

ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ ЦИФРОВИХ СЕЙСМІЧНИХ І ПРИПЛИВНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НА МИСІ ХЕРСОНЕС (М. СЕВАСТОПОЛЬ)

Вступ

Кримська сейсмогенеруюча зона має значний сейсмічний потенціал. Дослідженнями сейсмічного режиму цього регіону займалися кілька десятків спеціалістів різного профілю: сейсмологів, геотектоніків, сейсмоархеологів та інших. Найбільш відомі дослідження А.В. Чекунова, Н.В. Шебаліна, А.А. Ніконова, Б.Г. Пустовітенко, Л.С. Борисенко [1]. Складені каталоги сейсмічних подій та карти сейсмічного районування. Дані про катастрофічні землетруси в Криму відомі майже за 2500 років. Не зважаючи на деякі розбіжності, в Криму всі дослідники виділяють зони з небезпекою 9-бальних струшувальних і декілька сейсмогенеруючих зон, розташованих переважно в прибережній смузі від Севастополя до Керчі. Показано, що сильні землетруси з M до 7.0 і більше можливі не тільки поблизу Ялти, а й у Східно-Кримській та Західно-Кримській сейсмогенних зонах.

Згідно з А.А. Ніконовим [2], в Севастопольській і в Керченській 9-бальних зонах в найближчі 10-50 років можливі катастрофічні землетруси з $M > 7.0$. Цей висновок впливає з періодичності сейсмічних циклів, відповідно, 350 і 450 років, виявлених внаслідок досліджень цих сейсмогенеруючих зон. Довготермінові прогнози, ґрунтуються на теорії регіональних сейсмічних циклів, достатньо надійні, і тому великі і катастрофічні сейсмічні події в Криму в найближчі 40 років дуже ймовірні. Подібні прогнози робились для різних сейсмозон і майже завжди справджувались. Наприклад, за цією методикою на початку вісімдесятих років прогнозували сильні землетруси в зоні Вранча в період 1987–1995 рр.: в 1986 і 1990 роках в цій зоні сталися 2 події з M близько 7.0. Додамо, що згідно з таким прогнозом в 2013–2019 рр. в зоні Вранча також має статись землетрус з M понад 7.0.

Найвідомішими сучасними землетрусами в Криму були дві сейсмічні події в 1927 році з магнітудами $M=6.0$ (26 червня) і $M=6.8$ (11 вересня) в морі поблизу Ялти. Вони спричинили значні руйнування в регіоні. Враховуючи велике господарське значення регіону та існування великої сейсмічної небезпеки, в Криму в 1961–1962 рр. було створено геодинамічний полігон, що діє і сьогодні. Основним його завданням є вивчення геодинаміки регіону та процесів підготовки землетрусів шляхом виконання комплексних геофізичних досліджень глибинної будови регіону та проведення режимних спостережень різних геофізичних полів. Основою цих досліджень є сейсмічні, нахиломірні, деформа-

ційні, гравіметричні, гідрологічні, магнітометричні, електромагнітні та геодезичні спостереження.

Дослідження геодинамічних процесів деформографами і нахиломірами в Криму виконуються більш ніж 30 років у декількох пунктах [3]. Вони ускладнюються геологічними умовами, наявністю моря і великих гірських масивів та невеликою глибиною пунктів спостережень. Це зумовлює високий рівень спотворень метеорологічними та іншими факторами, і тому дані спостережень малопридатні для сеймопрогнозних задач. Як показує практика [4], для реєстрації сеймопрогнозних ефектів глибина установки приладів повинна бути не меншою 20–30 м. Сьогодні в Криму є тільки один пункт, що відповідає цій умові: це штольня Таврійського національного університету, що заходиться на мисі Херсонес (м. Севастополь), де вже багато років виконуються деформаційні і сеймонахиломірні спостереження для досліджень геодинаміки регіону і прогнозування місцевих землетрусів.

Підземні приміщення та засоби геодинамічних досліджень на пункті "Херсонес"

Штольня – лабораторія Таврійського національного університету (ТНУ) – була створена співробітниками Сімферопольського університету (нині ТНУ) більш ніж 20 років тому в підземних приміщеннях ліквідованої артилерійської батареї № 35. Знаходиться вона на мисі Херсонес (окраїна м. Севастополя). Для досліджень деформацій земної кори тут у 1987 році було встановлено стаціонарний лазерний деформограф. Схему штольні показано на рис. 1. Глибина штольні, розташованої в корінних породах, 20 м. Стіни і підлога поштукатурені бетоном. В самій штольні розміщено лазерні деформометр (1), а в лівій боковій камері (2) розміром 1,5х2,5х3,0 метрів на бетонному постаменті 1,1х2,2 м встановлені автокомпенсаційні сеймонахиломіри, розроблені в Полтавській гравіметричній обсерваторії [5].

