

ЦИФРОВИЙ СЕЙСМОГРАФ ДЛЯ РЕГІОНАЛЬНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЙОГО ВИПРОБУВАНЬ

О. Кендзера , Т. Вербицький , С. Вербицький , Ю. Вербицький
(Інститут геофізики ім.С.І.Субботіна НАН України)

Розв'язання ряду фундаментальних та прикладних сейсмологічних задач вимагає використання цифрових сейсмічних станцій. Однак, на Україні випуск такої апаратури не налагоджений, а придбати сучасну закордонну сейсмічну апаратуру поки нема можливості. Оскільки це гальмує впровадження в сейсмічні дослідження нових

сучасних методів і технологій, то виникла необхідність розробки власної цифрової сейсмометричної апаратури. На протязі кількох років її розробка велась в Інституті геофізики НАН України. Вдалось виготовити кілька комплектів цифрової апаратури (ЦАС-001 і ЦАС-002), яка пройшла випробування на ряді регіональних

сейсмічних станцій Карпатської мережі. В даний час за допомогою цифрової апаратури ведуться спостереження на регіональних сейсмічних станціях "Чернівці", "Косів" і "Тросник" та на тимчасових пунктах "Хрещатик" і "Хотин".

ОПИС ЦИФРОВОГО АВТОМАТИЧНОГО СЕЙСМОГРАФА (ЦАС)

ЦАС - це мікропроцесорний пристрій, який при наявності датчиків, здатних перетворювати вимірювану величину в напругу електричного струму, може реєструвати будь які швидко осцилюючі фізичні процеси з максимальною дискретністю 256 Гц. Система закладених в ЦАС сервісних програм призначена для запису сейсмічних коливань в режимі безперервної реєстрації, або реєстрації в режимі очікування. Прилад дозволяє записувати всю інформацію необхідну для отримання істинних значень прискорення, швидкості та зміщення в реєстрованих коливаннях.

ЦАС-002 розрахований на підключення трьох датчиків сейсмічних рухів. Звичайно - двох горизонтальних та вертикального. З датчика аналоговий сигнал поступає на попередній підсилювач, фільтр низьких частот і далі на аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Перетворювач має 17 розрядів. Рівень власних шумів не перевищує 2-х одиниць молодшого розряду АЦП, що забезпечує динамічний діапазон не нижче 100 дБ. Передбачена змінна частота дискретизації сигналу: 8 - 256 Гц. При частоті дискретизації 128 Гц надійно забезпечується діапазон робочих частот 0.01-30 Гц. Наявність АЦП в кожному із реєструючих каналів забезпечує синхронність відліків, що дозволяє в подальшому для обробки записів ефективно використовувати методи поляризаційного аналізу. Цифрова сейсмічна інформація з усіх каналів поступає на інтелектуальний контролер, який виділяє корисний сигнал та передає його на міні ЕОМ для збереження на гнучких дисках (ГМД) в IBM-сумісному форматі. Станція обладнана двома ГМД-накопичувачами ємністю по 800 Кб.

Часова прив'язка зареєстрованих подій забезпечується вбудованим термостабілізованим кварцовим годинником, хід якого коректується радіосигналами точного часу. Величина поправок фіксується в протоколі роботи ЦАС поряд із

статистичними параметрами сейсмічного фону та іншою службовою інформацією.

Інтерфейс оператора дозволяє в діалоговому режимі програмувати годинник, задавати частоту дискретизації та параметри цифрових фільтрів для системи розпізнавання корисного сигналу, здійснювати оперативний контроль дискової пам'яті та інше.

При відносній простоті апаратної реалізації ЦАС має досить високі можливості завдяки застосуванню сучасної елементної бази та заміні ряду функціональних елементів, які раніше реалізовувались апаратно (фільтрація, інтегрування і т.п.), на їх програмні аналоги.

Керує роботою ЦАС пакет програм, розміщених в постійній пам'яті. Обробка потоку сейсмічної інформації відбувається в реальному часі.

Для забезпечення сумісності ЦАС з різними типами сейсмоприймачів та можливості експлуатації в різних природних умовах застосовуються гнучкі алгоритми виділення корисного сейсмічного сигналу, які дозволяють з високою імовірністю розпізнавати сейсмічні події при низьких співвідношеннях рівнів корисного сигналу і мікросейсм.

