

Промежуточные землетрясения зоны Вранча и скоростное строение мантии Восточной Европы

© В. И. Старостенко, А. В. Кендзера, Т. А. Цветкова,
И. В. Бугаенко, 2013

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 22 августа 2011 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

На основе тривимірної P -швидкісної моделі мантиї до глибини 850 км наведено нові дані щодо можливого зв'язку проміжних землетрусів зони Вранча зі швидкісною будовою мантиї не тільки найближчого оточення (зону Вранча показано як контактну примежеву частину), а й більшого простору (показано зв'язок зони Вранча зі швидкісною будовою мантиї Афро-Аравійської, Східноєвропейської платформ, Адриатичної мікроплити і Скіфсько-Туранської плити).

New data on the possible relationship of intermediate earthquakes of the Vrancea zone with the velocity structure of the mantle based on a three-dimensional P -velocity model of the mantle up to a depth of 850 km, have been given in the paper not only for the immediate environment (Vrancea area has been shown as the contact boundary region), but also for the wider region (the relationship of the Vrancea zone with the velocity structure of the mantle of the Afro-Arabian, East European platforms, the Adriatic microplate and the Scythian-Turan plate have been shown).

Введение. В течение последних десятилетий наблюдается общее повышение сейсмической активности Земли. Землетрясения Суматры, Чили, Новой Зеландии, Японии с новой силой поставили вопрос о возможностях предсказания землетрясений-катастроф. Оптимистичные представления о возможности предсказания землетрясений 1970—1980 гг. прошлого века сменились концепцией о принципиальной непредсказуемости последних. Такая позиция в свою очередь сменилась противоположной, построенной на статистических оценках результатов, полученных по различным алгоритмам прогноза.

Обзор работ, соответствующих этому подходу, можно найти в работах [Писаренко, Родкин, 2007; Родкин и др., 2009; Латынина, 2010]. Его развитие непосредственно связывается с современной аксиоматикой геофизической среды. В ее основе лежит переход от сплошной (непрерывной) среды к дискретной, наиболее четко представленный в работах М. А. Садовско-

го и его школы, согласно которой геофизическая среда является открытой, диссипативной, самоорганизующейся, блоково-иерархической средой [Садовский, 2004].

В силу открытости системы при достижении предела энергетической прочности и переходе через него энергетически насыщенные блоки приходят в состояние неустойчивости. "Критичность" указывает на такую неустойчивость сейсмического процесса, когда даже незначительное добавочное воздействие способно вызвать максимальное землетрясение для данного региона. Согласно теории самоорганизованной критичности, многие составные системы естественным образом эволюционируют к критическому состоянию, в котором малое событие вызывает цепную реакцию, которая, в свою очередь, может повлиять на любое число элементов системы.

Следствием определения нелинейной геофизической среды как открытой, неравновесной, диссипативной, блочно-иерархической яв-

ляется представление о землетрясении, как о скачкообразном переходе среды из метастабильного состояния в стабильное. Нас будут интересовать области возможной неустойчивости среды, окружающей область очага землетрясения, проявляющиеся в особенностях скоростного строения мантии области землетрясения и ее не только ближнего, но и дальнего окружения. Процессы неустойчивости в таких областях могут служить спусковым механизмом, приводящим к срыву.

Исходя из анализа полученной 3D P -скоростной модели среды, необходимо выделить мантийные скоростные неоднородности, определяющие процессы неустойчивости, возможные триггерные механизмы, следствием которых являются землетрясения области Вранча. При этом возможная физика процесса не обсуждается.

Изученность зоны Вранча. Сейсмически активная зона Вранча в Румынии находится на стыке Восточных и Южных Карпат. Эпицентры промежуточных землетрясений зоны в плане ограничены областью 40×80 км, глубина 70—180 км (максимум 220 км [Oncescu, Bonjer, 1997]), сейсмофокальная зона имеет крутое северо-западное падение. Детально структура сейсмоактивной зоны Вранча описана в работе [Сагалова, 1975]. Зона расположена на сочленении (рис. 1) трех разновозрастных структур: раннего протерозоя, позднего палеозоя и мезокайнозоя [Artemieva et al., 2006]. Подобное деление на три части в данной области наблюдается и по температуре мантии на глубине 100 км [Goes et al., 2000], вычисленной по данным региональной S -скоростной модели мантии [Marquering, Snieder, 1996]. Зона находится в области контрастных движений, возникшей на границе поднимающейся системы Карпат и опускающегося Предкарпатского прогиба. По данным о современных вертикальных движениях наблюдающиеся скорости поднятия — 4—5 мм/год, опускания — 0,5 мм/год [Ризниченко, 1985].

Изучение механизмов очагов [Ризниченко, 1985; Пустовитенко и др., 2004] показало два основных простирания плоскостей разрыва: северо-восточное—юго-западное с падением к северо-западу и северо-западное—юго-восточное с падением на юго-запад.

В XX в. в зоне Вранча происходили землетрясения с магнитудой более 6,5 в 1940, 1977, 1986 и 1990 гг., которые ощущались на огромной территории. Повышенный интерес к землетрясениям этой зоны определяется, прежде всего, высокой сейсмической опасностью. Издан ряд научных сборников [Карпатское ..., 1990;

The natural ..., 2002] и отдельных статей, посвященных проблематике зоны. Детальное описание геологического строения зоны Вранча дано в работах [Шукин, Добрев, 1980; Чекунов, 1986, 1987]. Глубинное строение зоны Вранча изучалось вдоль геотраверса V (литосферный трансект Вранча — Южно-Украинская АЭС) [Соллогуб и др., 1985; Чекунов, 1987; Харитонов и др., 1993], при этом зона Вранча относилась к глубинному разлому и области пониженных скорости и плотности на глубине 90—180 км. А. В. Чекунов предполагал, что причиной появления области пониженных скоростей был Паннонский астенолит, приведший к поднятию в зоне Вранча расплавленного материала и перемещению его на восток до Крыма по ослабленной зоне (зона пониженных скоростей) на глубине 60—100 км [Чекунов, 1987]. В работе [Винник, 1980] фокальная зона Вранча располагается в высокоскоростном блоке вблизи контакта с низкоскоростным блоком.

