

ВПЛИВ МАГМАТИЧНИХ ПОРІД ВИГОРЛАТ-ГУТИНСЬКОГО ВУЛКАНІЧНОГО ПАСМА НА ЧАС ПРОБІГУ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ

Е. Козловський, Д. Малицький, А. Парфенюк, О. Грицай, В. Тимошук,
І. Ярема, О. Асташкіна, М. Махніцький

*Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, вул. Наукова, 3Б, м. Львів,
79060, Україна, e-mail: dmalytsky@gmail.com, kem2406@gmail.com, susyinet@gmail.com*

Уточнення швидкісних моделей під сейсмічними станціями Закарпаття важливе для уточнення визначених механізмів джерел землетрусів. Механізми вогнищ землетрусів визначають за стандартною швидкісною моделлю для певної сейсмічної станції Закарпаття, зазвичай однаковою для всіх станцій. Проте значення швидкостей поширення сейсмічних хвиль у середовищі суттєво впливають на розрахунок кута виходу сейсмічної хвилі, на основі якого визначають механізм джерела землетрусу. Тому для уточнення цього механізму важливо не використовувати стандартну швидкісну модель, а розраховувати швидкість пробігу сейсмічної хвилі в шарах для кожної сейсмічної події, оскільки вони можуть суттєво різнитися і, відповідно, впливати на визначення кутів виходу прямих P -хвиль із вогнища на станцію. На прикладі події, що відбулась 17.10.2006 р. ($\varphi = 48,61^\circ \text{ N}$, $\lambda = 22,46^\circ \text{ E}$, $\varepsilon = 24140\text{м}$, $h = 3300\text{м}$) показано, що вплив магматичних порід Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма значно зменшує час пробігу сейсмічних хвиль у осадовому шарі та частково у фундаменті.

Ключові слова: Вигорлат-Гутинське вулканічне пасмо, швидкісна модель, час пробігу сейсмічної хвилі, механізм вогнища землетрусу.

Вступ. Закарпатський регіон надзвичайно складний для вивчення сейсмічності внаслідок блокової будови, наявності глибинних розломів і великої кількості неглибоких розломів, центрів вулканізму та проявів магматичних порід як на поверхні, так і прихованих на деяких глибинах. Відповідно, виникає потреба у дослідженні впливу окремих геологічних формацій регіону на часи пробігу сейсмічних хвиль для подальшого використання у визначенні механізмів джерел землетрусів. З цієї позиції інтерес становить дослідження Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма, вплив його поверхневих і прихованих магматичних порід на часи пробігу сейсмічних хвиль.

Мета роботи – уточнення швидкостей поширення сейсмічних хвиль у першому та другому шарах для сейсмічних подій, зареєстрованих сейсмостанціями Мукачеве, Брід і Нижнє Селище за період 2002–2013 рр. з урахуванням впливу магматичних порід Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма.

Теорія. За даними статті [4] і сейсмологічних бюлетенів України за період з 2002 по 2013 р. [5] розраховано швидкості пробігу прямої P -хвилі в першому шарі (джерело розташовано в першому шарі) та в першому і другому шарах (джерело розташовано в другому шарі).

Для розрахунку швидкості пробігу прямої P -хвилі в другому шарі (фундаменті), в якому розташовано джерело (рис. 1), використано формули полінома 4-го степеня [1].

Отже, точкове джерело сейсмічних хвиль S_r знаходиться у другому шарі на глибині $(h_1 + h_2)$. Сейсмічні хвилі від джерела реєструють на сейсмічній станції P_r .

Швидкість поширення прямої P -хвилі у другому шарі V_{p2} (рис. 1) визначаємо за рівнянням [1]

$$Bx^4 - Cx^3 + Dx^2 + Ex + F = 0. \quad (1)$$

Тут $B = \frac{v_{a1}^4 - 2v_{a1}^2 v_2^2 + v_2^4}{v_{a1}^4 v_2^4}$, $C = \frac{4\varepsilon}{v_2^2} \left(\frac{v_1^2 + v_2^2}{v_1^2 v_2^2} \right)$,

$$D = \frac{6\varepsilon^2 + 2h_2^2}{v_2^4} - \frac{2A}{v_{a1}^2 v_2^2} - 2t_r^2 \frac{v_{a1}^2 + v_2^2}{v_{a1}^2 v_2^2} + \frac{2h_1^2}{v_{a1}^4},$$

