

ПРОБЛЕМИ ВИМІРЮВАНЬ У НАРОДНОМУ ГОСПОДАРСТВІ

УДК 621.398

ПРО ВИКОРИСТАННЯ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ РЕЛЕЯ В ОХОРОННИХ СИСТЕМАХ

© Рак Володимир, 2015

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
м. Львів, вул. С. Бандери, 12.

Запропоновано використання сейсмічних хвиль Релея у охоронних системах сигналізації, які, крім ідентифікації порушення охоронного режиму, дадуть змогу визначати координати цього порушення. Проведено оцінку зони чутливості таких систем та визначено напрями подальших експериментальних досліджень з метою встановлення доцільності їх практичної реалізації.

Ключові слова: сейсмозвідка, сейсмічні хвилі, хвилі Релея, сейсмоприймач.

Предложено использование сейсмических волн Рэлея в охранных системах сигнализации, которые, помимо идентификации нарушения охранного режима, смогут определять координаты этого нарушения.

Проведена оценка зоны чувствительности таких систем и определены направления дальнейших экспериментальных исследований с целью установления целесообразности их практической реализации.

Ключевые слова: сейсмозведка, сейсмические волны, волны Рэлея, сейсмоприемники

There are four types of seismic waves: primary waves, secondary waves, Rayleigh waves and Love waves. The first two types are called depth waves, because these waves penetrate into the depths of the earth. Rayleigh waves and Love waves called surface waves. They can propagate on the surface. Given the characteristics of propagation of these waves can be concluded that even at low energies excitation source, Rayleigh waves can propagate at a much greater distance than depth waves, so it would be advisable to use them in security systems.

Knowing the velocity of the waves, which is measured the sensors, the ratio of amplitudes and time delays with which they come, we can determine the coordinates of the source of vibration.

The output voltage of existing sensors (seismometers) is a function of frequency seismic waves and their amplitudes. This may be the cause of the error. Autor is suggested another principle of the sensor, output signal of which is a function only of the amplitude. Is posted conversion function of sensors and dependence on the sensitivity threshold.

If we know threshold of the sensitivity of the sensors, with certain assumptions, we can estimated distance from which capacitive seismometer feels seismic waves excited Walking man at different values of the coefficient of energy absorption of seismic waves geological environment.

For seismic exploration seismic surface waves are interference. Most likely, this may explain the lack of information about the amount of energy that falls on the formation of surface waves and the dependence of this quantity on the power source.

Zone of sensitivity may be limited to so-called microseisms arising from soil vibrations caused by fluctuations of the trees, transport, and industry. To limit the impact of microseisms be appropriate to apply filters.

Therefore, before decision about the possibility of practical implementation of such systems, data relating to the area of sensitivity of seismometers need additional experimental verification in the field where necessary to experimentally explore: how much energy of the source belongs Rayleigh waves and Love waves; energy distribution between surface waves; by the ratio of amplitudes determine the absorption coefficient of surface waves for areas where the security system will be used.

Key words: seismic, seismic waves, Rayleigh waves, seismometers.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з практичними завданнями. В 2014 р. в Україні різко зросла загроза тероризму. Ця загроза стосується як великих підприємств, так і тих, що займаються забезпеченням життєдіяльності людей (ТЕЦ, електростанції, зокрема атомні, газові трубопроводи та розподільні пункти тощо). Крім того, на сході почалися військові дії. На певних ділянках Україна почала впорядковувати свій кордон так, щоб ускладнити його перехід як окремим особам, так і цілим групам порушників.

Тому актуальним є створення таких систем охоронної сигналізації, які можуть працювати цілодобово, в автоматичному режимі, передаючи інформацію про координати порушника до єдиного центру. Для того, щоб привернути увагу, порушення охоронного режиму повинно супроводжуватись акустичним сигналом та світловою індикацією.

Аналіз останніх досліджень, виділення не вирішених раніше частин проблеми. Прилади нічного бачення мають вузький сектор огляду і потребують неодмінної присутності людини для неперервного спостереження, тому вночі пильнувати за вказаними об'єктами доволі складно.

Сейсмічні хвилі переміщуються в глибині Землі та по її поверхні, передаючи при цьому енергію. Джерелами такої енергії можуть бути землетруси, вибухи, рухомі об'єкти, механічні машини, під час роботи яких виникають вібрації.