В 1999 г. в Румынии был проведен эксперимент CALIXTO (Carpathian Arc Litosphere X-Tomography), по данным которого были выполнены томографические работы [Weidle et al., 2005; Martin et al., 2005, 2006]. По данным [Martin et al., 2006] в зоне Вранча путем пересчета была получена низкотемпературная область с отклонением до -200° [Ismail-Zadeh et al., 2008]. Через зону Вранча в Румынии отрабатывались сейсмические профили по рефрагированным волнам VRANCEA 99 [Hauser et al., 2001] и VRANCEA 2001 [Landes et al., 2004; Hauser et al., 2007]. По результатам профилирования и эксперимента CALIXTO, на глубине 45—180 выделена область юго-восточного—северо-западного направления с пониженными значениями V_P / V_S , интерпретируемая как океанический слэб [Tondi et al., 2009].

Переходя к представлению сейсмотомографических результатов, следует отметить, что понятие высоких и низких скоростей определяется по отношению к заданной референтной модели, которая в каждом конкретном случае может быть своя. Полученные сейсмотомографические модели, включающие зону Вранча, представлены тремя группами.

1. Глобальные модели [Aki et al., 1977; Kennett et al., 1995; Bijwaard et al., 1998; Bijwaard, Spakman, 2000].
2. Региональные (область Средиземноморья) модели: P -скоростная модель мантии [Spakman et al., 1993; De Jonge et al., 1994; Wortel, Spakman, 2000; Piromallo, Morelli, 2003], S -скоростная модель [Zielhuis, Nolet, 1994; Marqu-

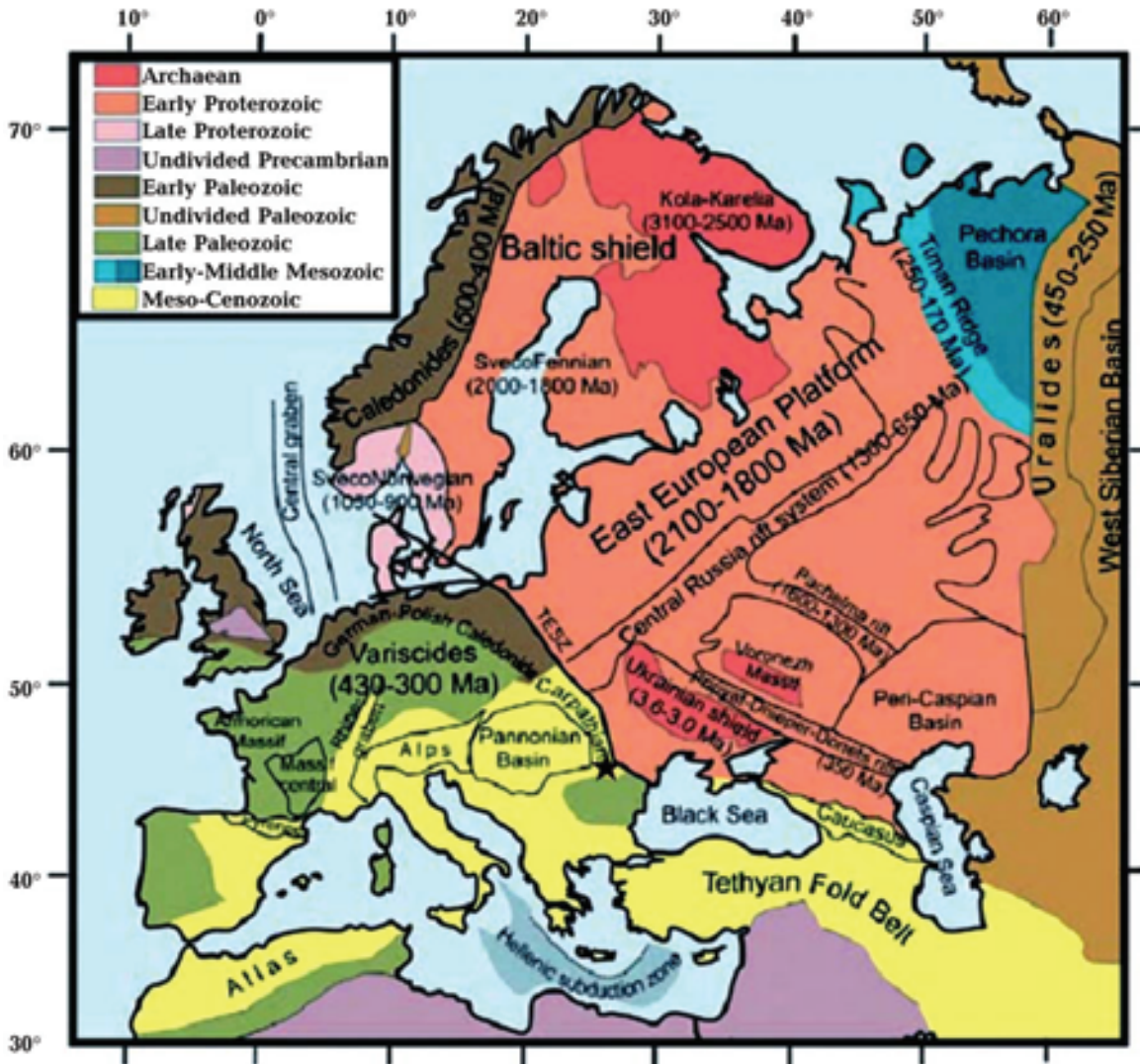


Рис. 1. Возраст структур Европы [Artemieva et al., 2006]. Зона Вранча выделена звездочкой.

ering, Snieder, 1996], *P*- и *S*-скоростная модель [Koulakov et al., 2009 и др.].