де $A = \varepsilon^2 + h_1^2 + h_2^2$, $I = \frac{4t_r^2 \varepsilon}{v_2^2} - \frac{4\varepsilon^3 + 4\varepsilon h_2^2}{v_2^4} + \frac{4\varepsilon h_1^2}{v_{a1}^2 v_2^2}$,

$$E = \left(\frac{\varepsilon^2 + h_2^2}{v_2^2} - \frac{h_1^2}{v_{a1}^2} \right) - 2t_r^2 \frac{v_2^2 h_1^2 + v_{a1}^2 (\varepsilon^2 + h_1^2)}{v_{a1}^2 v_2^2} + t_r^4;$$

h_1 – потужність першого шару, h_2 – потужність другого шару, v_{a1} – уточнена швидкість прямої P -хвилі в 1-му шарі, v_2 – швидкість прямої P -хвилі в 2-му шарі (відповідно до бюлетеня), t – час розрахований, t_r – час, узятий з бюлетеня, ε – епіцентрально відстань.

Таким чином, із рівняння (1) отримано значення x , уточнену швидкість V_{p2} і, відповідно, час пробігу прямої хвилі у другому шарі.

Моделювання. Покажемо вплив Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма із вулканічними центрами та виходом на поверхню магматичних порід на швидкість поширення сейсмічної хвилі. Слід зазначити, що визначенню швидкісної моделі під сейсмічними станціями та моделюванню поширення сейсмічних хвиль у шаруватому півпросторі присвячено багато публікацій, зокрема [2, 3, 6].

Розглянемо декілька прикладів отриманих результатів для сейсмічних станцій. Так, на станції

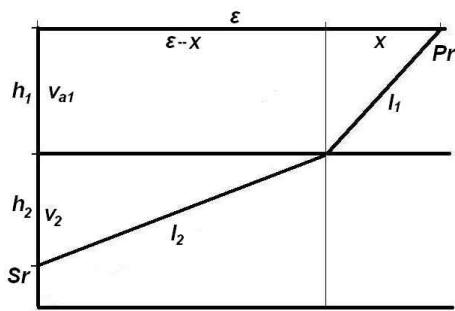


Рис. 1. Проходження прямої P -хвилі від джерела Sr , яке розташовано у другому шарі (фундаменті)

Fig. 1. Propagation of the direct P -wave from source Sr , which is located in the second layer (basement)

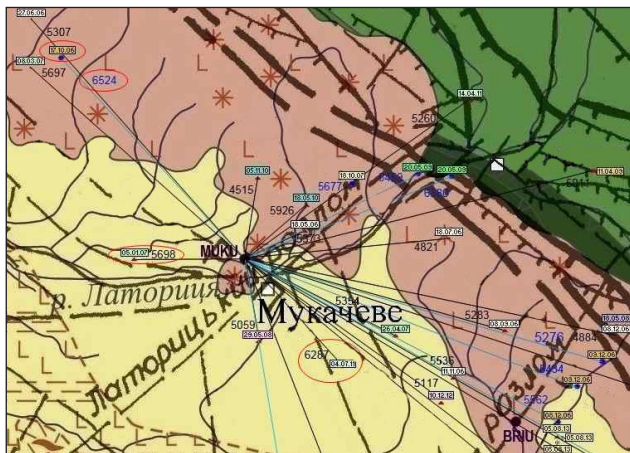


Рис. 2. Розподіл швидкостей пробігу прямої P -хвилі для сейсмостанції Мукачеве

Fig. 2. Distribution of the average propagation speed of direct P -waves for seismic station "Mukacheve"

Мукачеве (рис. 2) для джерел, розташованих у районі Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма, та сейсмічних хвиль, які через нього проходять, швидкість поширення прямої P -хвилі варіює від $V_{p1} \approx 4500$ до ≈ 6000 м/с (джерело в першому шарі), що суттєво перевищує швидкість в осадових шарах. Крім того, для сейсмічної події, які відбулась 04.07.2011, отримано $V_{p1} = 6287$, а для події 05.01.2007 – 5698 м/с. Джерела цих землетрусів знаходяться поза зоною виходу магматичних порід на поверхню, а пряма P -хвиля не поширюється через цю зону, тому можна зробити висновок, що магматичні породи можуть залягати у першому шарі на деякій глибині (приховані магматичні породи).