Ці хвилі використовують для пошуку корисних копалин у сейсмозв'язці, яка основана на тому, що швидкість поширення та інші характеристики сейсмічних хвиль залежать від властивостей геологічного середовища. Таке середовище є неоднорідним, внаслідок чого у ньому виникають відбивання, заломлення, рефракції, дифракції та поглинання сейсмічних хвиль. Приймаючи та реєструючи відбиті та заломлені сейсмічні хвилі з глибин Землі та опрацьовуючи отриману інформацію можна визначити глибини залягання порід та товщини їх пластів.

Раніше у сейсмозв'язці для збудження сейсмічних хвиль використовували вибухи на глибині кількох десятків метрів. Однак такий метод дорогий і заподіює шкоду довкіллю, адже перед тим, як підірвати вибухівку, необхідно зробити свердловину і туди її помістити. Тепер все частіше використовують різні механічні вібратори, які встановлюють на поверхні Землі.

Є чотири типи сейсмічних хвиль: первинні хвилі (primary waves), вторинні хвилі (secondary waves), хвилі Релея та хвилі Лява. Перші два типи ще називають глибинними, тому що вони проникають у глибини Землі. Під час землетрусів їх використовують для вивчення будови нашої планети. В сейсмозв'язці їх використовують для визначення глибини залягання порід та товщини їх пластів.

Первинними (Р-хвилями) їх називають тому, що вони мають найбільшу швидкість поширення і першими знаходять до детекторів (сейсмоприймачів). Під час передавання енергії Р-хвилями середовище коливається уздовж напрямку їх поширення, тому їх ще називають поздовжніми. Швидкість їх поширення приблизно у два рази більша від вторинних хвиль (S-хвиль). Під час поширення S-хвиль елементи середовища коливаються у вертикальній площині перпендикулярно до напрямку їх поширення.

Хвилі Релея і хвилі Лява ще називають поверхневими хвилями тому, що вони поширюються по поверхні Землі. Площина коливань релеєвських хвиль вертикальна до поверхні Землі та напрямку поширення, а хвилі Лява мають горизонтальну площину коливань. Швидкості S-хвиль та Р-хвиль зв'язані таким співвідношенням [1]

$$g = \frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}, \quad (1)$$

де V_s – швидкість S-хвилі; V_p – швидкість Р-хвилі; ν – коефіцієнт Пуансона.

Відношення $g = \frac{V_s}{V_p}$ визначають експериментально і його можна знайти у літературі [1]. Знаючи V_s та ν , легко визначити коефіцієнт Пуансона та швидкість хвиль Релея [1]

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \cdot V_s, \quad (2)$$

де V_R – швидкість хвиль Релея.

Якщо використовують розміщені на поверхні Землі механічні вібратори як джерела сейсмічних коливань, від 60 % до 65 % їх енергії припадає на поверхневі хвилі й тільки 8 % на глибинні [2], [3].

Оскільки поверхневі хвилі практично не несуть інформації про глибинні властивості геологічного середовища, до того ж на їх фоні важко виділити глибинні хвилі, то з погляду геофізиків, що займаються пошуком корисних копалин, ці хвилі є завадами

і їх вплив треба усунути. Енергія R-хвиль сконцентрована під поверхнею Землі й на глибині довжини хвилі зменшується у 10 разів [3].

R-хвилі та S-хвилі є об'ємними. Їх енергія поширюється сферично. Концентрація цієї енергії залежно від відстані r до джерела через геометричне розходження буде зменшуватися відповідно до $1/4\pi r^2$. Крім того, енергія хвиль буде втрачатися на тертя через неідеальну пружність середовища. Таке ослаблення можна виразити множником $e^{-2\alpha r}$. Отже, енергія об'ємної сейсмічної хвилі в геологічному середовищі одночасно розсіюється внаслідок геометричного розходження і поглинається через неідеальну пружність. Залежність цієї енергії від відстані до джерела дорівнюватиме [2]

$$E(r) = \frac{E_0}{4\pi \cdot r^2} \cdot e^{-2\alpha r}, \quad (3)$$

де E_0 – енергія джерела сейсмічних коливань; r – відстань від джерела; α – коефіцієнт поглинання середовища, вимірюється у m^{-1} .