3. Локальные (область Вранча) модели [Onescu, 1984; Onescu et al., 1984; Koch, 1985; Lorenz et al., 1997; Fan et al., 1998; Wenzel et al., 2002; Weidle et al., 2005; Martin et al., 2005, 2006; Tondi et al., 2009; Koulakov et al., 2010].

В различных томографических моделях зона Вранча относится к высокоскоростной области мантии, в которой происходят промежуточные землетрясения. Выше нее находятся области с пониженными относительно заданной референтной модели скоростями. В томографической модели [Wortel, Spakman, 2000] зона Вранча расположена на глубине от 60 до 350 км, в модели [Aki et al., 1977] — до 236 км, в модели [Spakman et al., 1993; De Jonge et al., 1994]

— от 100 до 400 км, в модели [Piromallo, Morelli, 2003] — от 100 до 300 км, в модели [Weidle et al., 2005, 2006] — до 370 км, в модели [Koulakov et al., 2010] — до 180 км. В *P*-скоростных моделях [Onescu, 1984; Onescu et al., 1984; Koch, 1985] выделяют высокоскоростное тело на глубине 80—160 км. В томографической *P*- и *S*-скоростной модели [Fan et al., 1998] высокоскоростное тело, выделенное на глубине 100—170 км, интерпретируется как "холодный слэб".

В телесеismicческой томографической модели [Lorenz et al., 1997; Wenzel et al., 2002] выделяют высокоскоростную область на глубине 70—350 км. До глубины 200 км она имеет северо-западное направление, глубже — северное. В модели [Martin et al., 2006] глубине 70—200 км

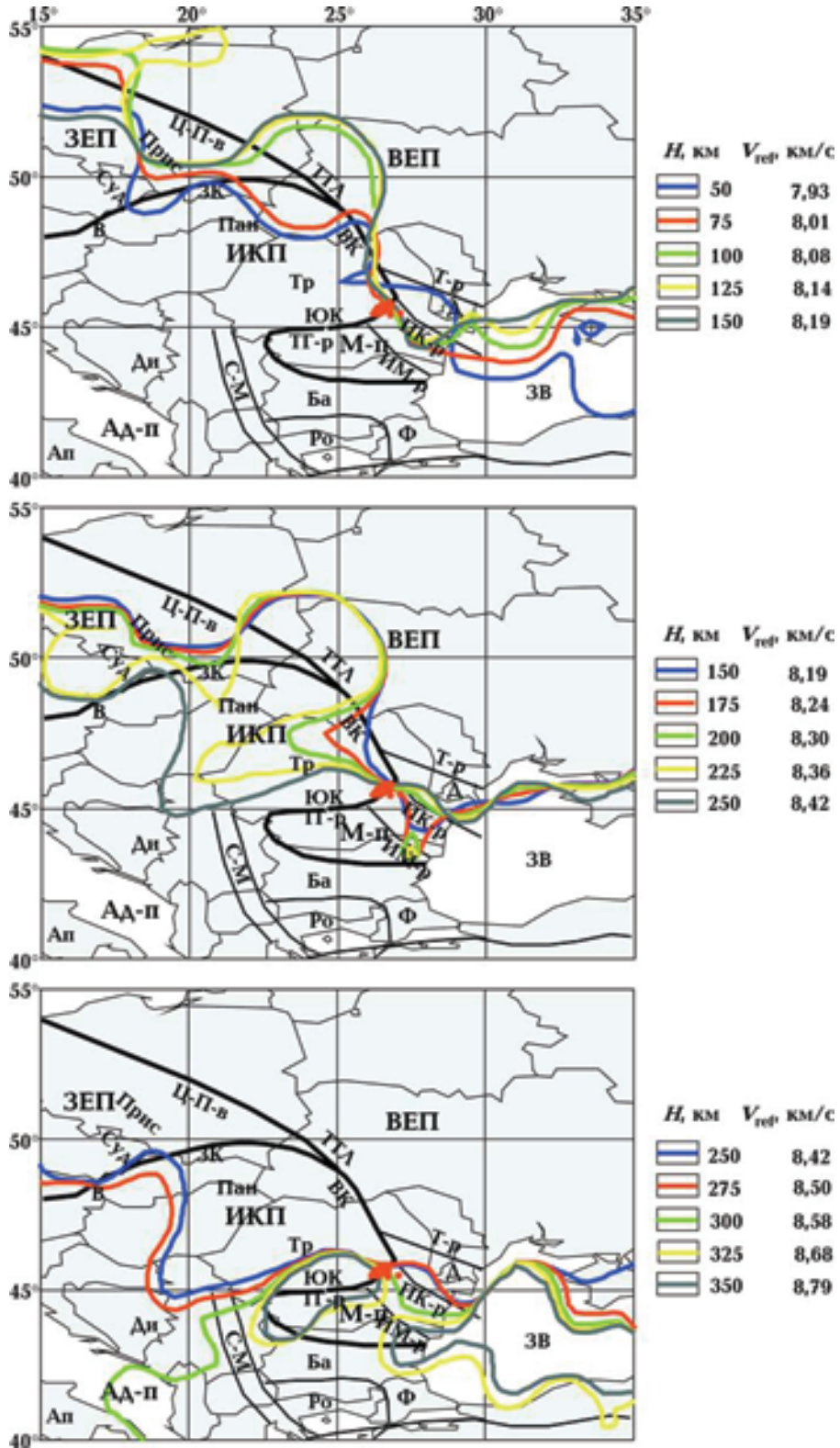


Рис. 3. Граница между высокими и низкими скоростями исследуемой территории на глубине 50—350 км: красным цветом вынесена проекция промежуточных землетрясений зоны Вранча с магнитудой более 4,5 за период с 1973 по 2010 г. [Restangular ..., 2010].

