

Член-корреспондент НАН Украины А. В. Кендзера, А. Н. Островной,  
Т. А. Цветкова

## Землетрясения в зоне Вранча и мантийные сейсмические границы

*Используя трехмерную Р-скоростную модель мантии Европы были выделены сейсмические границы 2-го рода, связанные с изменением градиента скорости  $\partial v(x, y, z)/\partial z$  под зоной Вранча и сопредельными территориями. Также приводятся и интерпретируются статистические данные для очагов землетрясений зоны Вранча, представленные в бюллетенях International Seismologic Centre.*

**Ключевые слова:** сейсмотомография, зона Вранча, землетрясения, границы 2-го рода.

Начиная с 2009 г., в сейсмоактивной зоне Вранча, согласно бюллетенями Международного сейсмологического центра (International Seismologic Centre (ISC)), в среднем наблюдалось одно землетрясение каждых 52 ч. Что же является их причиной?

В научной публикации [1] установлен факт смещения земной коры в зоне Вранча со скоростью около 5–6 мм/год в горизонтальном направлении и 2–3 мм/год — в вертикальном. Сравнительно небольшая скорость деформации не позволяет считать, что причиной землетрясений являются подвижки наклонных слоев, так же как и процессы деламинации, выделенные в верхней мантии и связанные с коллизией Восточно-Европейской платформы и ее южного окружения [2, 3].

В настоящем сообщении использованы данные о землетрясениях в зоне Вранча, представленные в бюллетенях ISC и Гарвардского каталога сейсмических моментов землетрясений (CMT). Как следствие, определены наиболее сильные землетрясения зоны Вранча, произошедшие за период с 2000 по 2014 гг.

В табл. 1 представлено тридцать одно землетрясение магнитудой ( $M$ ) больше 5, для первых шести показаны нодальные плоскости из каталогов ISC и Гарвард СМТ.

За последние годы выполнено ряд исследований механизмов очагов землетрясений зоны Вранча [4–6].

Известно, что очаговая область зоны Вранча представляет собой субвертикальный блок литосферы, погружающийся на глубину до 180 км и более. Самые крупные очаги расположены в интервале глубин 80–160 км, занимая в плане площадь размером  $30 \times 60$  км [5].

В работе [5] были определены механизмы более 80 очагов землетрясений зоны Вранча за период с 1940 по 2010 год. Анализ результатов показал, что распределение механизмов слабых землетрясений является менее упорядоченным, поскольку сброс упругих напряжений в этом случае происходит на разломах более высокого порядка, хаотично расположенных в пространстве. Рассматривались землетрясения с магнитудами  $M \geq 5$ . Показано, что направления плоскостей разрыва изменяются с глубиной. В результате выделено три преобладающих направления: северо-запад–юго-восток, запад–восток, северо-восток–юго-запад, которые проявляются на различных глубинах.

Анализ количества землетрясений в зоне Вранча за период 2000–2014 гг. показал их циклическое изменение с периодом в три года, за исключением 2011–2012 гг., когда уменьше-

