



550.348.436(262.5)

В. Ю. Бурмін, Л. О. Шумлянська

## Просторовий розподіл гіпоцентрів землетрусів Кримсько-Чорноморського регіону

(Представлено академіком НАН України В. І. Старостенком)

На основі нового підходу до визначення просторового розташування гіпоцентрів землетрусів були переглянуті координати подій, представлених у бюлетенях Кримсько-Чорноморського регіону за період з 1970 до 2012 рр. Отримано такі результати: більшість гіпоцентрів землетрусів лежить глибше 12 км, що відповідає 12-кілометровій межі в гірській частині Криму та практично немає осередків, які виходили б на поверхню; розподіл гіпоцентрів землетрусів має форму, близьку до конусоподібної з вершиною в районі Ялта-Алушта, а осередки землетрусів простежуються до глибин 300 км. Такий розподіл істотно змінює геодинамічну картину регіону.

**Ключові слова:** сейсмічність, гіпоцентри, землетрус.

Координати гіпоцентрів землетрусів до кінця 80-х років визначалися графоаналітичними методами, а з початку 90-х років — за допомогою ЕОМ [1]. По суті, ці методи визначення координат гіпоцентрів зводяться до мінімізації функціонала нев'язок теоретичних і спостережних часів проходження сейсмічних хвиль. Однак, як показано в публікаціях [2, 3], такий підхід до визначення координат гіпоцентрів не є оптимальним.

Нехай  $R_i$ ,  $D_i$  и  $H$  відповідають теоретичним часам  $t_i$  проходження сейсмічних хвиль від осередку до  $i$ -ї станції, де  $R_i = v_i t_i$  — гіпоцентральної відстані;  $D_i = \sqrt{R_i^2 - H^2}$  — епіцентральної відстані,  $H$  — глибина осередку землетрусу;  $r_i = u_i t_i$ ,  $d_i$  й  $h$  — ті самі величини, але відповідають справжньому положенню гіпоцентра ( $u_i = v_i - \delta v_i$ ). Тоді для функціонала  $S_t$  можна записати:

$$\begin{aligned} S_t &= \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{t}_i - \delta\tau_i)^2 = \sum_{i=1}^n v_i^{-2} (v_i t_i - v_i \hat{t}_i - v_i \delta\tau_i)^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n v_i^{-2} (v_i t_i - u_i \hat{t}_i - \hat{t}_i \delta v_i - v_i \delta\tau_i)^2 = \sum_{i=1}^n v_i^{-2} (R_i - r_i - \delta r_i)^2, \end{aligned}$$

© В. Ю. Бурмін, Л. О. Шумлянська, 2015

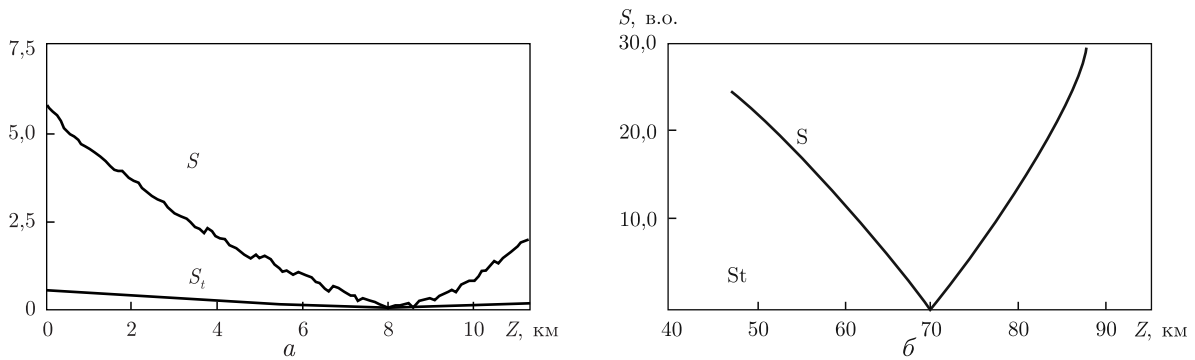


Рис. 1. Поведінка функціоналів  $S$  й  $S_t$  для осередка на глибині: 10 км (а) та 70 км (б)