также выделяется высокоскоростная область северо-западного направления, ниже до 370 км — северного.

Подводя итог приведенному обзору сейсмических и сейсмотомографических работ, касающихся зоны Вранча, в качестве результата можно отметить выделение в верхней мантии под зоной Вранча высокоскоростной области, имеющей в различных моделях различную глубину и конфигурацию.

Выделенную высокоскоростную область в основном интерпретируют как оторвавшийся во время палеосубдукции слэб, по-разному истолковывая его происхождение. В работах [Wortel, Spakman, 2000; Sperner et al., 2001] область представляют как оторвавшийся в миоцене со стороны Восточно-Европейской платформы (ВЕП) во время палеосубдукции слэб с ориентацией северо-запад—юго-восток, в работах [Fan et al., 1998; Mason et al., 1998; Koulakov et al., 2010] выдвинуто предположение, что данный слэб оторвался от Мизийской платформы. Существует гипотеза, что данная высокоскоростная область связана не с палеосубдукцией, а с разуплотнением коры и опусканием тяжелого материала в мантию (деламинация) [Girbacea, Frisch, 1998; Knapp et al., 2005; Трифонов и др., 2010]. В работе [Шевченко и др., 2011] предполагается, что промежуточные землетрясения возникают вследствие восходящей миграции глубоких флюидов.

С тектонической точки зрения зону Вранча рассматривают как нестабильную зону тройного сочленения [Besutio, Cadicheanu, 2002; Zugravescu, Polonic, 2002; Besutio, Zugravesku, 2002; Besutio, 2002], расположенную между тремя тектоническими плитами (субплитами): Восточно-Европейской платформой, Мизийской платформой и Интра-Карпатской субплитой (включающей Паннонскую впадину, Трансильванскую впадину, Западные, Восточные и Южные Карпаты). Данные плиты (субплиты) отделены друг от друга системой главных разломов: зоной Тейсейра — Торнквиста (разделяющей Восточно-Европейскую платформу и Интра-Карпатскую субплиту), разломом Транс-Гетика (разделяющим Мизийскую платформу и Интра-Карпатскую субплиту) и разломом Печеняга-Камена (разделяющим Мизийскую платформу и Добруджу) (рис. 2).

Результаты сейсмотомографических исследований Института геофизики НАН Украины. При сейсмотомографическом изучении скоростного строения мантии под зоной Вранча и его соотношения с проявлением зем-

летрясений традиционно не рассматривается вопрос о том, какие эндогенные факторы могут служить причиной и спусковым механизмом происходящих землетрясений. В общем случае этот вопрос очень сложен, прежде всего, в силу открытости структур, имеющих отношение к мантии под областью Вранча и ее окружением. В то же время анализ результатов сейсмической томографии мантии под Европой [Гейко и др., 2005, 2007; Цветкова, Бугаенко, 2012] позволяют сделать определенные выводы. Рассмотрим более детально особенности скоростного строения мантии в широкой области вокруг очаговой зоны Вранча, учитывая в первую очередь современные представления тектоники плит. Причиной такого рассмотрения является известное положение о том, что зоны подготовки землетрясений могут быть существенно обширнее, чем очаговая зона.

Трехмерная P -скоростная модель верхней мантии под областью Вранча и ее окружением получена методом Тейлорового приближения [Geuko, 2004] в контексте 3D P -скоростной модели мантии под Евразией. Решение может быть представлено как в сферической, так и в декартовой системе координат, не зависит от выбора начального приближения (референтной модели) и представляет более точное приближение нелинейности по отношению к классической линеаризации [Geuko, 2004].

Модель рассмотрена в декартовой системе координат для глубин до 850 км в виде горизонтальных сечений в истинных скоростях $V(\varphi, \lambda, z)$ с шагом 25 км и вертикальных сечений в виде невязок скорости относительно обобщенной модели средней скорости. Обобщенная модель средней скорости получена как результат решения задачи сейсмической томографии для мантии под территорией Евразии и ее окружением. Относительно обобщенной модели средней скорости, согласно невязкам скорости δ , выделяются области повышенных и пониженных скоростей:

$$\delta = V(\varphi, \lambda, z) - V_{\text{aver}}(z), \quad \varphi, \lambda \in S,$$

где $S(z)$ — сечение области обобщения на глубине z . В дальнейшем будем обозначать $V_{\text{aver}}(z)$ как $V_{\text{ref}}(z)$.

Результатом решения задач сейсмической томографии является модель, оптимальная в пределах принятых физико-математических представлений. Последние включают: аксиоматику, теорию метода, принятую параметризацию среды, численные методы решения задачи, аппроксимирующие методы, графические методы и т. д.