Що стосується енергії поверхневих хвиль, то її геометричне розсіювання пропорційне до $1/2\pi r$. Тоді залежність енергії хвиль Релея від відстані можна виразити як

$$E(r) = \frac{E_0}{2\pi \cdot r} \cdot e^{-2\alpha r}. \quad (4)$$

З погляду використання поверхневих хвиль у системах охоронної сигналізації вони мають такі переваги:

- енергія цих хвиль не зникає у глибині Землі, а поширюється під її поверхнею;
- оскільки на їх утворення йде більш ніж 60 % енергії джерела, а на утворення глибинних хвиль тільки 8 %, то такі хвилі мають набагато більшу енергію;
- зі зростанням відстані r від джерела їх енергія зменшується пропорційно до $1/r$, а не до $1/r^2$.

З цього можна зробити висновок, що навіть за незначних енергій джерела збудження хвилі Релея можуть поширюватися на значно більші відстані, ніж глибинні.

Сьогодні у системах охоронної сигналізації використовують сенсори вібрацій, які встановлюють у приміщеннях та на поверхні Землі. Однак такі сенсори реєструють перевищення певного рівня вібрацій і сигналізують про це, не визначаючи координат джерела цих вібрацій.

Формування цілей статті. Тому для створення систем охоронної сигналізації, які можуть працювати цілодобово, в автоматичному режимі, передаючи інформацію про координати порушника до єдиного центру, пропонується використати сейсмічні хвилі Релея, які виникають на поверхні Землі під час крокування людини та переміщення автомобільного транспорту.

Робота проводиться для оцінки перспективності практичної реалізації таких систем.

Виклад основного матеріалу. Нижче (рис. 1), подано схему розміщення сенсорів, які в сейсмо-розвідці ще називають сейсмоприймачами, у системі сигналізації, що дасть змогу не тільки визначити перевищення рівня вібрацій, а і знаходити координати їх джерела.

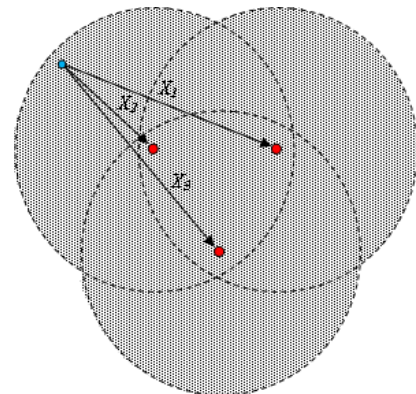


Рис. 1. Розміщення сейсмоприймачів та їх зона чутливості

Fig. 1. Placing seismometers and their sensitivity zone

Кожен з трьох сейсмоприймачів встановлено у центрі кола, обведеного пунктиром. Ці кола охоплюють зони чутливості сейсмоприймачів, які розміщені так, що поверхневі хвилі з будь-якої зони доходять до кожного з цих сенсорів. Знаючи швидкість поширення хвиль, яку неважко визначити експериментально, відношення їх амплітуд, виміряних сенсорами та часові затримки, з якими хвилі приходять до сенсорів, можна визначити відстані X_1 , X_2 , X_3 , а за ними і координати джерела вібрацій. Очевидно, що кількість сенсорів повинна змінюватись залежно від площі та конфігурації ділянки, за якою ведеться спостереження.

За джерело енергії приймаємо сейсмічну енергію, яка виникає під час крокування людини. Під час кожного кроку центр мас людини переміщується по циклоїді [4], коливаючись відносно середньої лінії на

± 4 см. Отже, загальна висота піднімання 8 см. Коли центр мас у найвищій точці, то його потенціальна енергія є найбільшою. Під час кожного кроку ця енергія передається землі, в результаті чого виникають як об'ємні, так і поверхневі сейсмічні хвилі.

Як зазначено вище, на утворення поверхневих хвиль витрачається більш як 60 % енергії механічних вібраторів, однак з літературних джерел не вдалося визначити, чи ця енергія залежить від їх потужності. Також не вдалося знайти розподіл енергії між хвилями Релея та Лява.

Енергію хвиль Релея E_0 , які виникають під час крокування людини, можна записати

$$E_0 = (m_l g H) \cdot k, \quad (5)$$

де m_l – маса людини $m_l = 80$ кг; g – прискорення вільного падіння; H – висота $H = 0,08$ м; k – емпіричний коефіцієнт, що враховує, яка частина енергії кроку переходить у енергію хвиль Релея.