Для джерел подій, які розміщені у другому шарі, спостерігаємо зміну V_{p2} від ≈ 5200 до ≈ 5600 м/с, що є нормальною швидкістю поширення прямої P -хвилі у фундаменті. Втім, для землетрусу, що відбувся 17.10.2006, отримано $V_{p2} \approx 6524$ м/с, що може свідчити про наявність вулканічних порід у фундаменті.

На рис. 2 (і в наступних прикладах) позначено: рожевим кольором – вихід на поверхню магматичних порід, червоним трикутником – епіцентри землетрусів із джерелом у першому шарі; синьою зірочкою – епіцентри землетрусів із джерелом у

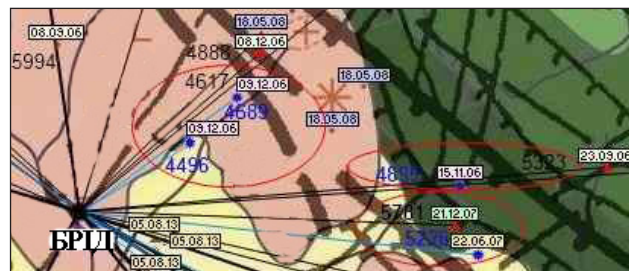


Рис. 3. Фрагмент розподілу швидкостей пробігу прямої P -хвилі для сейсмостанції Брід

Fig. 3. Segment of distribution of the average propagation speed of direct P -waves for seismic station "Brid"



Рис. 4. Фрагмент розподілу швидкостей пробігу прямої P -хвилі для сейсмостанції Брід

Fig. 4. Segment of distribution of the average propagation speed of direct P -waves for seismic station "Brid"

другому шарі; числа чорного кольору – V_{p1} ; числа синього кольору, обведені червоним – V_{p2} ; у прямокутниках – дати землетрусів.

Для станції Брід спостерігаємо швидкості пробігу прямої P -хвилі V_{p1} від ≈ 4600 до ≈ 6000 м/с (джерело в першому шарі). Для джерел, розташованих у другому шарі, величина V_{p2} змінюється від ≈ 4500 до ≈ 5100 м/с (рис. 3, 4). Для сейсмічних подій 08.12.2006 р. (перший шар), 09.12.2006 р. (фундамент) V_{p1} та V_{p2} дуже близькі (рис. 3, 4). Для пар землетрусів 23.09.2006 – 15.11.2006 та 21.12.2007 – 22.06.2007 V_{p1} значно більша за V_{p2} (див. рис. 3).

Для станції Нижнє Селище швидкість пробігу прямої P -хвилі змінюється: V_{p1} від ≈ 4700 до ≈ 6200 , V_{p2} від ≈ 5100 до ≈ 5400 м/с (рис. 5). Однак для землетрусу, що відбувся 29.12.2011 отримано $V_{p1} \approx 2755$ м/с та дещо занижені швидкості пробігу прямої P -хвилі у фундаменті: V_{p2} від ≈ 4400 до ≈ 4600 м/с (рис. 6).

Результати моделювання. Розглянемо землетрус, який відбувся 17.10.2006 р. ($\varphi = 48,61^\circ$ N; $\lambda = 22,46^\circ$ E; $\varepsilon = 24140$ м, $h = 3300$ м) і зареєстрований сейсмостанцією Мукачеве. Механізм вогнища землетрусу побудуємо графічним методом. Похибка розрахунку пробігу сейсмічної хвилі з урахуванням нев'язок на сейсмостанції становить менш як 6 %.