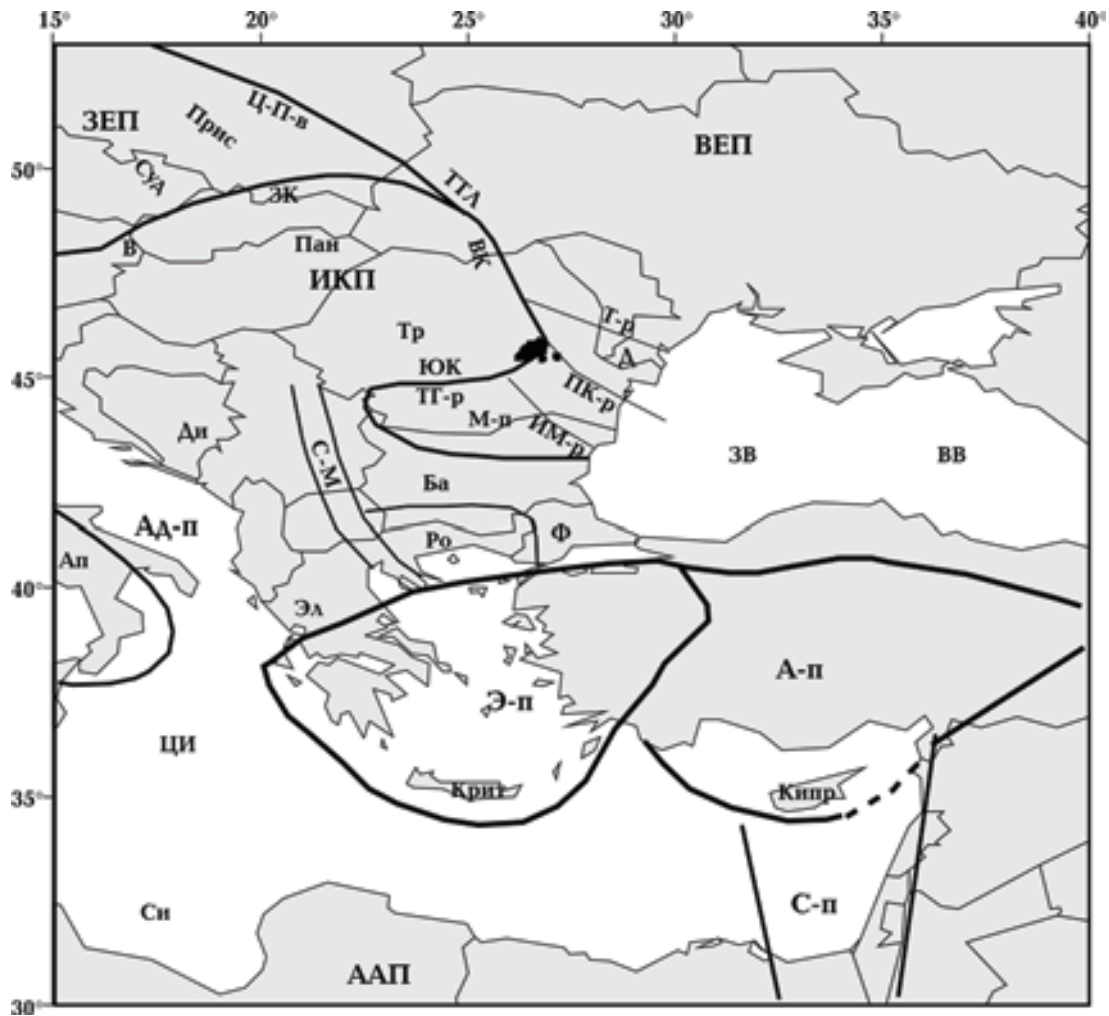


Рис. 2. Тектоническая схема, по [Хаин, 1984, 2001; Богданов и др., 1994; Zugravescu, Polonic, 2002; Vesutiu, 2002], упрощенно. Вынесены гипоцентры землетрясений зоны Вранча (черные кружочки) с магнитудой более 4,5 за период с 1973 по 2010 г. [Restangular ..., 2010]. ААП — Афро-Аравийская платформа, А-п — Анатолийская микроплита, Ад-п — Адриатическая плита, Ап — Апеннины, Ба — Балканиды, В — Венская впадина, ВВ — Восточная впадина Черного моря, ВЕП — Восточно-Европейская платформа, ВК — Восточные Карпаты, Д — Добруджа, Ди — Динариды, ЗЕП — Западно-Европейская платформа, ИКП — Интра-Карпатская субплита, ИМ-р — Интра-Мизийский разлом, ЗВ — Западная впадина Черного моря, ЗК — Западные Карпаты, М-п — Мизийская платформа, Э-п — Эгейская микроплита, Эл — Эллиниды, Пан — Паннонская впадина, ПК-р — разлом Печеняга-Камена, Прис — Присудетская моноклинал, Ро — Родопы, С-М — Сербско-Македонский массив, С-п — Синайская субплита, Си — впадина Сидра, Суд — Судеты, ТГ-р — разлом Транс-Гетика, ТТЛ — линия Тейссейра — Торнквиста, Тр — Трансильванская впадина, Т-р — разлом Тротус, Ф — Фракийская впадина, Ц П-в — Центрально-Польский вал, ЮК — Южные Карпаты, ЦИ — Центрально-Ионическая впадина.

В работе [Цветкова, Бугаенко, 2012] на основе полученной 3D P -скоростной модели мантии под Евразией были представлены мантийные скоростные пограничные изолинии ВЕП. На фиксированной глубине $z \in (0, H)$ последняя определена как изолиния, соответствующая нулевой невязке: $V - V_{\text{ref}}(z) = 0$ для всех φ, λ , принадлежащих данному сечению $S(\varphi, \lambda)$.