Перші комплекти ЦАС пройшли випробування на сейсмічних станціях "Чернівці" та "Хрещатик" ще в 1992 році. Було враховано ряд недоліків у їх роботі. Вдосконалено блоки гарантованого живлення, знижено енергоспоживання, покращено програмне забезпечення. В 1993-1994 роках покращені модифікації ЦАС-001 були встановлені на регіональних станціях "Косів" та "Хотин", а ЦАС-002 на станції "Тросник". В результаті проведених спостережень отримано записи ряду місцевих сейсмічних подій та землетрусів зони Вранча.

На рис.1 приведено фрагмент початкової частини трьохкомпонентного запису підкорового землетрусу зони Вранча 23.10.1992 року з параметрами: $T_0 = 9\text{h } 21\text{m } 12.3\text{s}$; $\varphi = 45.8^\circ\text{N}$, $\lambda = 26.69^\circ\text{E}$; $H = 120$, $M_{\text{lh}} = 5.1$ який був зареєстрований на сейсмічній станції "Чернівці". Кількість відліків в кожній з компонент представленої цугу коливань складає 4096. Крок між відліками - 0.0078125 с. Всього в кожній з по 26412 відліків. Ми обмежились для ілюстрації частиною цугу поздовжніх хвиль, лише у зв'язку з тим, що в форматі друкованих сторінок графік

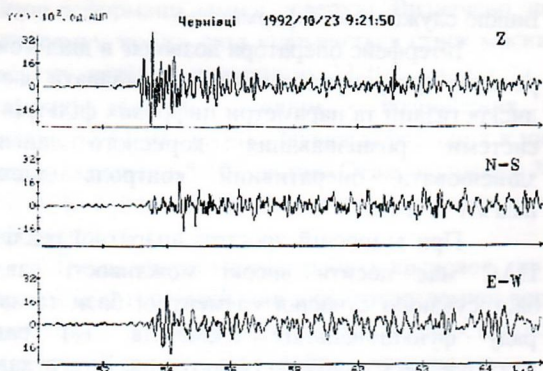


Рис. 1. Фрагмент початкової частини запису на сейсмічній станції "Чернівці" підкорового землетрусу зони Вранча 23.10.1992 року.

всього запису мав би погану роздільну здатність.

Для графічної візуалізації, копіювання на тверді носії та обробки цифрових записів на ПЕОМ використовуються спеціально розроблені програми. Вони дозволяють проглядати записи з потрібною роздільною здатністю та з точністю до інтервалу між відліками визначати кінематичні характеристики коливань.

ВІДНОВЛЕННЯ ВИГЛЯДУ КОЛИВАНЬ ґРУНТУ З ЗАПИСУ

Зареєстровані сигнали, як видно з рис. 1, мають розмірність одиниць АЦП. Цифрова форма запису дозволяє легко перейти до істинного вигляду коливання ґрунту під станцією. Для цього необхідно мати частотні характеристики реєструючих каналів. З метою їх визначення розроблена спеціальна методика калібрування, яка полягає в синхронному записі калібруючого імпульсу та відгуку реєструючого тракту. Частотна характеристика визначається по співвідношенню їх спектрів з врахуванням параметрів датчика [1] та розраховується по формулі:

$$V(i\omega) = \frac{1}{65536} \frac{U_r(i\omega)}{U_s(i\omega)} \frac{R_1}{R_0 + R_1} \frac{K_s R_{sc} \omega^2}{S_{sc} I_0^2}$$

де: $U_r(i\omega)$, $U_s(i\omega)$ - спектри калібрувального імпульсу та відгуку;

R_0 , R_1 - масштабуючі опори;

R_{sc} - опір калібрувальної котушки [Ом];

S_{sc} - чутливість сейсмометра для калібрувальної котушки [В·с / м];

$K_s I_0$ - момент інерції [кг·м²] та приведена довжина маятника [м].

Звідки, амплітудна частотна характеристика визначається як

$$W(\omega) = |V(i\omega)|, \text{ [в один. АЦП/мкм]};$$

а фазова частотна характеристика

$$Fi(\omega) = \text{Arg}\{V(i\omega)\}, \text{ [в рад]}.$$

Принципова схема системи калібрування одного з реєструючих каналів представлена на рис.2. На графіках, представлених на рис.3, зображені одержані таким чином амплітудні частотні характеристики для вертикального та горизонтальних каналів сейсмографа, встановленого на сейсмічній станції "Чернівці". Цими каналами були зареєстровані коливання зображені на рис.1. Датчиками коливань служили сейсмометри СМ-3КВ.