де  $\hat{t}_i = \tilde{t}_i - \delta\tau_i; \quad \delta r_i = t_i\delta v_i + v_i\delta\tau_i;$

$$\begin{aligned}
 S_t &= \sum_{i=1}^n v_i^{-2} (R_i - r_i - \delta r_i)^2 = \sum_{i=1}^n v_i^{-2} (R_i - \tilde{r}_i)^2 = \\
 &= \sum_{i=1}^n v_i^{-2} \{D_i^2 + H^2 + d_i^2 + h^2 - 2[(D_i^2 + H^2)(d_i^2 + h^2)]^{1/2}\} = \\
 &= \sum_{i=1}^n v_i^{-2} \{(D_i - d_i)^2 + (H - h)^2 - \sigma_i^2\} \leq \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - d_i)^2 + Y(H - h)^2 = S,
 \end{aligned}$$

де  $\sigma_i^2 = 2\{[(D_i^2 + H^2)(d_i^2 + h^2)]^{1/2} - d_i D_i - h H\} \geq 0$ ;  $D_i, H$  й  $d_i, h$  — епіцентральні відстані й глибини, що відповідають теоретичному і спостережному часу проходження сейсмічних хвиль;  $\rho_i = v_i^{-2}$  й  $Y = \sum_{i=1}^n \rho_i$  — вагові множники, що характеризують однорідність середовища. З отриманого співвідношення випливає, що малість значення функціонала  $S_t$  не гарантує малості значень функціоналів нев'язок у визначенні глибини гіпоцентра землетрусу і епіцентральних відстаней, але малість значення функціонала  $S$  спричиняє малість значення функціонала нев'язки часів. Це твердження — висновок того факту, що квадрат різниці  $(R_i - r_i)^2$  — суть квадрат різниць модулів векторів  $R_i$  й  $r_i$  і не залежить від їх напрямів, у той час як сумою квадратів різниць  $(D_i - d_i)^2 + (H - h)^2$  є квадрат модуля різниці  $R_i - r_i$  відповідних векторів. Отже, правдиве твердження, що модуль різниці двох сторін трикутника завжди менше довжини третьої сторони.

Поведінку функціоналів  $S_t$  й  $S$  залежно від глибини джерела для двох випадків положення гіпоцентра щодо системи станцій ілюструє рис. 1. Криві на рис. 1, а відповідають глибині осередку, що дорівнює 10 км, а на глибині 70 км, (див. 1, б). Епіцентри цих осередків збігаються. З огляду цих рисунків знаходимо, що обчислення функціоналів і, отже, координат гіпоцентра для осередку з глибиною 10 км менш стійке, ніж з глибиною 70 км. Для осередку з глибиною 10 км функціонали  $S_t$  й  $S$  мають мінімуми на глибині близько 8,0 км. Для глибини осередку, що дорівнює 70 км, функціонал  $S_t$  в інтервалі глибин 44–88 км залишається практично постійним, а функціонал  $S$  на глибині 70 км має строгий мінімум.

Виходячи із зазначеного вище, завдання визначення координат гіпоцентрів землетрусів слід ставити не як завдання мінімізації функціонала  $S_t$  або, що еквівалентно, суми різниці довжин векторів  $R_i$  й  $r_i$ , а як завдання мінімізації функціонала:

$$S = \sum_{i=1}^n \omega_i (D_i - d_i)^2 + (H - h)^2,$$

де  $\omega_i = \rho_i/Y$ , тобто як завдання мінімізації відстані між точками  $(X, Y, H)$  й  $(x, y, h)$ , що відповідають теоретичним  $t_i$  та спостережним  $\tilde{t}_i$  часами пробігу сейсмічних хвиль від чередку землетрусів до реєструючих станцій.