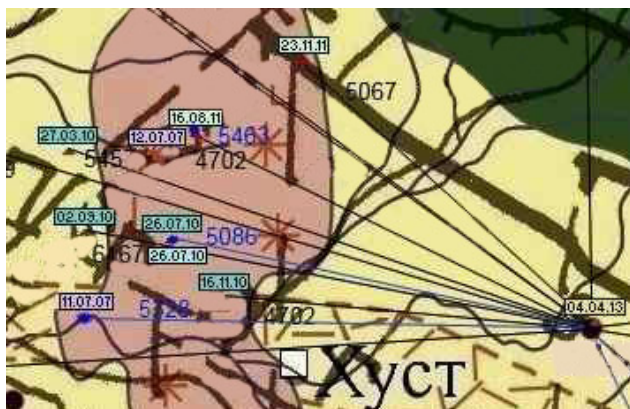


Рис. 5. Фрагмент розподілу швидкостей пробігу прямої P-хвилі для сейсмостанції Нижнє Селище

Fig. 5. Segment of distribution of the average propagation speed of direct P-waves for seismic station "Nyzhnie Selysche"



Рис. 6. Фрагмент розподілу швидкостей пробігу прямої P-хвилі для сейсмостанції Нижнє Селище

Fig. 6. Segment of distribution of the average propagation speed of direct P-waves for seismic station "Nyzhnie Selysche"

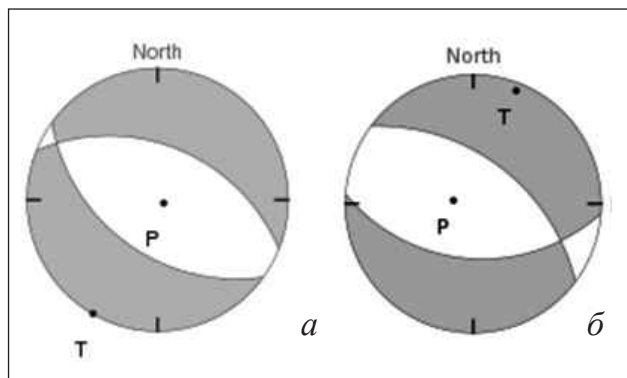


Рис. 7. Механізм джерела землетрусу 17.10.2006 р., який визначений за стандартною швидкісною моделлю (а) та за швидкісною моделлю, яку розраховано для цієї окремої події (б)

Fig. 7. Focal mechanism of the earthquake 17.10.2006: а – with a standard velocity model, б – velocity of the model calculated for the each event

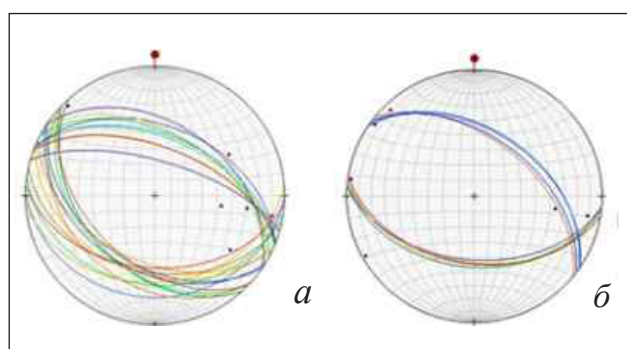


Рис. 8. Варіанти вибору нодальних площин для побудови механізму джерела землетрусу 17.10.2006 р.: а – за стандартною швидкісною моделлю; б – за швидкісною моделлю, яку визначено за рівнянням (1) для цієї окремої події

Fig. 8. Selection of the nodal planes for determination of the focal mechanism of the earthquake 17.10.2006: а – with a standard velocity model, б – velocity of the model calculated for the each event

Параметри фокальних механізмів Parameters of the focal mechanisms

Шар	1-ша нодальна площина			2-га нодальна площина			P-вісь		T-вісь	
	φ	δ	λ	φ	δ	λ	φ	δ	φ	δ
1	292	45	-100	126	46	-80	296	-83	29	-1
2	307	51	-68	94	44	-115	100	-73	22	4

Параметри фокальних механізмів, розраховано для стандартної швидкісної моделі (ст. Мукачеве: $V_{p1} = 4700$; $V_{p2} = 5500$ м/с) і для швидкісної моделі, яку визначено за методикою згідно з рівнянням (1): $V_{p1} = 5307$; $V_{p2} = 6524$ м/с (див. таблицю).