Таблица 1. Параметры землетрясений в зоне Вранча

| Дата       | Широта, град | Долгота, град | Глубина, км           | Магнитуда |
|------------|--------------|---------------|-----------------------|-----------|
| 30.11.2002 | 45,6906      | 26,5031       | 172,1                 | 5,0       |
| 14.05.2005 | 45,6888      | 26,4850       | 142,0                 | 5,0       |
| 25.04.2009 | 45,7039      | 26,5365       | 102,4                 | 5,3       |
| 06.10.2013 | 45,6810      | 26,5440       | 131,0                 | 5,4       |
| 22.11.2014 | 45,8900      | 27,1500       | 39,0                  | 5,5       |
|            |              |               | (NEIC)                |           |
| 27.10.2004 | 45,7774      | 26,5835       | 98,5                  | 5,9       |
|            |              |               | (Гарвард СМТ каталог) |           |
| 14.05.2005 | 45,6888      | 26,4850       | 142,0                 | 5,0       |
| 08.03.2000 | 45,8720      | 26,8250       | 27,4                  | 5,1       |
| 06.04.2000 | 45,7280      | 26,5780       | 136,8                 | 5,2       |
| 04.03.2001 | 45,4870      | 26,2570       | 146,6                 | 5,4       |
| 24.05.2001 | 45,6900      | 26,4190       | 142,4                 | 5,0       |
| 20.07.2001 | 45,7390      | 26,7080       | 127,1                 | 5,0       |
| 03.05.2002 | 45,6330      | 26,3320       | 158,0                 | 5,1       |
| 05.10.2003 | 45,6491      | 26,3173       | 151,6                 | 5,1       |
| 27.09.2004 | 45,6730      | 26,4285       | 151,3                 | 5,1       |
| 14.05.2005 | 45,6888      | 26,4850       | 142,0                 | 5,0       |
| 18.06.2005 | 45,7354      | 26,6777       | 137,6                 | 5,0       |
| 05.09.2005 | 45,6943      | 26,6444       | 90,0                  | 5,4       |
| 08.09.2005 | 45,5243      | 26,3568       | 140,2                 | 5,0       |
| 13.12.2005 | 45,7196      | 26,6254       | 134,5                 | 5,0       |
| 06.03.2006 | 45,7258      | 26,6130       | 140,9                 | 5,1       |
| 23.09.2006 | 45,5426      | 26,3885       | 124,3                 | 5,0       |
| 25.04.2009 | 45,7039      | 26,5365       | 102,4                 | 5,3       |
| 24.07.2009 | 45,7350      | 26,6014       | 140,4                 | 5,1       |
| 08.06.2010 | 45,6196      | 26,3787       | 114,9                 | 5,0       |
| 01.05.2011 | 45,6165      | 26,4154       | 140,5                 | 5,3       |
| 10.08.2011 | 45,7348      | 26,6651       | 150,8                 | 5,5       |
| 04.10.2011 | 45,5763      | 26,4578       | 135,6                 | 5,2       |
| 01.12.2012 | 45,7420      | 26,7210       | 80,0                  | 5,0       |
| 06.10.2013 | 45,6810      | 26,5440       | 131,0                 | 5,4       |
| 15.10.2013 | 45,6700      | 26,5700       | 132,0                 | 5,1       |
| 23.01.2014 | 45,5370      | 26,2720       | 137,0                 | 5,1       |

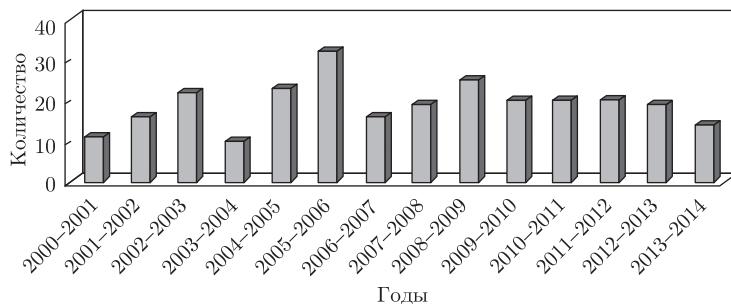


Рис. 1. Количество землетрясений в зоне Вранча с  $M \geq 4$  и глубинами очагов 0–220 км

ние количества событий не наблюдалось. Как следует из рис. 1, с 2000 по 2003 г. число землетрясений постоянно повышалось, при этом пик их количества приходится на 2002 г. Далее, в интервале 2003–2004 гг. происходило наименьшее число землетрясений за 14 лет: с 2000 по 2014 гг. После чего отмечено увеличение количества событий с пиком в 2005–2006 гг.,