Она отвечает переходу от области с повышенными скоростями к области с пониженными скоростями, либо наоборот (относительно обобщенной средней скорости). Таким образом, для заданной глубины мантийная скоростная пограничная изолиния является локальным экстремумом по (φ, λ) для функции невязки скорости: $V(\varphi, \lambda, z) \rightarrow V_{\text{ref}}(z)$. Полученные мантий-

ные скоростные пограничные изолинии ($z \in (0, H)$) в совокупности соответствуют мантийной скоростной границе, которая, в свою очередь, не всегда соответствует тектонической границе ВЕП, но в то же время четко отделяет высокоскоростные области от низкоскоростных. Последовательность мантийных скоростных пограничных изолиний хорошо отражает изменение мантийной скоростной границы с глубиной (рис. 3, см. с. 34).

При изучении мантии под регионом Вранча в основном рассмотрена юго-западная часть мантийной скоростной границы ВЕП. На рис. 3 показано, что на глубинах верхней мантии (50—150, 150—250, 250—350 км) направление пограничных изолиний не постоянно и изменяется с глубиной. Общее направление пограничных скоростных изолиний в верхней мантии — северо-запад — юго-восток, при этом на интересующих нас глубинах возникновения очагов землетрясений в пределах области ($20\text{—}27^\circ$ в. д.) \times ($45\text{—}52^\circ$ с. ш.) изолинии смещаются с глубиной как в северо-восточном, так и в юго-западном направлении.

На фоне изменяющейся с глубиной верхнемантийной скоростной границы между ВЕП и ее южным окружением в зоне Вранча на глубине 75—300 км (в пределах разрешающей способности метода $0,5^\circ \times 0,5^\circ \times 25$ км [Гейко и др., 1998]) выделяется субвертикальная скоростная граница. Последняя отражается прохождением через точку (φ, λ, z), $z \in (75\text{—}300$ км) всех мантийных пограничных скоростных изолиний. Здесь $\varphi = 45,5 \pm 0,5^\circ$ с. ш., $\lambda = 26,5 \pm 0,5^\circ$ в. д. Следствием этого является выполнение для зоны Вранча и заданного интервала глубин в пределах разрешающей способности следующих равенств:

$$\partial(V - V_{\text{реф}}) / \partial x = 0,$$

$$\partial(V - V_{\text{реф}}) / \partial y = 0.$$

Следовательно, в мантии под зоной Вранча располагается субвертикальная пограничная область, неустойчивая в пределах данной модели.

На рис. 4 представлены широтные и долготные сечения исследуемой территории. Видно, что верхняя мантия ВЕП характеризуется высокими скоростями, а переходная зона верхней мантии — низкими. Южное окружение ВЕП обладает инверсными скоростными характеристиками. Промежуточные землетрясения зоны Вранча приурочены к контакту выступа высокоскоростного наклонного слоя на глубине

от 75—225 км с низкоскоростным окружением. Контактная область сформирована в результате смещения пограничной высокоскоростной области в пределы низкоскоростной и перекрыта сверху низкоскоростным слоем.

Восточнее зоны Вранча ($27\text{—}29^\circ$ в. д.) со стороны ВЕП наблюдается высокоскоростной наклонный слой, который распространяется в южном направлении в высокоскоростную переходную зону верхней мантии южного окружения ВЕП.

На рис. 5 показана проекция на земную поверхность высокоскоростного выступа, построенная на основании вертикальных сечений. Данная высокоскоростная область вытянута в северо-западном направлении и расположена под северной частью Мизийской платформы между Печеняга-Камена и Интра-Мизийским разломами (за исключением небольшой области, расположенной под юго-западной частью Добруджи). Проекция промежуточных землетрясений зоны Вранча с магнитудой более 4,5 наблюдается по границе этой области. Региональные векторы напряжений [Besutio, Cadiceanu, 2002; Zugravescu, Polonic, 2002; Besutio, 2002] также показывают северо-западное направление между этими разломами.

Расширим область изучения, включая в исследование скоростное строение мантии всего Альпийского пояса Восточного Средиземноморья и ВЕП, Афро-Аравийской платформы, Адриатической микроплиты. Скоростные характеристики мантии данных структур, согласно рассматриваемой модели, были описаны в работах [Гейко и др., 2005, 2007; Бугаенко и др., 2008; Цветкова и др., 2009; Старостенко и др., 2011]. Остановимся на общих характеристиках верхней мантии: мантийные структуры Восточного Средиземноморья обладают низкоскоростной верхней мантией и находятся между высокоскоростными мантийными структурами ВЕП, Афро-Аравийской платформы и более высокоскоростными на общем низкоскоростном фоне мантийными структурами Адриатической микроплиты (рис. 6).

Мантия под Адриатической микроплитой делится на две части [Старостенко и др., 2011]. Ее южная часть, более высокоскоростная на низкоскоростном фоне, с глубиной распространяется на восток и юго-восток в мантию под мантийные структуры Восточного Средиземноморья (Эллиниды и Динариды). С юга наблюдается наклонный слой, распространяющийся со стороны Афро-Аравийской платформы под Эгейскую микроплиту (Эгейская зона субдук-

ции), а с севера, как было указано ранее, — встречное распространение высокоскоростного слоя с ВЕП (рис. 7, сечение 27° в. д.).

На рис. 7 (сечение 45° с. ш.) представлен высокоскоростной наклонный слой, погружающийся со стороны Скифско-Туранской плиты в западном направлении до Центрально-Черноморского поднятия и далее до высокоскоростной переходной зоны верхней мантии под Западно-Черноморской впадиной, откуда трассируется в мантию под зоной Вранча. Подвижки выделенного наклонного слоя могут влиять на мантийную неустойчивость в зоне Вранча.