У публікаціях [2, 3] досить докладно описано алгоритм розв'язання цієї задачі. Також було створено програму на мові ФОРТРАН'98, яка реалізує цей алгоритм. Програма передбачає використання часів вступу як поздовжніх, так і поперечних хвиль. Час в осередку визначається за графіком Вадаті. Причому достатньо завдання часів вступу поперечних хвиль хоча б на одній станції. У цьому випадку задається відношення швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль, що становить 1,73. Передбачено також визначення часу в осередку при фіксованому значенні  $V_P/V_S$ . Крім цього, в якості вихідних даних задаються координати сейсмічних станцій і швидкості колонки поздовжніх хвиль під кожною станцією. Порівняння цієї роботи програми з програмою НУРО71 та її модифікаціями на тестових моделях показує істотну перевагу першої програми над другою. Особливо явно ця перевага виявляється при визначенні глибини осередків землетрусів, оскільки результати роботи програми НУРО71 істотно залежать від досвіду інтерпретатора.

Враховуючи ту обставину, що координати гіпоцентрів традиційними методами можуть визначатися з великими похибками, було вирішено перевизначити координати всіх землетрусів, зареєстрованих кримськими сейсмічними станціями. Дані про часи вступу поздовжніх і поперечних хвиль були взяті з сейсмологічних бюлетенів, які публікуються з 1970 р. На жаль, у бюлетенях за період з 1970 по 2012 рр. наведено дані тільки про 1470 подій, зареєстрованих трьома і більше станціями, в той час як в каталогах є трохи більше ніж 2100 землетрусів.

Перш ніж перерахувати координати гіпоцентрів землетрусів, визначені на основі аналізу графіків Вадаті, проведено очищення бюлетенів від "поганих" даних. Передбачалося, що великі похибки в графіках Вадаті насамперед вносять помилки у визначенні на сейсмограмах фази поперечних хвиль. У зв'язку з цим, були прибрані ті значення часів вступу поперечних хвиль, які дають великі відхилення від графіка Вадаті. Сумарні графіки Вадаті до й після корегування часів вступу поздовжніх хвиль демонструє рис. 2. Усі точки на рисунку наведені до  $t_0 = 0$ . Нахил графіка становить 1,379, що відповідає відношенню швидкостей поперечних та поздовжніх хвиль 1,725.

Після коректування вихідних даних координати всіх подій, зареєстрованих трьома і більше станціями, було перераховано за вказаною вище програмою. Основні відомості глибинної будови земної кори під сейсмічними станціями отримано з даних ГСЗ. Було взято сейсмічні розрізи земної кори Чорного моря і Криму, що побудовані за даними систематичних досліджень методом ГСЗ з 1957 р. [4, 5], у 70-х роках — за даними профілів 29, 30 [6], доповненими результатами переінтерпретації [7] та локальної томографії [8].

На рис. 3 та 4 показано результати перерахунку, для яких похибки при визначенні глибини осередку не перевищують 5 км. Всього на рисунках представлено 1318 подій з 1470, які були зареєстровані трьома і більше станціями.