Побудувавши механізми вогнища землетрусу графічним методом для сейсмічної події, що відбулася 17.10.2006, у обох випадках отримали варіант скиду (рис. 7). За даними таблиці визначаємо також різницю між механізмами за кутом простягання, яка дорівнює: $\varphi = 15^\circ$ (див. таблицю, рис. 7).

Під час побудови механізму вогнища землетрусу слід звернути увагу на варіанти вибору нодальних площин для обох моделей. На рис. 7 показано варіанти вибору нодальних площин для стандартної швидкісної моделі (рис. 8, а) і для швидкісної моделі, яку розраховано для цієї окремої події (рис. 8, б). У першому випадку розкид нодальних площин сягає 20 %, у другому – лише 4 %, що значно полегшує вибір цих площин та зменшує похибку під час визначення механізму вогнища землетрусу.

Висновки. Вплив магматичних порід Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма значно зменшує час пробігу сейсмічних хвиль у осадовому шарі та частково у фундаменті. Для визначення механізму джерела землетрусу слід враховувати швидкості пробігу сейсмічних хвиль у шарах для кожного окремого випадку, а не використовувати стандартні швидкісні моделі для сейсмічних станцій. Це дає точніші результати розрахунку кута виходу сейсмічної хвилі та суттєво полегшує вибір нодальних площин.

Список бібліографічних посилань

1. Козловський Е.М., Малицький Д.В., Павлова А.Ю. Розрахунок та аналіз азимутальних коефіцієнтів q_i для Закарпатського сейсмоактивного регіону. *Геодинаміка*. 2013. № 2(15). С. 174–176.
2. Малицький Д.В., Павлова А.Ю., Грицай О.Д., Муйла О.А., Асташкіна О.О., Обідіна О.О. Методика

визначення параметрів джерела (точкового та розподіленого) за даними обмеженої кількості сейсмічних станцій. *Геоінформатика*. 2016. № 4(60). С. 20–28.

3. Малицький Д.В., Муйла О., Павлова А., Грицай О., Коваль Ю., Обідіна О. Вогнище землетрусу: моделювання, визначення параметрів і використання. *Геоінформатика*. 2016. № 1(57). С. 1–12.
4. Приходько Г. Цикличность эволюции неогенового вулканизма и связанное с ним оруденение в южной части Мукачевской депрессии. *Геолог Украины*. 2004. № 4(8). С. 50–54.
5. Пустовитенко Б.Г. Сейсмологический бюллетень Украины. Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2002–2013.
6. Mai P.M., Schorlemmer D., Page M., Ampuero J.-P., Malysky D. The Earthquake-Source Inversion Validation (SIV) Project. *Seismo. Res. Lett.* 2016. 87 (3). P. 690–708.

Надійшла до редакції 26.06.2017 р.

ВЛИЯНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД ВИГОРЛАТ-ГУТИНСКОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ГРЯДЫ НА ВРЕМЯ ПРОБЕГА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Э. Козловский, Д. Малицкий, А. Парфенюк, О. Грыцай, В. Тимошук, И. Ярема, А. Асташкина, Н. Махницкий
Карпатское отделение Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, ул. Научная, 3Б, г. Львов, 79060, Украина, e-mail: dmalytsky@gmail.com, kem2406@gmail.com, susyinet@gmail.com

Рассмотрено уточнение скоростей пробега сейсмических волн в первом и втором слоях для сейсмических событий, зарегистрированных сейсмостанциями Мукачево, Брод и Нижнее Селище за период с 2002 по 2013 г. с учетом влияния магматических пород Вигорлат-Гутинской вулканической гряды. Уточнение скоростных моделей под сейсмическими станциями Закарпатья важно для уточнения исследуемых механизмов источников землетрясений. Для определения механизмов очагов землетрясений используется стандартная скоростная модель на конкретной сейсмической станции Закарпатья. Однако значения скоростей распространения сейсмических волн в среде существенно влияют на расчет угла выхода сейсмической волны, на основе которого определяется механизм источника землетрясения. Поэтому для уточнения механизма источника землетрясения важно не применять стандартную скоростную модель, а рассчитывать скорости пробега сейсмической волны в слоях для каждого сейсмического события, так как они могут существенно различаться в зависимости от азимутов станций и углов выхода прямых P -волн из очага на станцию. На примере события, которое состоялось 17.10.2006 г. ($\varphi = 48,61^\circ \text{ N}$, $\lambda = 22,46^\circ \text{ E}$, $\varepsilon = 24140 \text{ м}$, $h = 3300 \text{ м}$), показано, что влияние магматических пород Вигорлат-Гутинской вулканической гряды значительно уменьшает время пробега сейсмических волн в осадочном слое и частично в фундаменте.