На рис. 8 показана глубина залегания подошвы низкоскоростного слоя верхней мантии. По глубине залегания подошвы выделяются три "блока" (обозначены коричневым цветом), сходящихся в районе мантии под зоной Вранча: Южно-Адриатический, Черноморский, Эгейский.

Южно-Адриатический блок прослеживается со стороны южной части Адриатической микроплиты и имеет северо-восточное направление и глубину подошвы 300—375 км. Он включает в себя южную часть Адриатической микроплиты, Эллиниды, Сербо-Македонский массив, западные части Балканид и Мизийской платформы, а также Южные Карпаты. В мантии под Сербо-Македонским массивом наблюдается подъем глубины подошвы до 275 км.

Черноморский блок западно-северо-западного направления выделяется со стороны Черного моря (300—475 км) и включает в себя южную часть Восточно-Черноморской впадины, Центрально-Черноморское поднятие, Западно-Черноморскую впадину, восточные части Мизийской платформы и Балканид.

Эгейский блок расположен между двумя вышеописанными блоками, имеет субмеридиональное направление и самую малую глубину залегания подошвы (до 275 км). Включает в себя северную и центральную части Эгейской микроплиты, южную часть Сербо-Македонского массива, Родопы, центральные части Балканид и Мизийской платформы.

Движения выделенных трех мантийных блоков могут служить спусковым механизмом для землетрясений зоны Вранча.

Движение Южно-Адриатического блока в северо-восточном направлении определяет движение Апулийской и Паннонской (Алькапа и Тисса-Дакия) микроплит, под действием которых происходит изгиб надвиговых цепей Восточных Карпат [Щукин, Добрев, 1980]. Движение Черноморского блока на запад — общим геодинамическим влиянием Центрально-Ази-

атской геодинамической системы [Цветкова, Бугаенко, 2012]. Движение Эгейского блока на север — общим движением на север Африканского континента и субдукцией Эгейской плиты.

В соответствии с представленными сечениями (горизонтальным (см. рис. 6) и долготным (см. рис. 7)) в Эгейском блоке максимально приближены погружающиеся навстречу друг другу высокоскоростные наклонные слои верхней мантии северной окраины Афро-Аравийской платформы и южной окраины ВЕП, что создает предпосылки, при глобальном движении Афро-Аравийской платформы на север, передачу энергетического импульса в мантию под область Вранча. Это вызывает необходимость более детального исследования мантийных взаимосвязей между двумя платформами, что будет рассмотрено позже.

Указанные три блока порождают основной фактор неустойчивости при землетрясениях зоны Вранча, так как способствуют возможному перераспределению напряжений, определяющих неустойчивую характеристику скоростной среды. Учитывая неустойчивость области распространения мантийных скоростных границ в мантии под зоной Вранча, следует обратить внимание и на присутствие наклонных высокоскоростных слоев мантии под ВЕП [Цветкова, Бугаенко, 2012]. О наклонном слое, распространяющемся от мантии под южным окончанием кряжа Карпинского до мантии под Вранча, и высокоскоростном наклонном слое, распространяющемся со стороны ВЕП, указывалось выше. Однако нельзя исключить влияние других наклонных слоев юго-западной части пограничной области, имеющих западное или южное направление.

Заключение. В связи с представлением о землетрясении как о скачкообразном переходе открытой, неравновесной, диссипативной, блочно-иерархической геофизической среды из неустойчивого состояния в стабильное выделены следующие признаки неустойчивости среды по характеристикам скоростного строения мантии, которые могут служить спусковыми механизмами землетрясений зоны Вранча.

1. Для мантии под ВЕП определены мантийные скоростные границы, оконтуриваемые изолиниями нулевых невязок функции скорости $V(\varphi, \lambda, z)$ относительно референтной модели, являющейся обобщенной средней скоростью для мантии под территорией Евразии. Пограничные скоростные мантийные изолинии в силу определения являются экстремальными по (φ, λ) для глубин