Для встановлення рівня стабільності одержання емпіричних частотних характеристик реєструючих каналів проводились багаторазові їх перевизначення на протязі тривалого часу. Частотні характеристики визначались в різні години дня, щоб забезпечити зміну температурних умов та рівнів зовнішніх перешкод. В результаті було показано, що запропонований спосіб одержання емпіричних амплітудних та фазових частотних характеристик каналів є достатньо стабільним і дозволяє при умові, що співвідношення між мікросейсмічним фоном і калібрувальним сигналом не перевищує 1 %, одержувати ці характеристики з точністю до 2 % по усьому сейсмологічному та інженерно-сейсмологічному частотному діапазонах.

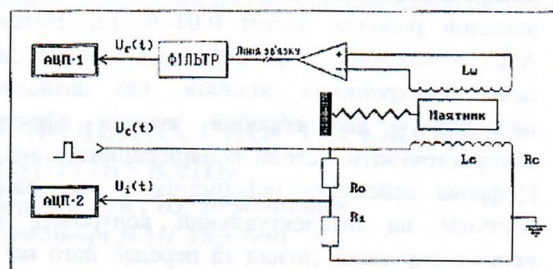


Рис. 2. Схема системи калібрування реєструючих каналів сейсмографа.

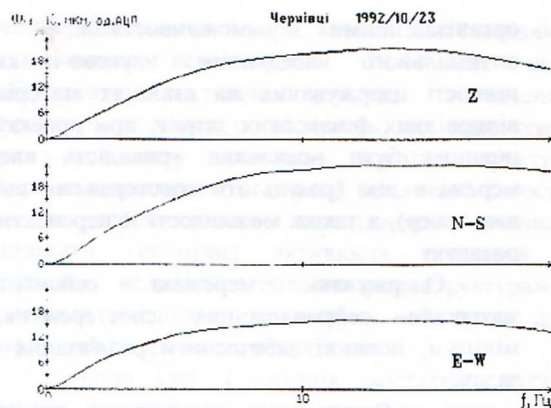


Рис. 3. Амплітудні частотні характеристики каналів сейсмографа, встановленого на сейсмічній станції "Чернівці", яким були зареєстровані коливання, зображені на рис. 1.

Відновлення справжнього вигляду коливань ґрунту $x(t)$ ґрунтується на використанні регуляризованого (по А.Н.Тихонову [2,3]) розв'язку рівняння, яке описує зв'язок між коливаннями на "вході" та "виході" реєструючого сейсмічного каналу:

$$x(t) = \operatorname{Re} \left\{ \mathbf{F}^{-1} \left\{ \frac{G(i\omega) \cdot Y(i\omega)}{V(i\omega)} \right\} \right\};$$

де, $Y(i\omega)$ - спектр запису; $G(i\omega)$ - регуляризуюча функція; $V(i\omega) = W(i\omega)/k$. В залежності від того, в термінах якої фізичної величини будуть описуватись вхідні коливання: зміщень - $x = u(t)$, швидкостей - $x = v(t)$, чи прискорень - $x = a(t)$, - коефіцієнт k буде приймати значення: 1, $i\omega$, $-\omega^2$.

Перевірка правильності відтворення параметрів сейсмічних коливань проводилась за допомогою їх моделювання на спеціальній платформі Відділу сейсмології ІГФ НАН України в Криму. Використовувались два підходи. При першому - на платформі моделювались гармонічні коливання з заданими частотами в діапазоні від 0.1 до 25 Гц. При другому - рух платформи задавався у вигляді квазі дельта-імпульсу, шляхом механічного удару. Теоретично, другий підхід повинен краще відповідати реальній ситуації, що спостерігається при землетрусах. Однак, досвід роботи з платформою показав, що такий підхід вимагає спеціальної доробки платформи, з метою позбутися додаткових неконтрольованих вібрацій, які записуються сейсмографом, але не можуть бути зареєстровані датчиком переміщень платформи. В результаті проведеної перевірки було показано, що частотні

характеристики реєструючих каналів, одержувані за допомогою описаного вище методу імпульсного калібрування, в межах помилок моделювання збігаються з частотними характеристиками, отриманими за допомогою обох підходів калібрування на платформі.

