лазерных интерферометров-деформографов. Радиотехника и электроника, 1998, Т.43, №9, С.1147-1152.

Надійшла до редколегії 29.11.06

УДК 550.831

П.О. Міненко, канд. геол.-мін. наук

### ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗКУ ОБЕРНЕНОЇ ЛІНІЙНОЇ ЗАДАЧІ ГРАВИМЕТРІЇ З ФІЛЬТРАЦІЄЮ ВИСОКОІНТЕНСИВНИХ ПОХИБОК ПОЛЯ АНАЛОГАМИ ФІЛЬТРІВ ВІНЕРА Й КАЛМАНА

*У результаті інтерпретації гравітаційної карти поле сили тяжіння трансформовано в аномальну (надлишкову) щільність гірських порід двох- та трьохшарової моделі верхньої частини геологічного розрізу земної кори.*

*As a result of interpretation of a gravitational card the field of a gravity is transformed to abnormal density of rocks two- and three-layer model of the top part of a geological cut of an earth's crust.*

Для пошуків рудних покладів у кристалічних породах УКЩ використовується гравіметрія, в тому числі і методи розв'язку оберненої лінійної задачі гравіметрії (ОЛЗГ) [1].

При виконанні розв'язку ОЛЗГ використовують апроксимацію нижнього півпростору геометричними тілами простої форми [1-3]. Наприклад, його розділяють на горизонтальні шари постійної або змінної потужності, а усередині кожного шару виділяють блоки, як правило, паралелепіпеди або тригранні призми й піраміди [4]. Однак, залежно від рівня похибок поля, в оптимізованих ітераційних процесах [5] досить часто, замість фізично змістовних величин, розв'язок ОЛЗГ представляє собою еквівалентний, беззмістовний розподіл аномальної щільності кожного з блоків, що у межах точності відповідає спостереженому полю сили тяжіння. Застосовуючи принцип обов'язкового покриття проєкції всіх блоків точками спостереження поля [4-7], одержують коректну модель оберненої лінійної задачі, розв'язок якої для одного шару блоків є фізично змістовним. Але для двох і більше шарів (із блоками в кожному) у розв'язку ОЛЗГ проявляється еквівалентність аномальної щільності, що призводить до геологічної беззмістовності отриманого розв'язку [6].

**Постановка задачі.** Для підвищення точності й геологічної змістовності розв'язку ОЛЗГ при довільних початкових умовах необхідно розробити метод її розв'язку, який використовує диференціацію блоків гірських порід за їх об'ємом  $v(i) = v_i$ ; ( $i = 1, M$ ) та дозволяє застосувати схему чередування декількох ітераційних процесів умовної й безумовної оптимізації з умовно-екстремальним критерієм по мінімуму суми квадратів аномальних мас усіх блоків, аналогів фільтрів Вінера-Калмана й методу спряжених градієнтів із критерієм мінімуму суми квадратів поправок до щільності [8-10].

**Результати досліджень.** Оскільки, з одного боку, ітераційний метод із критерієм мінімуму суми квадратів поправок до щільності фільтрує інтенсивні похибки разом з хорисними локальними інтенсивними аномалі-

ями сили тяжіння, то для деяких блоків не може бути досягнуто розв'язок задачі, близький до істиного. З іншого боку, самостійно аналог фільтрів Вінера й Калмана й метод спряжених градієнтів не можуть вийти на розв'язок ОЛЗГ без наближеного розподілу, що його обгинає. Тому нижче приводяться ефективні ітераційні методи одержання обгинаючого розв'язку ОЛЗГ (умовна й безумовна оптимізація) і його корегування.

Запишемо декілька найбільш ефективних критеріїв і алгоритмів з одним ітераційним параметром  $\tau_c$  для всіх невідомих значень аномальної щільності блоків  $x_i$  (або по одному параметру  $\tau_i$  для кожного блоку):

$$x_{i,n+1} = x_{i,n} - \tau_{n+1} \cdot B_{i,n};$$

$$x_{i,n+1} = x_{i,n} - \tau_{i,n+1} \cdot B_{i,n};$$

$$\lambda_i = \sum_j a_{ij} \lambda_j = \sum_j a_{ij};$$

$$R_{j,n} = r_{j,n+1} + g_j; r_{j,n} = (a_{ij} x_{i,n}) - g_j;$$

$$r_{j,n+1} = r_{j,n} - (a_{ij} B_{i,n} \tau_{i,n+1});$$

$$B_{i,n} = (a_{ij} / \lambda_i / \lambda_j, r_{j,n}); M_n =$$

$$= \sum_i (\sum_j (a_{ij} (x_{i,n} - \tau_{i,n+1} \cdot B_{i,n}) - g_j))^2 = \delta^2;$$

$$Z_j = (a_{ij} B_{i,n}); Z_{ij} = (a_{ij} / \lambda_i, Z_j / \lambda_j);$$

$$1) F_1 = (x_{i,n+1}^2, v_i^2) \xrightarrow{\tau_{n+1}} \min;$$

$$\tau_{n+1,1} = (v_i^2 x_{i,n} B_{i,n}) / (v_i^2 B_{i,n}^2);$$

$$2) F_2 = \sum_j (B_{i,n+1})^2 v_i^2 \xrightarrow{\tau_{n+2}} \min;$$

$$\tau_{n+1,2} = (v_i^2 B_{i,n} Z_{ij}) / (v_i^2 Z_{ij}^2);$$

$$3) F_3 = \sum_j r_{j,n+1}^2 \xrightarrow{\tau_{n+3}} \min;$$

$$\tau_{n+1,3} = (r_{j,n+1} Z_j) / (Z_j Z_j);$$