Ключевые слова: Вигорлат-Гутинская вулканическая гряда, скоростная модель, время пробега сейсмической волны, механизм очага землетрясения.

EFFECT OF MAGMATIC ROCKS VYGORLAT-HUTYN VOLCANIC RIDGE ON PROPAGATION TIME OF SEISMIC WAVES

E. Kozlovskyy, D. Malysky, A. Parfeniuk, O. Grytsai, V. Tymoshchuk, I. Yarema, O. Astashkina, M. Makhnitsky
Carpathian Branch of the Subbotin Institute of Geophysics, NAS Ukraine, 3B, Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine, e-mail: dmalytsky@gmail.com, kem2406@gmail.com, susyinet@gmail.com

The purpose of this work is to clarify the velocity of seismic waves propagation in the first and second layers for seismic events recorded by the seismic stations “Mukacheve”, “Brid” and “Nyzhnie Selysche” for the period from 2002 through to 2013 with the influence of magmatic rocks of the Vygortat-Hutyn volcanic ridge. The investigation is important in determining and specifying the focal mechanisms of earthquakes.

Methodology. To determine the focal mechanisms of the earthquake, use is commonly made of the standard velocity model for a particular Transcarpathian seismic stations. However, the value of the velocity of seismic waves propagation in the medium has a significant impact on the calculation of the take-off angle of seismic wave, which is one of the major parameters for determining the focal mechanism of earthquakes. Therefore, to clarify the earthquake

focal mechanism it is necessary to use a non-standard velocity model and calculate the velocity of the seismic waves propagation in layers for each seismic event, as they can vary widely depending on the azimuth of the stations and the take-off angles of direct P-wave from the source to station.

Findings. The example of the events that took place 17.10.2006. ($\varphi = 48,61^\circ$ N, $\lambda = 22,46^\circ$ E, $\varepsilon = 24140$ m, $h = 3300$ m) shows that the impact of magmatic rocks Vygorlat-Hutyn volcanic ridge reduces the propagation time of seismic waves in the sedimentary layer and partially in the basement.

Practical value. To determine the focal mechanism of the earthquake, we are to consider velocity of seismic waves in the layers for each individual case but not the standard velocity model under seismic stations.

Keywords: Vygorlat-Gutinska volcanic ridge, velocity model, time of propagation of the seismic wave, focal mechanism of the earthquake.

References:

1. Kozlovskyy E., Malytskyy D., Pavlova A. The calculation and analysis of azimuthal q_i coefficients for seismically active regions Transcarpathian. *Geodynamics*, 2013, no. 2, pp. 174-176 [in Ukrainian].
2. Malytskyy D., Pavlova A., Grytsai O., Muyla O., Astashkina O., Obidina O. Method of determination of source parameters (point and distributed) based on data of limited number of seismic stations. *Geoinformatika*, 2016, no. 4, pp. 20-28 [in Ukrainian].
3. Malytskyy D., Muyla O., Pavlova A., Grytsai O., Koval Yu., Obidina O. Fire earthquake: simulation, determination of parameters and usage. *Geoinformatics*, 2016, no. 1, pp. 1-12 [in Ukrainian].
4. Prykhodko G. The cyclic evolution of the Neogene volcanism and associated mineralization of the southern part of the Mukachevo depression. *Geologist of Ukraine*, 2004, no. 4, pp. 50-54 [in Russian].
5. Seismological Bulletin of Ukraine (2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013): [under ed. B.G. Pustovitenko]. Sevastopol, NPC "ECOSY-Hydrophysics" [in Russian].
6. Mai P.M., Schorlemmer D., Page M., Ampuero J.-P., Malytskyy D. The Earthquake-Source Inversion Validation (SIV) Project. *Seismo. Res. Lett.*, 2016, no. 87, pp. 690-708.

Received 26/06/2017