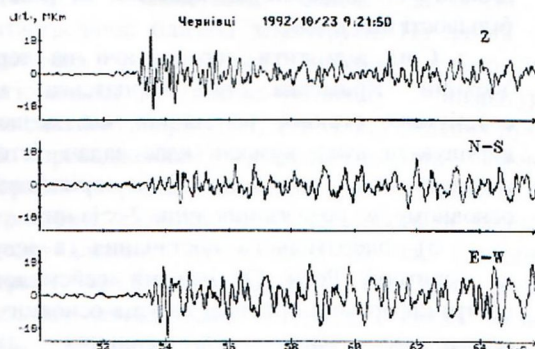


Рис. 4. Зміщення в коливаннях ґрунту під сейсмічною станцією "Чернівці" при землетрусі 23.10.1992 року. Фрагмент - поздовжні хвилі.

З допомогою представлених на рис.3 амплітудних частотних характеристик сейсмічних каналів було відтворено вигляд коливань ґрунту під сейсмічною станцією "Чернівці" при землетрусі 23.10.1992 року. Результати обчислень для коливань в цузї поздовжніх хвиль (в термінах зміщень) приведені на рис.4. Аналогічно можна отримати вигляд спостережуваних коливань в термінах швидкості та прискорення.

ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЦАС

Записи землетрусів зони Вранча, зареєстровані за допомогою цифрової апаратури в Карпатському регіоні, є унікальними. До них сейсмологи не мали записів придатних для вивчення кореляційних залежностей, які описують зв'язки між динамічними параметрами джерел підкорових румунських землетрусів та динамічними характеристиками сейсмічних коливань спостережуваних на території України. Відомо, що такі знання необхідні для прогнозування можливих впливів зі сторони катастрофічних землетрусів зони Вранча. На даний час, одержані з допомогою описаної вище цифрової апаратури записи знайшли практичне застосування при оцінці сейсмічної небезпеки ряду важливих об'єктів, в тому числі і атомних станцій, на території України.

Досвід роботи показав, що цифрові станції реєструють значну кількість близьких і віддалених сейсмічних подій. Однак їх не завжди вдається ідентифікувати через малу кількість цифрових станцій в Карпатській сейсмічній мережі. Аналогові сейсмостанції, маючи низький динамічний діапазон, як правило, не реєструють більшості цих подій.

Слід відмітити, що існуючі на території України Кримська та Карпатська мережі сейсмічних станцій на даний час дозволяють вирішувати дуже вузький клас задач. Історично склалося так, що вони були орієнтовані, в основному, на розв'язання лише 2-х із них:

а) оперативного постачання (в існуючий на території Росії Обнінський сейсмологічний центр) інформації про часи вступів основних типів сейсмічних хвиль від сильних далеких землетрусів, яка в сукупності з даними інших базових станцій ЄССС СНД дозволяє визначати параметри сильних сейсмічних подій по всій земній кулі.

б) визначення положення та величини місцевих (регіональних) землетрусів в Криму і в Карпатському регіоні, починаючи з 6-7-го енергетичного класу.

с) Конфігурація і технічне оснащення існуючих станцій не дозволяють визначати навіть глибину місцевих землетрусів в Закарпатті, не кажучи вже про одержання матеріалів для оцінки сейсмічної небезпеки промислових об'єктів в термінах прискорень, детального вивчення місцевих вогнищ землетрусів, вивчення глибинної будови Землі, її напруженого стану в регіонах та інших важливих задач, поставлених на порядок дня сучасним розвитком науки і економіки країни. Головне, що при сучасному стані мережі сейсмічних спостережень неможливо забезпечити надійне і оперативне визначення координат і динамічних параметрів землетрусів із інших вогнищевих зон, крім Криму і Закарпаття, включаючи навіть найактивнішу із них - зону Вранча.

При проектуванні нової, сучасної мережі сейсмічних станцій на території України доцільно виходити із завдань, які вона повинна вирішувати, але при цьому максимально врахувати географію та сеймотектонічні особливості небезпечних для її території сейсмоактивних зон, а також обмеження, викликані рівнем доступної реєструючої і передавальної техніки, фінансовими і

організаційними можливостями. Крім оптимального поєднання науково-практичної цінності одержуваних на станціях матеріалів і відповідних фінансових затрат, при проектуванні повинна бути врахована тривалість введення мережі в дію (результати спостережень потрібні вже тепер), а також можливості її перспективного розвитку.