Місцевість поблизу пункту відносно плоска. Сам пункт знаходиться майже всередині садового масиву. На відстані близько 150 м знаходиться берегова лінія моря з крутим обривом заввишки до 30 метрів. Географічні координати пункту такі: широта $44^{\circ}58'56''$, довгота $33^{\circ}40'50''$, висота над рівнем моря $H=26$ м. Спочатку вони визначались за картою, а згодом – за даними GPS. Азимут на постамент передано за допомогою магнітної бусолі за магнітним меридіаном з

поправкою на магнітне схилення. Однак, достатньої точності визначень азимутів приладів не досягнуто, оскільки у підземних приміщеннях багато залізних предметів і можлива похибка в декілька градусів. Передавати географічний

меридіан вниз у штольню важко, оскільки вхід до неї має декілька важкодоступних поворотів на різних за висотою рівнях. Для сейсмопрогно- зних досліджень цей факт не критичний.

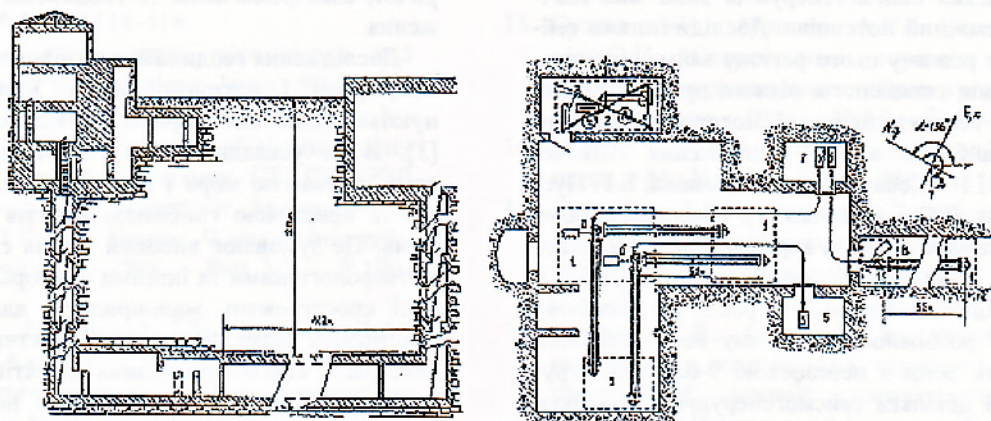


Рис. 1. Вид (в розрізі та в плані) штольні та нахиломірної камери (2) на пункті “Херсонес”.

Підземна камера для нахиломірів з метою стабілізації температурного режиму була спеціально підготовлена. Для зменшення конвекційних і температурних впливів датчики закриті теплозахисними екранами, а постамент з нахиломірами накритий поліетиленовою плівкою. Сама камера, точніше, зовнішня стінка і вхідний отвір камери теж ізольовані плівкою. Кабельні з'єднання нахиломірів прокладені від місця встановлення датчиків до пульта керування нахиломірами, який під'єднано до АЦП і комп'ютерної системи реєстрації нахиломірних даних. Останні два блоки знаходяться в наземному приміщенні – башті, що обслуговується. Тут же заходиться комп'ютерна система реєстрації деформометра.

Недоліками цього пункту є: недостатня розв'язка штольні від вхідного шлюзу, наявність залізобетонного каркаса, замала глибина, складна геометрія підземних приміщень і наявність поблизу (в 150 м.) крутого схилу на березі моря. Останні два фактори приводять до ефектів камери і топографії, що спотворюють дані спостережень. Проте за всіма ознаками станція є найкращим в Криму пунктом для виконання геодинамічних і сейсмопрогнозних досліджень. До особливостей цього пункту належить невелика відстань до південно-севастопольської сейсмогенної зони та відносно велика відстань до інших сейсмогенних зон Криму. В цьому відношенні, враховуючи наближення великої сейсмічної небезпеки в західно-кримській сейсмогенній зоні в найближчі десятиліття, цей пункт розташований досить вдало.

Як основний інструмент при дослідженнях деформаційних коливальних процесів на ст. Херсонес використовуються лазерні деформометри (2 шт., в паралель).

Вони побудовані як рівноплечі інтерферометри Майкельсона з рознесеними взаємно перпендикулярними пучками. Джерелом світла в них є стабілізовані за частотою лазери, що забезпечує досить високі метрологічні характеристики: широкий динамічний і частотний діапазон, а також рекордно малий шум 10^{-13} од./Гц^{1/2}. Головні особливості деформометрів такого типу полягають у тому, що вони реєструють різницю зміщень дзеркал, розташованих в різних плечах інтерферометра і тому малочутливі до варіацій параметрів атмосфери. Інформація реєструється на ПЕОМ в цифровому вигляді. Період оцифровки даних становить 4,018 с, розрядність АЦП – 16 біт. Вимірювальна база деформометрів – 18 м. Прилад працює майже 20 років. За цей час накопичилось багато цікавої геофізичної інформації, однак проаналізовано тільки невелику її частину.