З глибиною енергія хвилі Релея зменшується експоненціально і на відстані довжини хвилі λ у 10 разів менша, ніж на поверхні. Для визначення коефіцієнта згасання енергії хвиль з глибиною запишемо

$$E_\lambda = E_0 \cdot e^{\alpha_\lambda \lambda}, \quad (6)$$

де E_λ – енергія хвиль Релея на глибині λ ; α_λ – коефіцієнт згасання хвиль з глибиною.

Запишемо відношення

$$\frac{E_\lambda}{E_0} = \frac{E_0 \cdot e^{\alpha_\lambda \lambda}}{E_0} = 0,1. \quad (7)$$

Для глини [1] $\lambda = 190$ м. З (7) визначимо, $\alpha_\lambda = -0,012$.

Хвилі Релея подібні до хвиль на поверхні води. Їх фронти поширюються квазіциліндрично. Енергія цих хвиль зменшується як з глибиною, так і зі зростанням радіуса поширення по поверхні. Вісь циліндричного фронту перпендикулярна до поверхні й розміщена там, де і джерело. Знаючи коефіцієнт згасання енергії з глибиною, визначимо середнє значення енергії E_{cp} на глибині осі від 0,4 до 0,5 м. На цій глибині буде встановлено сейсмоприймач. Він займає об'єм куба з розміром ребра 0,1 м:

$$E_{cp} = \frac{E_0}{0,1} \int_{0,4}^{0,5} e^{-\alpha_\lambda \cdot z} dz, \quad (8)$$

де z – глибина.

Енергія від джерела, у якому розміщена вісь циліндра, падає на площу S , де розташований

сейсмоприймач. З урахуванням коефіцієнта поглинання α та відстані до сейсмоприймача x енергія, яка доходить до сейсмоприймача E_{sp} , дорівнюватиме

$$E_{sp}(x) = \frac{E_{cp} \cdot e^{-2\alpha \cdot x}}{10 \cdot S} = \frac{E_{cp} \cdot e^{-2\alpha \cdot x}}{10 \cdot 2p \cdot x}. \quad (9)$$

Оскільки x ми підставляємо у метрах, а α у м^{-1} , то для того, щоб визначити, скільки енергії падає на грань куба розміром 0,1·0,1 м, необхідно енергію, що падає на площу циліндра S , зменшити у десять разів (рис. 2). Цим пояснюється наявність числа 10 у знаменнику виразу (9).

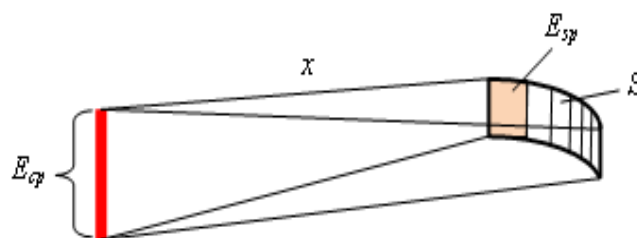


Рис. 2. Циліндричний розподіл енергії хвиль Релея по глибині

Fig. 2. The cylindrical distribution of energy of Rayleigh waves in depth

У хвилях Релея коливання здійснюються у вертикальній площині перпендикулярно до напрямку променя. Коли до куба, де в геологічному середовищі розміщено сейсмоприймач, доходить енергія E_{sp} , то під час проходження хвиль ця енергія по чергово перетворюється з потенціальної на кінетичну. Для того, щоб знайти максимальну швидкість переміщення заданого об'єму геологічного матеріалу у вертикальній площині, необхідно записати

$$V_m(x) = \sqrt{\frac{2E_k(x)}{M}}, \quad (10)$$

де V_m – максимальна швидкість коливань геологічного матеріалу; M – маса геологічного матеріалу; E_k – кінетична енергія, якої набуває певний об'єм геологічного матеріалу, $E_k = E_{sp}$.

Знаючи максимальну швидкість матеріалу та частоту кроків f , можна визначити, як змінюється швидкість матеріалу $V(t)$ у часі

$$V(x, t) = V_m(x) \cdot \sin(2\pi f \cdot t). \quad (11)$$

У нашому випадку $f = 2$ Гц.