Одержувані мережею сейсмостанцій матеріали сейсмологічних спостережень, як мінімум, повинні забезпечити розв'язання таких задач:

- Визначення координат і динамічних параметрів вогнищ землетрусів;
- Вивчення параметрів сейсмічності, сейсмічного режиму і їх просторово-часових варіацій;
- Вивчення кінематичних і динамічних параметрів сейсмічних коливань та їх розподілу в часі і просторі;
- Вивчення регіональних кореляційних зв'язків між параметрами вогнищ землетрусів, сейсмічною струшуваністю і динамічними параметрами спостережуваних коливань;
- Вивчення глибинної будови земної кори і верхньої мантії сейсмологічними методами;
- Вивчення характеристик сейсмоактивних зон і сейсмічних провісників місцевих землетрусів з метою розробки способів їх середньо- і короткострокового прогнозу;

Одним з головних напрямків розвитку сучасної сейсмології являється вивчення і прогнозування сейсмічної небезпеки для антисейсмічного проектування. Ця задача традиційно розв'язується в рамках робіт по сейсмічному районуванню різних рівнів. До них відносяться: загальне сейсмічне районування (ЗСР), детальне сейсмічне районування (ДСР) та сейсмічне мікрорайонування (СМР). Проектована мережа повинна максимально забезпечити матеріалами спостережень такі дослідження.

Очевидно, що для розв'язання більшості з зазначених вище наукових і прикладних задач необхідною є цифрова реєстрація сейсмічних сигналів трьохкомпонентними сейсмічними станціями, здатними отримувати повну інформацію про вектор руху частинок ґрунту при землетрусах. Такі станції мусять бути досить дешевими, так щоб створювані мережі були достатньо густими. Наприклад, в умовах Закарпаття і Передкарпаття, враховуючи значну

неоднорідність земної кори, віддаль між станціями не повинна перевищувати 30-40 км, щоб забезпечити достатню точність визначення параметрів слабких потріскувань, які характеризують сейсмічну активність окремих структур. Частіше встановлювати станції нема необхідності, так як першочерговому дослідженню повинна підлягати сейсмічна активність пов'язана з достатньо великими геологічними структурами, здатними генерувати землетруси небезпечні для населення та промислових об'єктів.

Окрім ідеї створення достатньо густої мережі дешевих, не дуже чутливих сейсмічних станцій, існує також ідея створення на території України системи декількох високочутливих сейсмічних станцій, здатних реєструвати землетруси починаючи з 5-6-го енергетичного класу практично по всій її території. Критично проаналізуємо ці підходи.

На перший погляд перспектива побудови та експлуатації меншої кількості сейсмостанцій здається привабливішою з економічних міркувань. Однак, дешевизна такої мережі може виявитись проблематичною, тоді як ефективність буде суттєво меншою ніж в густій мережі. Кожна з високочутливих станцій буде досить дорогою при створенні та експлуатації, через свою складність та унікальність. Оплата за значні земельні відводи, які повинні забезпечити низький рівень перешкод, вартість штолень, спеціальних свердловин, високочутливої малосерійної свердловинної апаратури та засобів по їх надійному функціонуванню в сумі може перевищити вартість набагато більшої кількості простіших у виготовленні і експлуатації менш чутливих станцій. Серійність виготовлення останніх суттєво зменшить кошти, потрібні на формування мережі, і може стати передумовою їх конкурентноздатності на зовнішньому ринку сейсмологічної апаратури. В той же час, наявність значної кількості станцій не лише збільшить надійність функціонування мережі, а головне - підвищить точність визначення параметрів вогнищ місцевих землетрусів. Справді, при розв'язанні оберненої задачі - визначення положення джерела сейсмічних хвиль по часу їх вступів, при невеликій кількості розміщених далеко одна від одної станцій, через неможливість врахування реально існуючої неоднорідності в будові літосфери Землі, буде дуже малою точність вирахування координат і, особливо, глибини епіцентрів. Це поставить під сумнів можливість

вирішення цілого класу важливих сейсмологічних задач.

Ще одним аргументом за створення густої мережі станцій служить те, що в даний час, не тільки у нас, а і за кордоном, не існує апаратури, яка б мала достатній динамічний діапазон, щоб одночасно записувати слабкі віддалені і катастрофічні близькі землетруси. На даний час проблема розв'язується шляхом дублювання регіональної (високо-чутливої) апаратури, спеціальною апаратурою для запису сильних рухів, або впровадженням заглублених каналів. В умовах України, перший тип апаратури, як правило, не спрацьовує (дотепер не вдалось зробити жодного запису сильних рухів, хоча за час існування мережі сейсмічних станцій відбулось багато сильних землетрусів), а друга - через низьку роздільну здатність взагалі не здатна передавати найбільш цінну інформацію про високо-частотне випромінювання, яке є основною причиною руйнувань в близькій до епіцентру області. При достатньо густій мережі потреба в великих збільшеннях відпаде і для оснащення сейсмічних станцій буде можна використати уже тепер існуючу апаратуру.