З 2001 року на ст. Херсонес розпочато сейсмонахиломірні спостереження за допомогою високочутливих автокомпенсаційних сейсмонахиломірів, розроблених в Полтавській гравіметричній обсерваторії (ПГО) ІГФ НАНУ. Головна особливість таких приладів полягає в тому, що вони мають рівномірну частотну характеристику від нуля до 5 Гц. Тому, крім припливів, вони можуть реєструвати сейсмічні сигнали в широкому частотному і динамічному діапазонах. Крім того, вони стійкі відносно імпульсних сейсмічних ударів, що є необхідним при спостереженнях на березі моря. Нахиломірні дані реєструються на комп'ютер з роздільною здатністю 24 біти. Реєстрація кожної з двох компонент ведеться на 2 канали: 1 канал не фільтрований, а другий після аналогового НЧ фільтра з постійною зрізу 40 с. Частота оцифровки до 2006 р.

була 1 Гц, а після – 10 Гц (період 0,1 с).

Зауважимо, що автокомпенсаційні сейсмо-нахиломіри – це високостабільні горизонтальні маятники зі стабілізуючим зворотним зв'язком. Вони одночасно з сейсмічними сигналами реєструють варіації горизонтальних компонент сили тяжіння та повороти основи, на якій встановлено датчик, відносно вертикалі. Тобто, крім інформації про силові компоненти, нахиломірні дані відображають зсуву компоненту тензора деформацій. Оскільки деформометри вимірюють горизонтальні деформації, то ми маємо можливість синхронно дослідити і порівняти деформаційні компоненти одного й того ж геофізичного явища принципово різнотипними приладами.

Деякі результати деформаційних і сейсмонахиломірних спостережень

На даний час в цифровому вигляді накопичено величезний об'єм даних синхронних деформаційних і сейсмонахиломірних спостережень: земних припливів, дрейфу, сейсмічних сигналів від землетрусів, мікросейсм та ін. Ми

дослідили тільки невелику частину одержаної інформації.

Дослідження деформацій тектонічного походження можливі лише високоякісними приладами, і основним показником якості нахиломірів і деформометрів є їх здатність реєструвати земні припливи. На рис. 2 показано графіки 5-добової реалізації цифрового нахиломірного запису земних припливів без низькочастотної фільтрації і після НЧ фільтрації з постійною зрізу 40 с. Мікросейсмічні шуми, які видно на верхньому графіку, викликаються переважно шумами Чорного моря і Атлантичного океану. Вони мають сезонний характер. З рисунку видно, що якість припливних записів достатньо висока, а інструментальний дрейф незначний. На записах інколи виникають сезонні локальні спотворення, ймовірно, метеорологічного походження. Ці спотворення в деформометричних і нахиломірних спостереженнях по-різному впливають на якість припливних записів. Відношення амплітуди спотворень до амплітуди припливів менше для деформометрів. Це пояснюється значно більшою базою останніх.

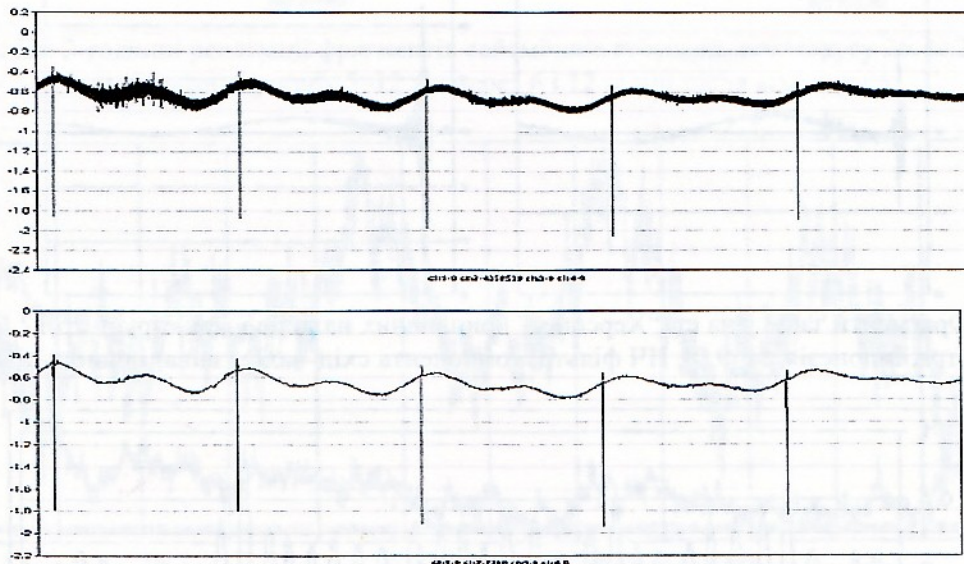


Рис. 2. Фрагмент запису припливів на п. “Херсонес” з 06.11.2006 по 11.11.2006.
(вверху канал без фільтрації, внизу з НЧ фільтром;
вертикальні лінії – добові імпульси калібрування)

Попередні визначення параметрів припливних хвиль із нахиломірних даних для ст. “Херсонес” показують, що вони мають деякі відхилення від аналогічних параметрів для припливного пункту “Севастополь”, який знаходиться в селищі Чорні Води (відстань 30 км). Причиною розходження можуть бути ефекти камери і топографії, врахування яких потребує складних обчислень. Взагалі ж, аналіз припливів на п. “Херсонес” знаходиться ще в початковому стані, враховуючи великий обсяг накопичених даних.