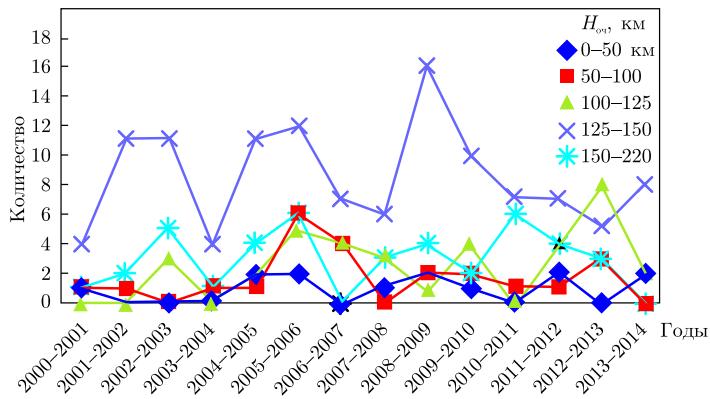


Рис. 2. Соотношение количества землетрясений с глубиной очагов

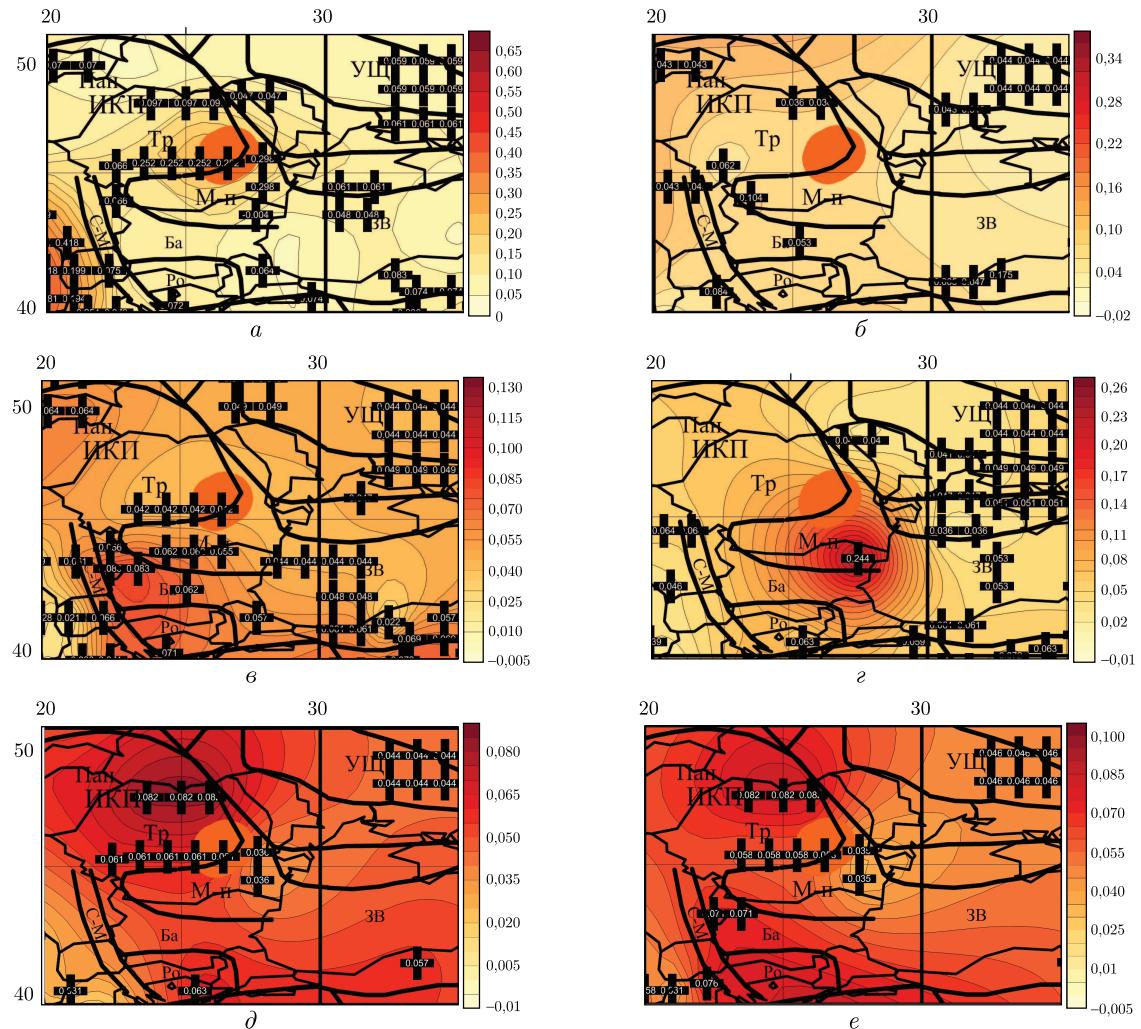


Рис. 4. Карты-схемы расположения мантийных сейсмических границ 2-го рода под зоной Вранча и со предельными территориями, связанные с изменением градиента скорости сейсмических волн на глубинах: 75 км (а), 100 км (б), 125 км (в), 150 км (г), 175 км (д), 200 км (е).