Необхідність детального вивчення сейсмічності території України інструментальними методами пов'язана також з тим, що, як відомо, одна і та ж сейсмічна бальність спричинена землетрусами з різних вогнищевих зон може характеризуватись різною їх тривалістю, піковими значеннями і швидкістю наростання амплітуд, формою спектрів коливань, положенням їх максимумів та ін. Що стосується маловивченої в сейсмічному відношенні частини території України, розміщеної на древній платформі, де величина звільненого при землетрусах напруження, в середньому буде в 2-3 рази вищою, ніж при землетрусах такої ж магнітуди в зонах підвищеної сейсмічної активності. і, одночасно, відносно слабшим є загасання коливань з віддаллю, то небезпечними для населення і промислових споруд тут можуть виявитись слабкі неглибокі землетруси з $M < 4$. Світовий сейсмологічний досвід показує, що часто при таких землетрусах спостерігаються високі пікові прискорення при відносно низькій бальності струшувань, що пояснюється короткою тривалістю інтенсивної фази коливань.

Найбільшою перевагою мережі з багатьох станцій являється те, що вона, розширивши якісно

область одержуваних сейсмічних даних за рахунок інформації про поведінку ґрунтів на різних ділянках території країни при сильних далеких та слабких місцевих землетрусах, дозволить зекономити кошти, які тепер неефективно витрачаються на короточасні (і через це малопродуктивні) додаткові сейсмологічні спостереження, які проводяться при спорудженні житла, а також важливих та екологічно небезпечних об'єктів в сейсмічних районах.

Описана вище цифрова сейсмологічна апаратура може стати базовою для організації регіональних спостережень в проєктованій сейсмічній мережі України.

Література

1. Импульсная калибровка сейсмических каналов /Отв.ред. З.И.Аронович, А.Я.Меламуд - М.: Изд.ИФЗ АН СССР, 1976. - С.236.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1979. - 285 с.
3. Кендзера А.В. Способ получения расчетных акселерограмм путем пересчета из сейсмических записей. - Геофиз. журнал, т.9, N:5, 1987. - С. 75-79.

A.Kendzera, T.Verbyckyj, S.Verbyckyj, Yu.Verbyckyj DIGITAL SEISMOGRAPH FOR REGIONAL OBSERVING AND THE RESULTS OF ITS TESTING

Summary

During the last few years digital seismic apparatus development was provided in the Institute of Geophysics. Some sets of digital seismic apparatus were made and tested at the regional seismic stations of the Carpathian network. The created equipment DAS is reliable and has sufficiently high operational properties due to use of modern chips and replacement of some analog chains (filtering, integrating, etc.) on their program analogues. The flexible algorithms of useful seismic signal detecting was applied. The digital form of records makes it possible to pass easily to true motion of ground under station, in case if the channel's frequency responses are known. Recorded by DAS seismograms of Vrancha earthquakes are unique for Ukrainian. Until them there was not such earthquakes records at the territory of Ukraine, which was suitable for studying of dynamic characteristics of seismic vibrations.

О. Кендзера, Т. Вербицкий, С. Вербицкий, Ю. Вербицкий ЦИФРОВОЙ СЕЙСМОГРАФ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ИСПЫТАНИЙ

Резюме

На протяжении нескольких лет в Институте геофизики Национальной Академии наук Украины разрабатывалась цифровая сейсмическая аппаратура. Было изготовлено несколько цифровых сейсмографов, которые прошли испытания на региональных сейсмических станциях Карпатской сети. Создана аппаратура оказалась надежной и имеет достаточно высокие эксплуатационные характеристики, благодаря использованию современной элементной базы и замене ряда аналоговых цепей (фильтрация, интегрирование и т.д.) на их программные аналоги. Для выделения полезного сигнала применяется гибкий алгоритм. Цифровая форма записи позволяет легко переходить от записи к истинному виду колебаний грунта при наличии частотной характеристики канала регистрации. Полученные с помощью цифрового сейсмографа записи землетрясений Вранча являются уникальными. До них не было записей, которые можно было бы использовать для изучения динамических характеристик колебаний из этой зоны на территории Украины.