Середнє значення швидкості за чверть періоду T дорівнюватиме

$$V_{cer}(x) = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} V_m(x) \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \cdot dt. \quad (12)$$

Для потенціальної енергії певного об'єму геологічного матеріалу запишемо

$$E_p(x) = K \cdot z_m^2(x), \quad (13)$$

де K – коефіцієнт жорсткості середовища, Н/м; z_m – максимальне вертикальне зміщення геологічного матеріалу в місці встановлення сейсмоприймача.

Проінтегрувавши (11) за половину періоду, можна визначити максимальне зміщення z_m

$$z_m(x) = \int_0^{\frac{T}{2}} V_m(x) \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \cdot dt. \quad (14)$$

Підставивши z_m у (13), визначимо коефіцієнт жорсткості середовища K

$$K = \frac{E_p(x)}{z_m^2(x)} \quad (15)$$

За відомим коефіцієнтом жорсткості середовища можна визначити, яким буде максимальне відхилення сейсмоприймача, розміщеного у геологічному середовищі на глибині від 0,4 до 0,5 м у кубі з розміром ребра 0,1 м, залежно від відстані x від джерела сейсмічних коливань

$$z_m(x) = \sqrt{\frac{E_p(x)}{K}}. \quad (16)$$

Напряга вихідного сигналу існуючих сейсмоприймачів є функцією їх швидкості, а не переміщення (амплітуди коливань). Тому на значення вихідного сигналу впливатиме не тільки амплітуда коливань, а і їх частота, що створюватиме неоднозначність вихідного сигналу.

За чутливості від 0,3 до 0,7 В/м·с⁻¹ [2] та зміщення геологічного середовища на $1 \cdot 10^{-7}$ м вихідний сигнал такого сейсмоприймача матиме значення від 0,4 до 0,9 мкВ. Виділити такий сигнал на фоні шумів дуже важко.

Для спостереження за амплітудою сейсмічних хвиль пропонується використати ємнісний перетворювач (рис. 3). З обох боків інертної маси встановлено конденсатори C_1 та C_2 . Зовнішні обкладки конденсаторів жорстко кріпляться до корпусу. Інерційна маса M зв'язана з корпусом через пружини. Під час руху корпусу інертна маса намагається залишитися у стані спокою, викликаючи розтягання та стискання пружини та зміну ємностей C_1 та C_2 . Для перетворення ємності цих конденсаторів використано перетворювачі ємність–частота. Частота перетворювачів є функцією відстані між обкладками конденсаторів. Використання таких

перетворювачів дає можливість уникнути аналогових вихідних сигналів, які вимірюються мікрвольтами, крім того, частотні сигнали простіше передавати каналами зв'язку без втрат вимірювальної інформації.

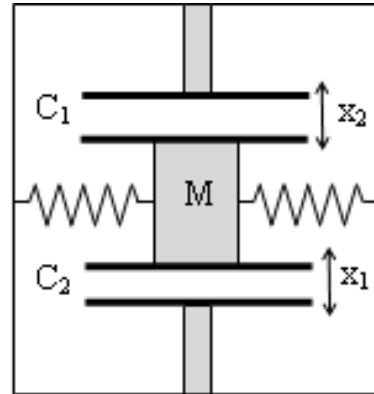


Рис. 3. Механічна схема ємнісного сейсмоприймача

Fig. 3. Mechanical scheme of capacitive seismometers

Проведено деякі практичні дослідження таких перетворювачів з метою визначення їх динамічного діапазону та порога чутливості. На рис. 4 подано функцію перетворення $\Delta F_{per}(x) = F_{per1}(x) - F_{per2}(x)$, де $F_{per1}(x)$ – частота першого перетворювача, $F_{per2}(x)$ – частота другого перетворювача.

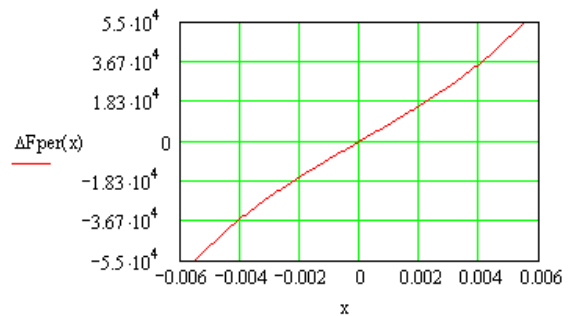


Рис. 4. Функція перетворення ємнісного сейсмоприймача

Fig. 4. Transfer function of capacitive seismometers

На рис. 5 зображено, яким буде поріг чутливості $\Delta F(x)$ (приріст частоти у Гц) у разі приросту зміщення $\Delta x = 1,2 \cdot 10^{-7}$ м вздовж осі x .