Реєстрація сейсмічних сигналів нахиломірами з 2001 р. до 2006 р. виконувались з частотою оцифровки 1 Гц, а з 2006 р. з частотою 10 Гц, що призвело до ускладнення попередньої обробки, але якість записів підвищилась. Наприклад, на рис. 3 показано 4-добовий запис припливів і землетрусу на Курильських островах ($M=8,3$). Зауважимо, що на всіх рисунках, де показано фрагменти записів, величини по осі у (тобто відносний масштаб) даються у вольтах.

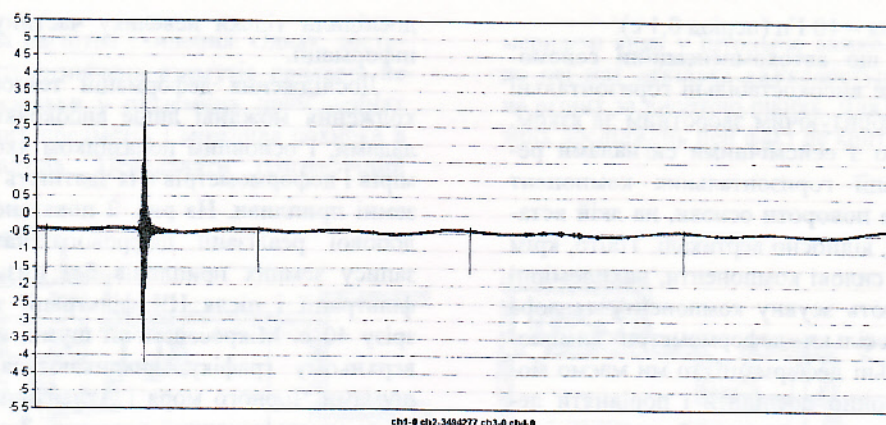


Рис. 3. Фрагмент запису землетрусу і припливів на ст. "Херсонес" з 15.11.2006 по 18.11.2006

Не всі значні сейсмічні події записані у повному обсязі. Так, не повністю зареєстровані такі унікальні події, як Індонезійські (Суматранські) землетруси. Для події, що сталася 2004.12.26 ($M=9,0$), на ст. "Херсонес" зареєстровані обидві горизонтальні компоненти, а для

землетрусу, який стався 2005.03.28 ($M=8,7$), зареєстровано тільки одну горизонтальну компоненту, бо один із каналів вийшов з ладу. На рис. 4 і 5 показано унікальні цифрові записи сейсмічних сигналів від цих землетрусів на ст. "Херсонес".

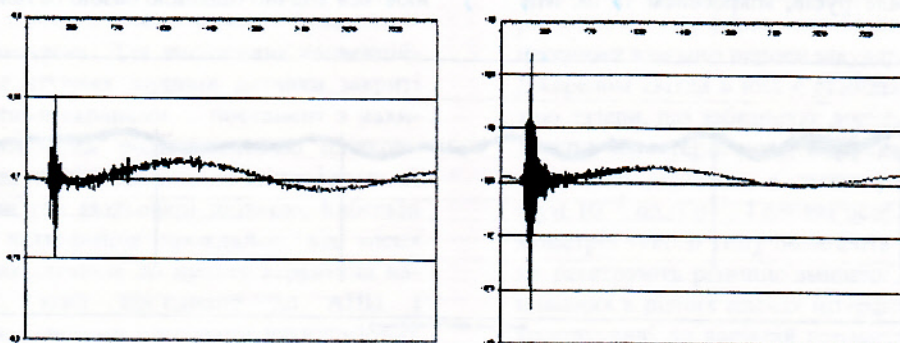


Рис. 4. Фрагменти запису на ст. "Херсонес" припливних нахилів і землетрусу 26.12. 2004 р. (Суматра, Індонезія, $M=9,0$), НЧ фільтр, компонента схід-захід (зліва) і північ-південь

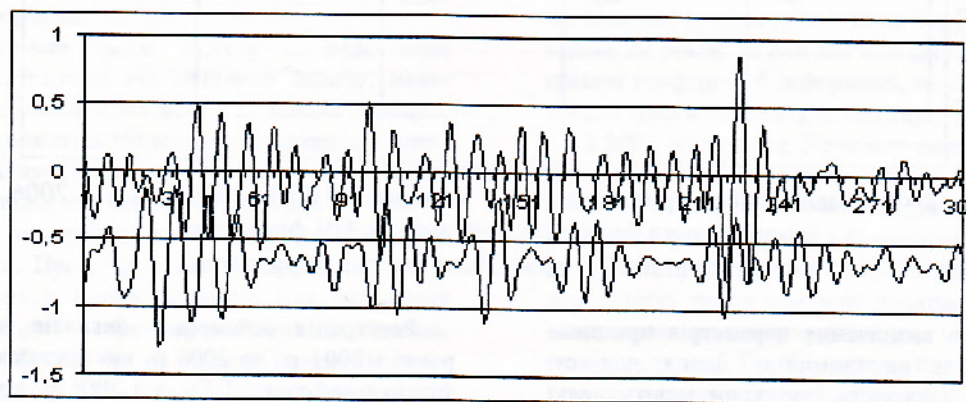


Рис. 5. Фрагмент запису землетрусу 26.12.2004 р. у максимальній фазі, 2 компоненти, НЧ фільтр