Обозначения: [+] — сейсмические границы 2-го рода; заливка цветом различной интенсивности соответствует значениям градиента скорости сейсмических волн (в 1/с)

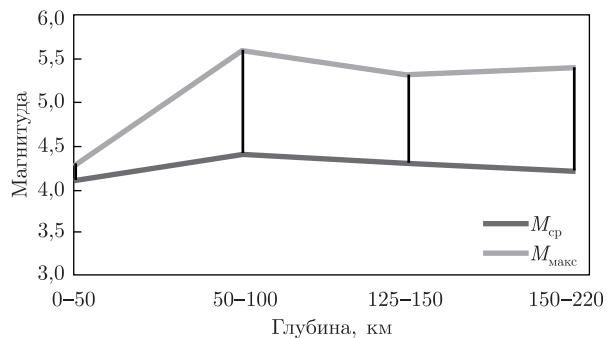


Рис. 3. Соотношение максимальной и средней магнитуды землетрясений с 2000 по 2014 гг. в интервале магнитуд  $0 \geq M \geq 4$

причем в этом интервале наблюдалось наибольшее число землетрясений, что компенсирует их дефицит в 2003 г.

В интервале 2006–2009 гг. происходит увеличение числа землетрясений и зафиксировано практически постоянное их количество на протяжении последующих трех лет (2009–2011 гг.) с убыванием в течение последних трех лет (2012–2014 гг.).

Большинство землетрясений с  $M \geq 5,0$  в зоне Вранча отмечалось на глубине 125–150 км, а меньше всего — на глубинах от 0 до 50 км (коровые) (рис. 2). Эти оценки совпадают с данными работы [5]. На глубинах 50–100 км зафиксированы землетрясения с большими значениями магнитуд при меньшем их количестве, чем на глубинах 125–150 км (рис. 3), где наблюдается максимальное количество сейсмических событий.

Анализ распределения землетрясений зоны Вранча за 2000–2014 гг. по глубине и магнитудных оценках проведен на основании данных 289 очагов с  $M \geq 4$  и глубинами очага 0–220 км. Из них 27 очагов с  $M \geq 5$  распределены по глубинам следующим образом: 1-й очаг зафиксирован в интервале глубин 0–50 км, 3-й — в интервале 50–100 км, 18-й — в интервале 100–150 км, 5-й — в интервале 150–175 км. Результаты согласуются с распределением, полученным в работе [5], согласно которому 72% из 80 наиболее сильных очагов приходится на глубинах 130–160 км.

Трехмерная  $P$ -скоростная модель мантии зоны Вранча [2] в контексте трехмерной  $P$ -скоростной модели мантии Европы позволила построить сейсмические границы 2-го рода, связанные с изменением градиента скорости  $\partial v(x, y, z)/\partial z$  (рис. 4).

Анализ рис. 4 позволил выделить в окружении зоны Вранча ряд сейсмических границ II рода, представленных в табл. 2, которые наблюдаются на различных глубинах.

Таблица 2. Сейсмические границы 2-рода зоны Вранча и ее окружения

| Глубина, км  | Координаты выделяемых границ                                 | Тектоническая область  |
|--------------|--|--|
| 75, 125, 175 | (23,5–26,5) $^{\circ}$ в. д. $\times$ 45,35 $^{\circ}$ с. ш. | Южно-Карпатский разлом   |
| 75, 175, 200 | (23,75–26) $^{\circ}$ в. д. $\times$ 47,5 $^{\circ}$ с. ш.   | Восточные Карпаты, Закарпатский внутренний прогиб, Трансильванская впадина |
| 75, 150      | (26,5–28) $^{\circ}$ в. д. $\times$ 47,5 $^{\circ}$ с. ш.    | Предкарпатский прогиб, склон ВЕП   |
| 100, 225     | 23,5 $^{\circ}$ в. д. $\times$ 44,1 $^{\circ}$ с. ш.         | Южные Карпаты, Дунайская зона, Предкарпатский прогиб                       |
| 75, 175, 200 | 27,75 $^{\circ}$ в. д. $\times$ (44,5–45,5) $^{\circ}$ с. ш. | Мизийская плита  |
| 125          | (24,5–26,5) $^{\circ}$ в. д. $\times$ 44,5 $^{\circ}$ с. ш.  | Мизийская плита  |

Наиболее резкое изменение градиентов соответствует границам 75 км, 125 км, 175–200 км. Вдоль выделенных границ происходит изменение энергии. Проанализированные данные показывают также, что общее количество сейсмических событий в зоне Вранча не увеличивается, по сравнению с предыдущими годами (2010–2014), но их магнитуда растет, что может свидетельствовать об увеличении активизации зоны и подготовке в ней крупных землетрясений.