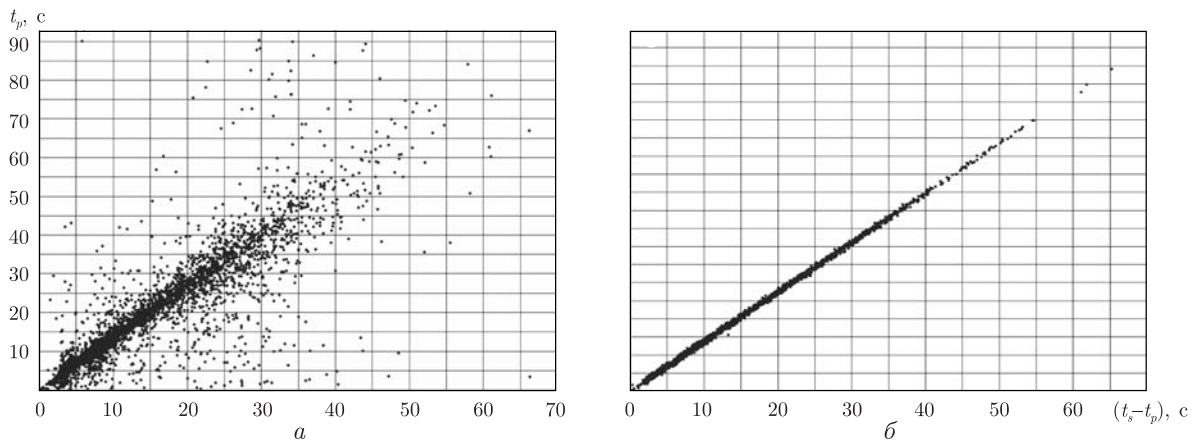


Рис. 2. Точки графіків Вадати: *a* — до корегування; *b* — після корегування

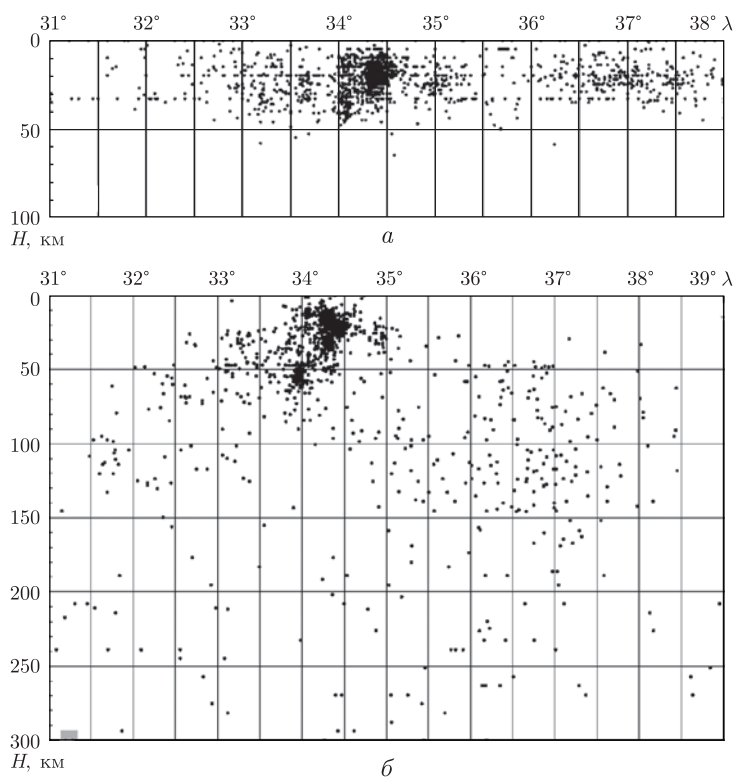


Рис. 3. Широтний розподіл гіпоцентрів землетрусів, зареєстрованих на кримських сеймостанціях за період з 1970 по 2012 рр. (по каталогу) по глибинах: *a* — до перерахунку; *b* — після перерахунку

Розподіл епіцентрів землетрусів у проекції гіпоцентрів на широтну площину до й після перерахування, показано на рис. 3; дані взято з кримських каталогів за 1970–2012 рр. З графіків видно, що глибини практично всіх гіпоцентрів лежать в інтервалі від 0 до 50 км. Розподіл епіцентрів землетрусів не сильно відрізняється від розподілу, збудованого за каталогом (див. рис. 4). Винятком є східна частина півострова, для якої, мабуть, з одного боку, в бюлетенях немає всіх даних, а з іншого — вихідні дані подані з великими похибками. Але для розподілу по глибинах відмінність є істотною. Якщо для каталожних подій глибини гі-