На рис. 4 показано графік 1,5-добового цифрового запису землетрусу з аналоговою НЧ фільтрацією в напрямках схід-захід і північ-південь відповідно. Фільтровані канали вибрані тому, що прямі канали виходили з діапазонів

лінійності АЦП (5В). Сейсмічні сигнали з періодами до 20 секунд НЧ фільтри послаблюють в десятки разів. На рис. 5 показано сейсмічний сигнал у максимальній фазі (1 поділка по горизонталі – 5 секунд). Як видно, в максимальній

фазі сейсмічні коливання мають період 12–15 с.

Дослідження різних фрагментів запису землетрусу, що стався 26.12.2004 р., показало наступне. Навіть через 5–6 годин після землетрусу спостерігаються сильні високочастотні вібрації Землі (періоди 5–20 с). Через 10 годин ці вібрації слабшають і з'являються гармоніки вільних коливань Землі. Землетрус був настільки сильним, що низькочастотні коливання з періодами від 28 до 10 хвилин чітко виявляються через багато годин після завершення землетрусу. Це

видно з рис. 6 і 7, де показано окремі фрагменти коливань з періодами від 5 до 12 хв. (рис. 6) та від 24 до 29 хв. (рис. 7) через 6, 12, 17 і 36 годин після землетрусу. Коливання вказаних періодів з амплітудами, що в декілька разів перевищують нормальний фон, виникають у різні інтервали часу: спочатку, через декілька годин, чітко проявляються коливання з меншими періодами, а через десяток годин чіткіше проявляються більш довгоперіодні гармоніки.

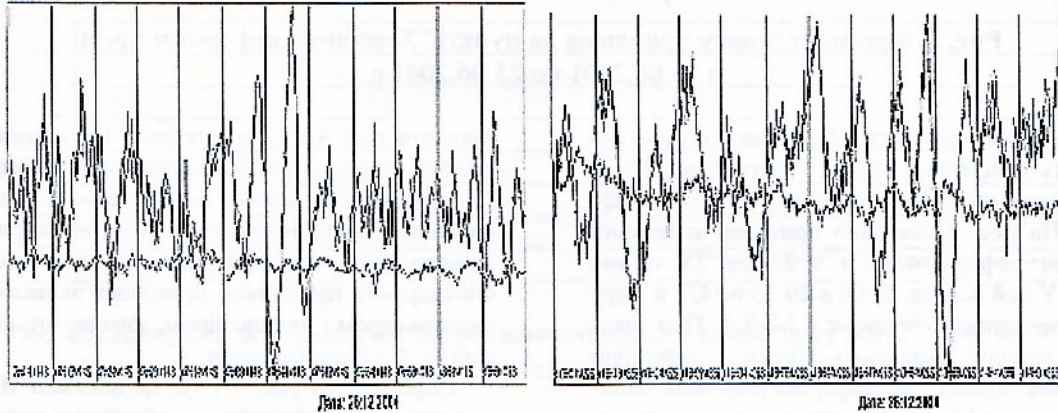


Рис. 6. Дві 3-годинні реалізації фрагментів сейсмічних коливань землетрусу 26.12.2004 р. з періодами гармонік 5–12 хв, через 6 і 12 годин після землетрусу

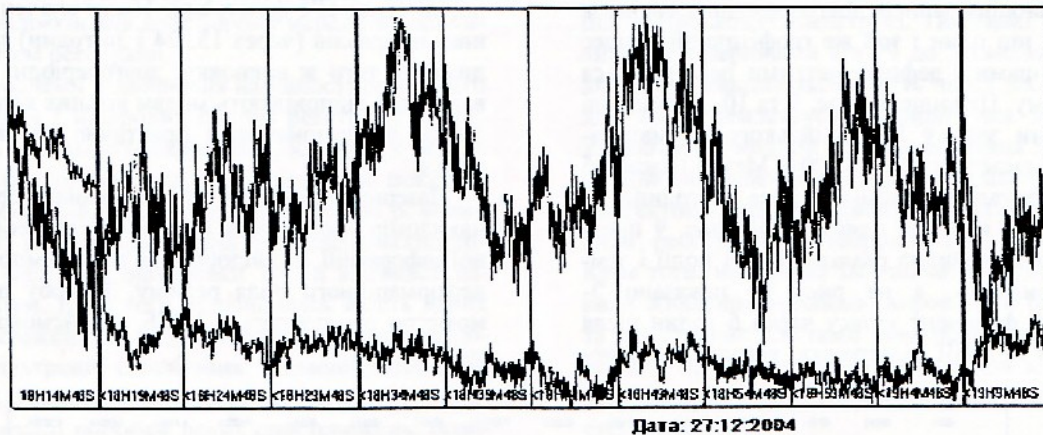


Рис. 7. Нахиломір. Фрагмент 3-годинної реалізації сейсмічних коливань землетрусу 26.12.2004 р. з гармоніками 25–29 хв