За даними з [2] для рихлих осадових порід (глина) коефіцієнт поглинання може мати значення від 10^{-3} м^{-1} до $0,5 \text{ м}^{-1}$. Крокування людини є періодичним. Воно збуджує імпульси зміщення у геологічному середовищі. Ці імпульси можна розкласти у спектр

частот. Оскільки перша гармоніка такого спектра має найбільшу енергію, то для оцінки відстані зроблено допущення, що саме ця гармоніка несе всю енергію спектра. Також у літературних джерелах [2], [3], вказано, що від 60 до 65 відсотків енергії джерела забирають поверхневі хвилі, однак ніде не вдалося знайти розподілу енергії між цими хвилями. Крім того, не вказано, чи такий розподіл енергії стосується і малопотужних джерел. Тому зроблено допущення, що у малопотужних джерелах поверхневі хвилі забирають 10 % відсотків енергії і ця енергія розподіляється між хвилями Релея та хвилями Лява порівну.

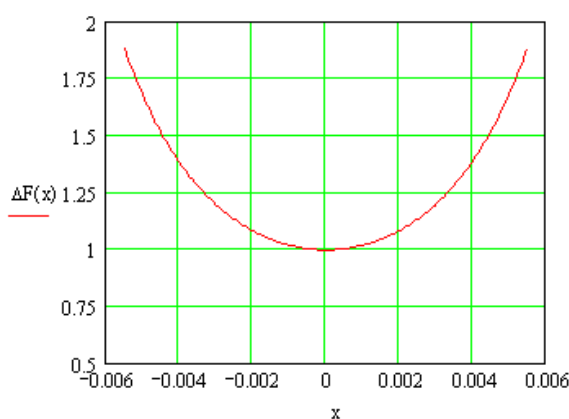


Рис. 5. Значення порога чутливості ємнісного сейсмоприймача

Fig. 5. The value of threshold of sensitivity capacitive seismometers

Знаючи поріг чутливості, за поданими вище математичними моделями з урахуванням всіх допущень зроблено спробу оцінити відстань, з якої ємнісний сейсмоприймач з чутливістю $1 \text{ Гц}/1.2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ відчує сейсмічні хвилі, збуджені крокуванням людини за різних значень коефіцієнта поглинання α :

- якщо $\alpha = 0,05 \text{ м}^{-1}$, відстань дорівнює 200 м;

- якщо $\alpha = 0,1 \text{ м}^{-1}$, відстань дорівнює 100 м;
- якщо $\alpha = 0,2 \text{ м}^{-1}$, відстань дорівнює 52 м;
- якщо $\alpha = 0,5 \text{ м}^{-1}$, відстань дорівнює 22 м.

Висновки. Для сейсмозвідки поверхневі хвилі є завадами. Швидше за все, цим можна пояснити недостатню кількість інформації про кількість енергії, яка припадає на утворення поверхневих хвиль, та залежність цієї кількості від потужності джерела.

Зона чутливості може бути обмежена так званими мікросейсмами, які виникають від вібрацій ґрунту, викликаних коливаннями дерев, роботою транспорту та промислових підприємств. Для обмеження впливу мікросейсмів доцільно застосувати фільтри.

Тому перед тим, як зробити висновок про доцільність практичної реалізації таких систем, дані стосовно зони чутливості сейсмоприймача потребують додаткової експериментальної перевірки у польових умовах, де необхідно експериментально дослідити:

- яка кількість енергії джерела припадає на хвилі Релея та Лява;
- розподіл енергії між поверхневими хвилями;
- за відношенням амплітуд визначати коефіцієнт поглинання поверхневих хвиль для місцевості, де використовуватиметься охоронна система.

1. Манштейн А. К. Малоглубинная геофизика: пособие по спецкурсу. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2002. – 135 с. 2. http://www.kscnet.ru/ivs/publication/tutorials/geophys_studies/chapter1.pdf. 3. Фальшинский В. В. Паралельная обработка данных многокомпонентных сейсмических наблюдений // Кибернетика и системный анализ. – 2011. – № 2. – С 181–186. 4. Микулин А. А. Активное долголетие. – Москва: Физкультура и спорт, 1977. – 197 с.