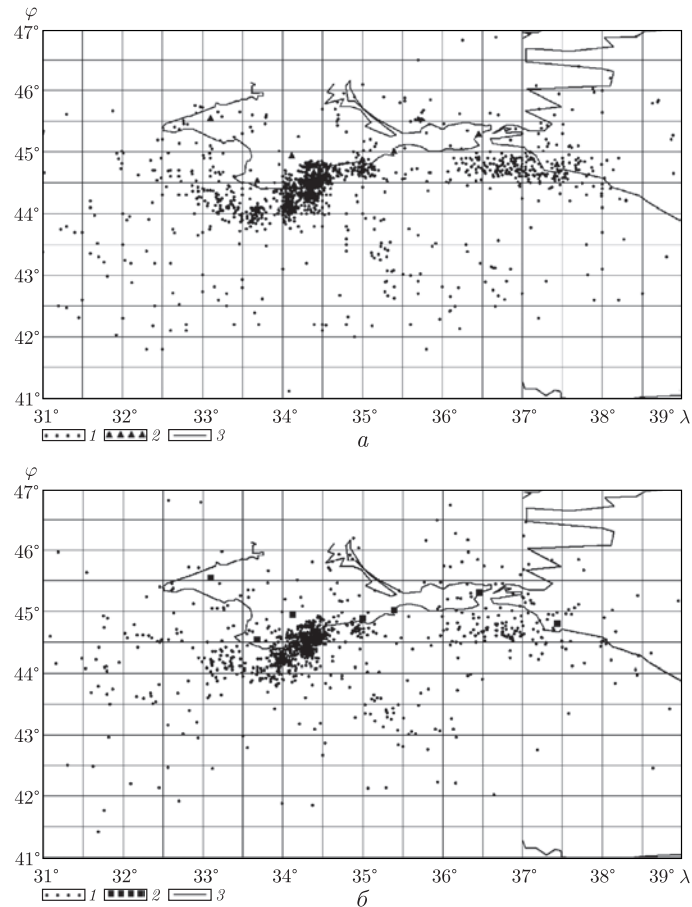


Рис. 4. Розподіл епіцентрів землетрусів, зареєстрованих на кримських сейсмічних станціях за період з 1970 по 2012 рр.: *а* – до перерахунку (1 – епіцентри землетрусів; 2 – сейсмічні станції; 3 – берегова лінія Криму); *б* – після перерахунку (1 – епіцентри землетрусів; 2 – сейсмічні станції; 3 – берегова лінія Криму)

поцентрів лежать в інтервалі від 0 до 50 км, то після перерахунку виявляється, що глибина гіпоцентрів не обмежується 50 км, а поширюється аж до 300 км. При цьому розподіл гіпоцентрів має конусоподібну форму з вершиною, що має координати:  $\varphi \approx 44,5^\circ$ ,  $\lambda \approx 34,5^\circ$ .

Таким чином, просторовий розподіл гіпоцентрів кримських землетрусів, отриманих за допомогою нового підходу, є таким: по-перше, більшість гіпоцентрів землетрусів лежить глибше 12 км, що відповідає 12-кілометровій границі під гірською частиною Криму; по-друге, практично нема осередків, які виходили б на поверхню; по-третє, розподіл гіпоцентрів землетрусів має конусоподібну форму з вершиною в районі Ялта–Алушта, а осередки землетрусів спостерігаються до глибин 300 км. Такий розподіл істотно змінює уявлення про геодинамічну картину Кримсько-Чорноморського регіону.

### Цитована література

1. Кульчицкий В. Е., Пустовитенко Б. Г. 80 лет инструментальным наблюдениям в Крыму: история, итоги и перспективы // Геофиз. журн. – 2008. – **30**, № 5. – С. 9–49.
2. Бурмин В. Ю. Новый подход к определению параметров гипоцентров близких землетрясений // Вулканонология и сейсмология. – 1992. – № 3. – С. 73–82.

3. *Burmin V. Y.* The inverse kinematic problem of seismology. New approaches and results. – Saarbrücken, Germany: Palmar. Acad. Publ. – 2012. – 146 с.
4. *Порфирьев В. Б., Соллогуб В. Б., Чекунов А. В., Гаркаленко И. А., Пустильников М. Р., Краюшкин В. А., Клочко В. Л., Семенов А. В., Шиманский А. А.* Структура и нефтегазоносность северной части Черного моря и сопредельных территорий. – Киев: Наук. думка, 1978. – 160 с.
5. *Буланже Ю. Д., Муратов М. В., Субботин С. И., Балавадзе В. К.* Земная кора и история развития Черноморской впадины. – Москва: Наука, 1975. – 357 с.
6. *Субботин С. И., Соллогуб В. Б., Лебедев Т. С., Харитонов О. М., Колосов А. Л.* Геофизические исследования территории Украины. – Киев: Наук. думка, 1972. – 253 с.
7. *Баранова Е. П., Егорова Т. П., Омельченко В. Д.* Переинтерпретация сейсмических материалов ГСЗ и гравитационное моделирование по профилям 25, 28, 29 в Черном и Азовском морях // Геофиз. журн. – 2008. – **30**, № 5. – С. 124–144.
8. *Гобаренко В. С., Егорова Т. П., Стифенсон Р.* Структура коры Керченского полуострова и северо-восточной части Черного моря по результатам локальной сейсмической томографии // Геофиз. журн. – 2014. – **36**, № 2. – С. 18–32.