Перша мода вільних коливань Землі з періодом 59 хв чомусь проявляється слабо, і для її виділення необхідна додаткова математична обробка. На різних компонентах коливання проявляються не однаково: амплітуди коливань на меридіональній значно менші, ніж на широтній. Крім квазіперіодичних коливань, у нахилах виникають стрибкоподібні рухи, які значно перевершують існуючий фон при звичайних умовах. Відомо, що найбільший період вільних коливань Землі приблизно дорівнює 59 хв, а коливання з періодами 28 хв і менше відповідають

другій і вищим модам вільних коливань Землі. Для землетрусу, який стався в березні 2005 р., вказані ефекти проявляються значно менше, можливо тому, що енергія цього землетрусу майже в 10 разів менша, ніж грудневого. Виконано ще тільки попередній ретроспективний аналіз одержаних даних. Матеріали спостережень потребують проведення повного математичного і геофізичного аналізу, з врахуванням блокової структури кори і, особливо, оцінки вкладу хвиль цунамі, змін атмосферного тиску та ін.

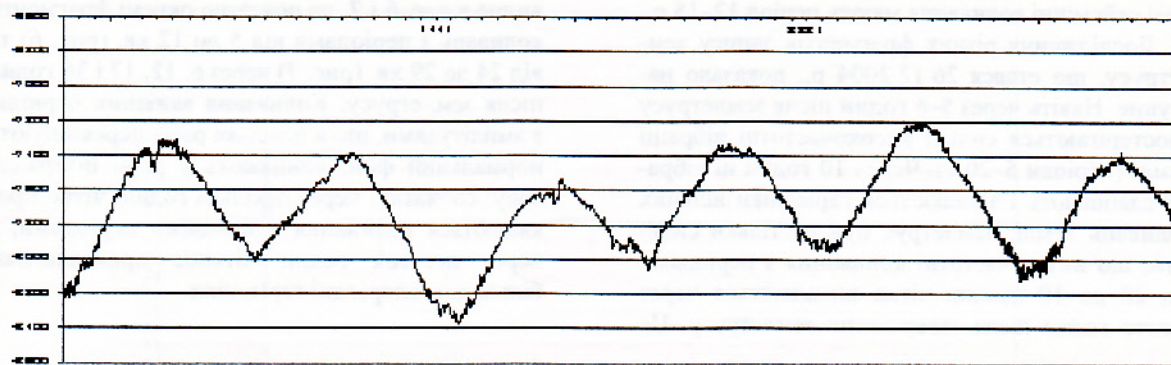


Рис. 8. Фрагмент запису припливів на пункті “Херсонес” деформетром з 23.06.2001 по 25.06.2001 р.

Деформетри на ст. “Херсонес” погано реєструють сейсмічні сигнали з періодами 10 с і менше, можливо, через невелику частоту оцифровки. На рис. 8 показано приплив, записаний лазерним деформетром з 23 по 25 червня 2001 р. У цей період, 23.06 в 20.33 по UT в Перу стався потужний землетрус з $M=8,4$. При такому землетрусі виникають потужні сейсмічні коливання. Однак, на деформографічних записах ця подія ніяк не проявилась, тоді як на нахиломірних записах події з $M>7,5$ проявляються чітко. Як видно, сейсмічні сигнали від далеких землетрусів не приймаються приладом.

Порівняння записів довгоперіодних сигналів показує, що один і той же геофізичний процес нахиломірами і деформетрами реєструється по-різному. Це видно і з рис. 9 та 10, де показані фрагменти запису Індонезійського (Суматранського) землетрусу 26.12.2004, $M=9,0$ (масштаб по горизонталі: підписана поділка – 1 година, по вертикалі – відносні одиниці). На рис. 9 представлено 15-годинна реалізація цієї події і земного припливу, а на рис. 10 показано 3-годинний фрагмент запису через 6 годин після події без та з НЧ фільтрацією відповідно. З по-

рівняння рис. 4 і 9, де показано той самий землетрус, видно, що сейсмонахиломіри записують цю подію з більшою амплітудою. Сейсмічні сигнали у нахиломірних і в деформетричних записах практично одночасно проявляються, як спотворення припливів, припливи, записані деформетром і нахиломіром, узгоджуються між собою та з теоретичними.