## Цитированная литература

1. Zoran M. Integrated satellite, GPS and geophysical data for seismic hazard assessment in Vrancea area, Romania // Processing of FRINGE 2007. – Workshop, 26–30 Nov., 2007. – ESA SP. ISSN 1609–042X. – Noordwijk, 2008. – № 649. – P. 292–297.
2. Старostenко В. И., Кендзера А. В., Цветкова Т. А., Бугаенко И. В. Промежуточные землетрясения зоны Вранча и скоростное строение мантии Восточной Европы // Геофиз. журн. – 2013. – № 3. – С. 31–45.
3. Лыскова Е. Л., Яновская Т. Б. Скоростное строение верхней мантии в области зоны Вранча по данным шумовой поверхности-волновой томографии // Вопросы геофизики. – 2013. – Вып. 46. – С. 3–13.
4. Гинтов О. Б., Корчемагин В. А., Сим Л. А. Украинские Карпаты и Горный Крым – сходство и различие кинематических характеристик тектонических движений (тектонофизический анализ) // Геофиз. журн. – 2002. – № 24. – С. 75–92.
5. Степаненко Н. Я., Симонова Н. А., Карданец В. Ю. Пространственные вариации осей главных напряжений в очагах землетрясений области Вранча. Сейсмологический бюллетень за 2012 г. – 2013. – С. 46–56.
6. Уломов В. И. Прогноз сейсмических проявлений в Москве при землетрясениях в зоне Вранча // Физика Земли. – 2010. – № 1. – С. 3–20.

## References

1. Zoran M. Integrated satellite, GPS and geophysical data for seismic hazard assessment in Vrancea area. Romania: Proc. of FRINGE 2007 Workshop, 26–30 Nov., 2007. ESA SP. ISSN 1609–042X, Noordwijk, 2008, No 649.
2. Starostenko V. I., Kendzera A. V., Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V. Geophys. J., 2013, **35**, No 3: 31–45 (in Russian).
3. Liskova E. L., Yanovsky T. B., Quest. geophys., 2013, No 46: 3–13 (in Russian).
4. Gintov O. B., Korchemagin V. A., Sim L. A. Geophys. J., 2002. **24**, No 6: 75–92 (in Russian).
5. Stepanenko N. Y., Simonov N. A., Kardanets V. Y. Seismol. Bull. per 2012–2013: 46–56 (in Russian).
6. Uломов V.I., Phys. of the Earth, 2010, No 1: 3–20 (in Russian).

Інститут геофізики ім. С. І. Субботина  
НАН України, Київ

Поступило в редакцію 04.06.2015

Член-кореспондент НАН України О. В. Кендзера, О. М. Острівний,  
Т. О. Цветкова

Землетруси у зоні Вранча та мантійні сейсмічні граници

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

Використовуючи тривимірну  $P$ -швидкісну модель мантиї Європи було виділено сейсмічні граници 2-го роду, пов’язані зі зміною градієнта  $\partial v(x, y, z)/\partial z$  під зоною Вранча і суміжними територіями. Також наведено та інтерпретовано статистичні дані для всіх землетрусів зони Вранча, що представлені в бюллетенях International Seismological Centre.

**Ключові слова:** сейсмотомографія, зона Вранча, землетруси, граници 2-го роду.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. V. Kendzera, A. N. Ostrovnoy, T. A. Tsvetkova**

## **Earthquakes in the Vrancea zone and mantle seismic boundaries**

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

*2nd sort seismic boundaries are separated, by using the three-dimensional P-velocity model of the Europe mantle. These boundaries are related to changes in the velocity gradient  $\partial v(x, y, z)/\partial z$  under the Vrancea area and adjacent territories. Statistics of the data for the Vrancea area earthquake foci presented in bulletins of the International Seismologic Centre are presented and interpreted.*

**Keywords:** seismotomography, mantle, Vrancea zone, earthquakes, boundaries of the second generation.