## References

1. *Kulchytsky V. E., Pustovitenko B. G.* Geophys. J., 2008, **30**, No 5: 9–49 (in Russian).
2. *Burmin V. Y.* Volcanology and Seismology, 1992, No 3: 73–82 (in Russian).
3. *Burmin V. Y.* The inverse kinematic problem of seismology. New approaches and results. Saarbrücken, Germany: Palm. Acad. Publ., 2012.
4. *Porfiriev V. B., Sollogub V. B., Chekunov A. V., Garkalenko I. A., Pustilnikov M. R., Krayushkin V. A., Klochko V. L., Semenov A. V., Shymanskyi A. A.* Structure and oil and gas perspective of north part of the Black Sea and adjacent areas, Kyiv: Nauk. Dumka, 1978 (in Russian).
5. *Boulanger Y. D., Muratov M. V., Subbotin S. I., Balavadze V. K.* The earth's crust and the history of the development of the Black Sea basin, Moscow: Nauka, 1975 (in Russian).
6. *Subbotin S. I., Sollogub V. B., Lebedev T. S., Charitonov O. M., Kolosov A. L.* Geophysical studies of territory of Ukraine, Kiev: Nauk. Dumka, 1972 (in Russian).
7. *Baranova E. P., Egorova T. P., Omelchenko V. D.* Geophys. J., 2008, **30**, No 5: 124–144 (in Russian).
8. *Gobarenko V. S., Egorova T. P., Stevenson R.* Geophys. J., 2014, **36**, No 2: 18–32 (in Russian).

*Інститут фізики Землі  
ім. О. Ю. Шмідта РАН, Москва, Росія  
Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна,  
НАН України, Київ*

*Надійшло до редакції 24.04.2015*

**В. Ю. Бурмин, Л. А. Шумлянская**

## **Пространственное распределение гипоцентров землетрясений Крымско-Черноморского региона**

*Інститут фізики Землі ім. О. Ю. Шмідта РАН, Москва, Росія*

*Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ*

*На основе нового подхода к определению пространственного расположения гипоцентров землетрясений были пересмотрены координаты событий, представленных в бюллетенях Крымско-Черноморского региона за период с 1970 по 2012 гг. Получены следующие результаты: большинство гипоцентров землетрясений лежит глубже 12 км, что соответствует 12-километровой границе в горной части Крыма и практически нет очагов, которые выходили бы на поверхность; распределение гипоцентров землетрясений имеет форму, близкую к конусообразной с вершиной в районе Ялта-Алушта, а очаги землетрясений уходят до глубин 300 км. Такое распределение существенно меняет геодинамическую картину региона.*

**Ключевые слова:** сейсмичность, гипоцентры, землетрясение.

V. Y. Burmin, L. O. Shumlianska

## Spatial distribution of hypocenters of earthquakes of the Crimea-Black Sea region

O. Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

S. I. Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, Kiev

*On the basis of a new approach to the determination of the position of earthquake hypocenters, the coordinates of all events, for which data are presented in the bulletins of the Crimean-Black Sea region for the period from 1970 to 2012, are determined. The following results were obtained: first, the majority of earthquake hypocenters lie deeper 12 km, which corresponds to 12-km border under the mountainous part of the Crimea, and almost no hypocenters, which go to the surface. Second, the distribution of earthquake hypocenters is close to the conical shape with the apex near Yalta-Alushta and the earthquake sources go to depths of 300 km. Such distribution changes a view of the geodynamic picture of the region significantly.*

**Keywords:** seismicity, hypocenters, earthquake.