Порівнюючи рис. 7 і 10, де показані ті ж 3-годинні фрагменти записів сейсмічних коливань різними приладами через 6 годин після землетрусу, доходимо висновку, що моди з періодами 12 хв. у записах деформацій не проявляються ні до, ні після НЧ фільтрації. Після вивчення інших інтервалів (через 13, 24 і 36 годин) приходимо до того ж висновку: довгоперіодні коливання, що відповідають модам вільних коливань Землі, деформетрами практично не записуються.

Лазерні деформетри і цифровий сейсмонахиломір продукують великий об'єм геофізичної інформації, що відображає різні компоненти деформаційного поля регіону. За добу деформетри продукують 1,3 МБ, а сейсмонахиломір – 55 МБ.

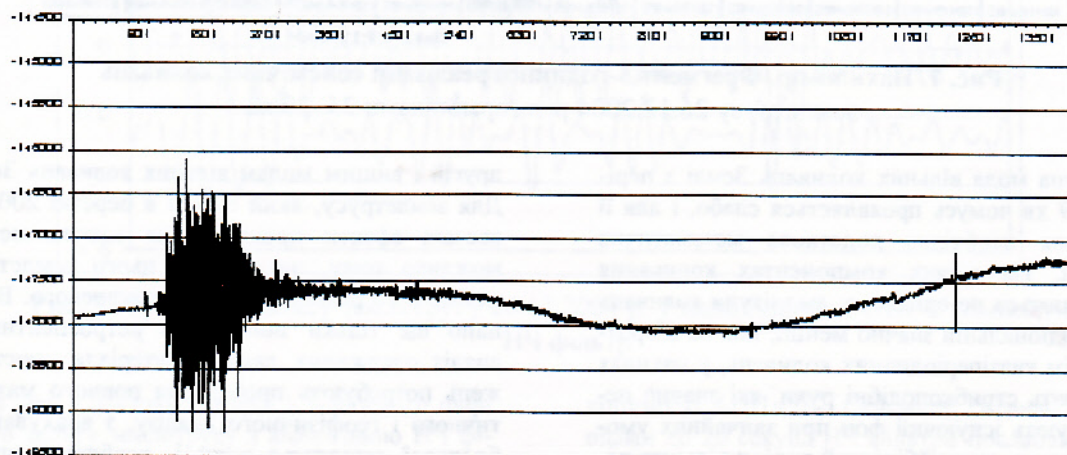


Рис. 9. Лазерний деформограф. Запис Індонезійського землетрусу 26.12.2004 р., $M=9,0$

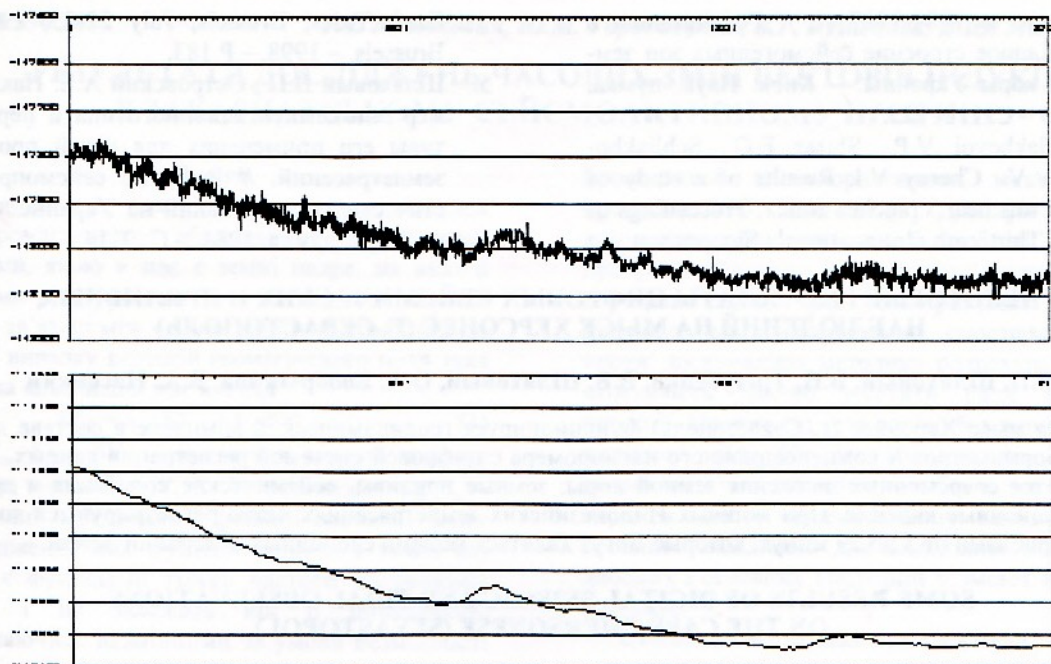


Рис. 10. Лазерний деформограф Запис Індонезійського землетрусу 26.12.2004, $M=9,0$, (6 годин після землетрусу), вверху без фільтрації, внизу з НЧ фільтрацією

На жаль, в реєстрації бувають перериви декілька разів на рік, інколи більше місяця. Загалом за рік одержується понад 10 ГБ інформації. Найчастіше зриви реєстрації бувають через аварійні відімкнення електричної мережі та поломки систем реєстрації.

Проблеми підвищення надійності резервного живлення і цифрових систем реєстрації потребують нагального вирішення, оскільки є основними факторами зривів реєстрації. Як показали випробовування, впроваджений в 2006 р. новий варіант системи реєстрації для сейсмонахиломірів з частотою оцифровки 10 Гц виявився надійнішим. Крім того, підвищилась якість даних спостережень за рахунок ефективнішої цифрової фільтрації сейсмічних і земноприпливних даних. Надзвичайно гостро стоїть проблема автоматизації обробки даних спостережень, особливо, сейсмонахиломірних в частині нового програмного забезпечення. Геодинамічний комплекс на ст. "Херсонес" потребує доповнення метеорологічними датчиками. Підвищити достовірність реєстрації і виділення ефектів тектонічного походження, зокрема ефектів – провісників землетрусів, можливо тільки за наявності метеорологічних даних.

Висновки

У районі м. Севастополя (мис Херсонес) функціонує режимний геодинамічний пункт, де виконуються одночасні деформометричні, сейсмічні і нахиломірні спостереження. В цифровому вигляді продукується великий об'єм геофізичної інформації, яка характеризує деформа-

ційний режим регіону, де в найближчі десятиліття може бути сильний землетрус.

Одержано унікальні записи наддовгоперіодних сейсмічних коливань при надпотужному Індонезійському землетрусі. Показано, що коливання з періодами від 29 до 5 хвилин проявляються і виділяються навіть через десятки годин після землетрусу. Періоди цих коливань збігаються з модами вільних коливань Землі.

Для підвищення надійності виділення ефектів тектонічного походження необхідно налагодити реєстрацію метеорологічних параметрів. Крім того, необхідно забезпечити надійне резервне живлення приладів, впровадити надійніші та ефективніші системи реєстрації, розробити і освоїти програмне забезпечення для автоматизації попередньої обробки і аналізу даних спостережень.

Література

1. Чекунов А.В., Сологуб В.Б., Харитонов О.М. и др. Состояние и перспективы исследований по прогнозу землетрясений на Украине // Развитие сейсмопрогностических исследований на Украине. – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 3–12.
2. Никонов А.А. Сейсмический потенциал Крымского региона: сравнение региональных карт и параметров выявленных событий // Изв-я РАН. Физика Земли. – 2000. – № 7. – С. 53–62.
3. Голубицкий В.Г., Кривонос А.Л., Пасынков Г.Д. Результаты наклономерных наблюдений на Крымском геодинамическом по-

- лигоне за 1984-1987 гг. // Геодинамика и глубинное строение сейсмогенных зон земной коры Украины. – Киев: Наук. думка, 1993 – С. 118–122.
4. Schliakhovoi V.P., Slusar E.G., Schliakhovoi V.V., Cherny V.I. Results of a study of tidal tilts near Vranchea zone // Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Earth Tides, Brussels, July 22-25, 1997. – Brussels. – 1998. – P.183.
 5. Шляховый В.П., Островский А.Е. Наклономер автокомпенсационного типа и перспективы его применения для целей прогноза землетрясений. // Развитие сейсмопрогностических исследований на Украине. – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 9–14.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ПРИЛИВНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА МЫСЕ ХЕРСОНЕС (Г. СЕВАСТОПОЛЬ)

В.П. Шляховый, В.И. Трегубенко, В.В. Шляховый, О.А. Боборыкина, В.А. Насонкин

На мысе Херсонес (г. Севастополь) функционирует геодинамический комплекс в составе лазерных деформометров и компенсационного накломера с цифровой системой регистрации данных. Регистрируются современные движения земной коры: земные приливы, сейсмические колебания и другие деформационные явления. При мощных Индонезийских землетрясениях четко регистрируются колебания с периодами от 5 до 29 минут, которые могут являться модами свободных колебаний Земли.

SOME RESULTS OF DIGITAL SEISMIC AND TIDAL OBSERVATIONS ON THE CAPE CHERSONESE (SEVASTOPOL)

V.P. Shljahovyj, V.I. Tregubenko, V.V. Shljahovyj, O.A. Boborykina, V.A. Nasonkin

On the cape Chersonese (Sevastopol) functions a geodynamic complex. It is consist from laser strainmeters and compensatory tiltmeter with digital systems of data registration. Modern movements of earth crust are registered: earth tides, seismic signals and other deformation phenomena in earth crust. At strongest Indonesian earthquakes the oscillations with the periods from 5 till 29 minutes are accurately registered. They can be modes of Earth free oscillations.

¹Полтавська гравіметрична обсерваторія ІГФ НАНУ, м. Полтава,

²Український Державний геолого-розвідувальний Інститут, м. Київ,

³Таврійський національний Університет, м. Сімферополь

Надійшла 7.12.2007