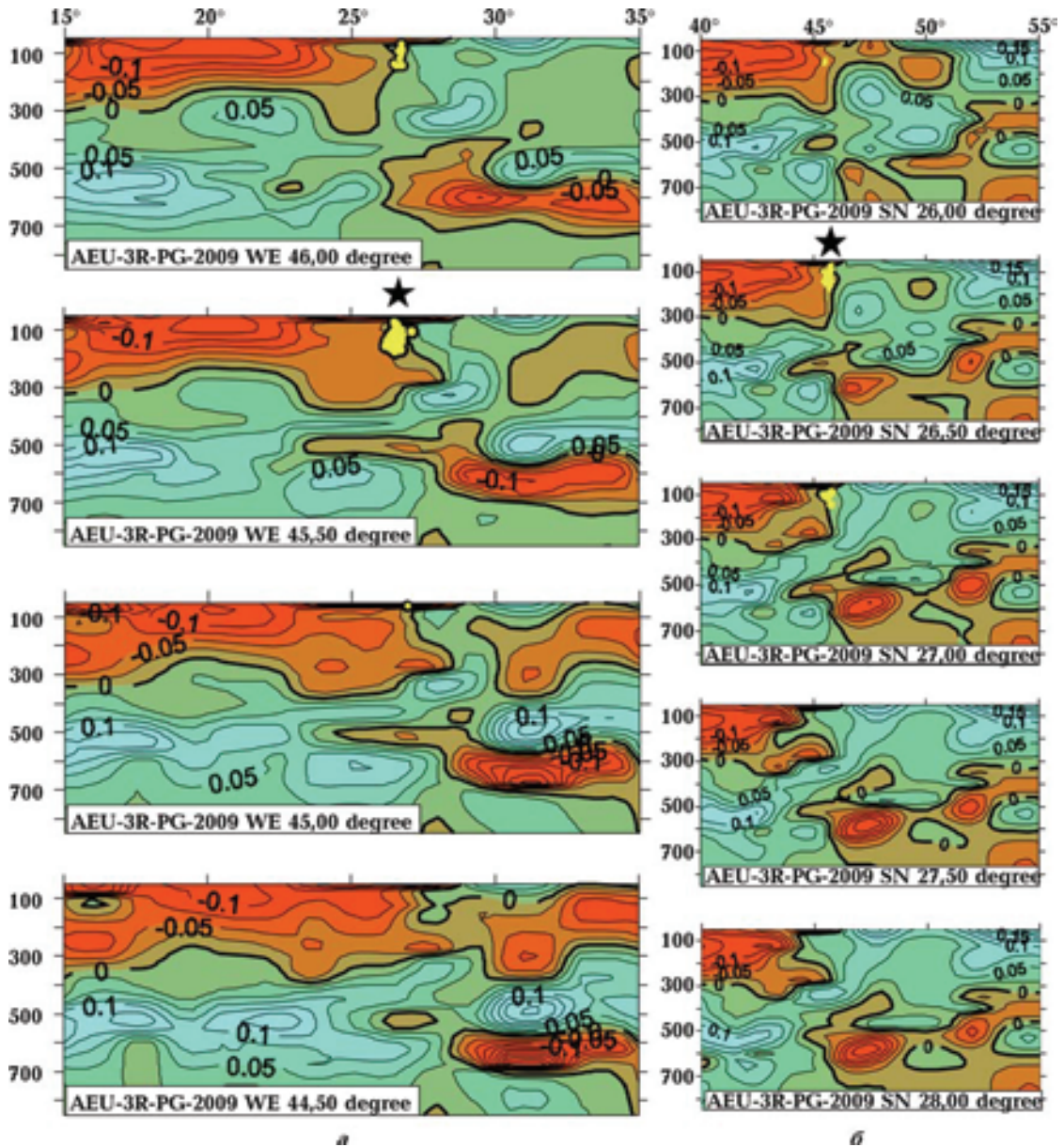


Рис. 4. Вертикальные (широтные (а) и долготные (б)) сечения трехмерной P -скоростной модели верхней мантии исследуемой территории с вынесенными гипоцентрами землетрясений зоны Вранча (желтые кружочки) с магнитудой более 4,5 за период с 1973 по 2010 г. [Restangular ..., 2010] в пределах $0,25^\circ$ от номинала сечения.

$z \in (0, H)$, так как отражают переход к мантийным областям, определяемым инверсными скоростями.

2. Под зоной Вранча выделяется субвертикальная скоростная граница ВЕП, которая отражается в прохождении через точку (φ, λ, z) , где $\varphi = 45,5 \pm 0,5^\circ$ с. ш., $\lambda = 26,5 \pm 0,5^\circ$ в. д., $z \in (75\text{—}300 \text{ км})$, мантийных пограничных скоростных изолиний. Данная субвертикальная область определяется как неустойчивая.

3. Выявлена связь зоны Вранча с высокоскоростным выступом северо-западного направления со стороны северо-восточной части Мизийской плиты на глубине 75—225 км, по границе которого с низкоскоростными зонами наблюдаются промежуточные землетрясения.

4. Факторами, которые могут определять неустойчивость мантийной среды в области Вранча, являются ее взаимосвязи с ман-

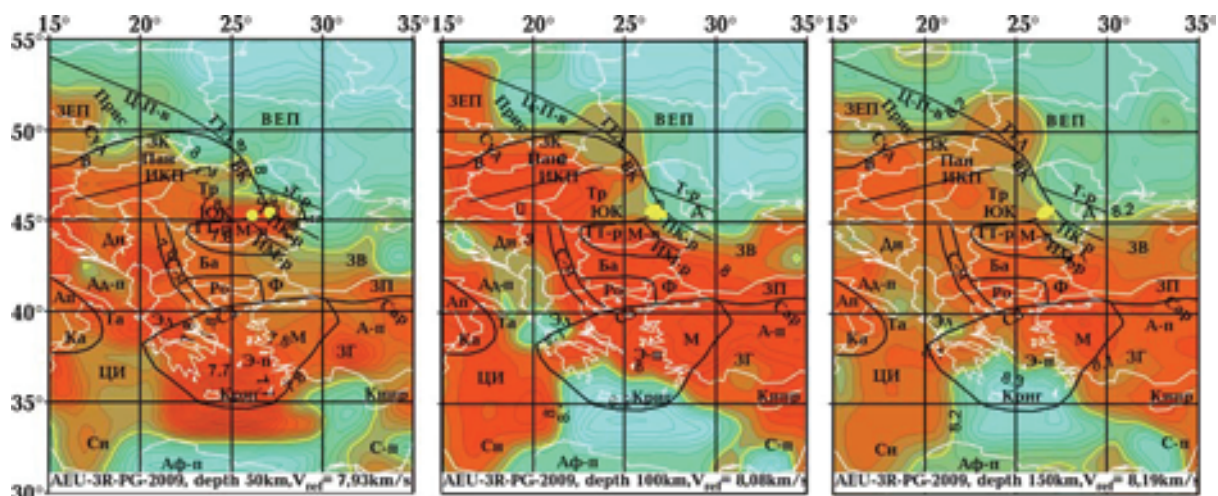


Рис. 6. Горизонтальные сечения 3D P -скоростной модели верхней мантии исследуемой территории (50, 100, 150 км) с вынесенными гипоцентрами землетрясений (желтые кружочки) с магнитудой более 4,5 за период с 1973 по 2010 г. [Restangular ..., 2010] в пределах $\pm 12,5$ км от номинала сечения.

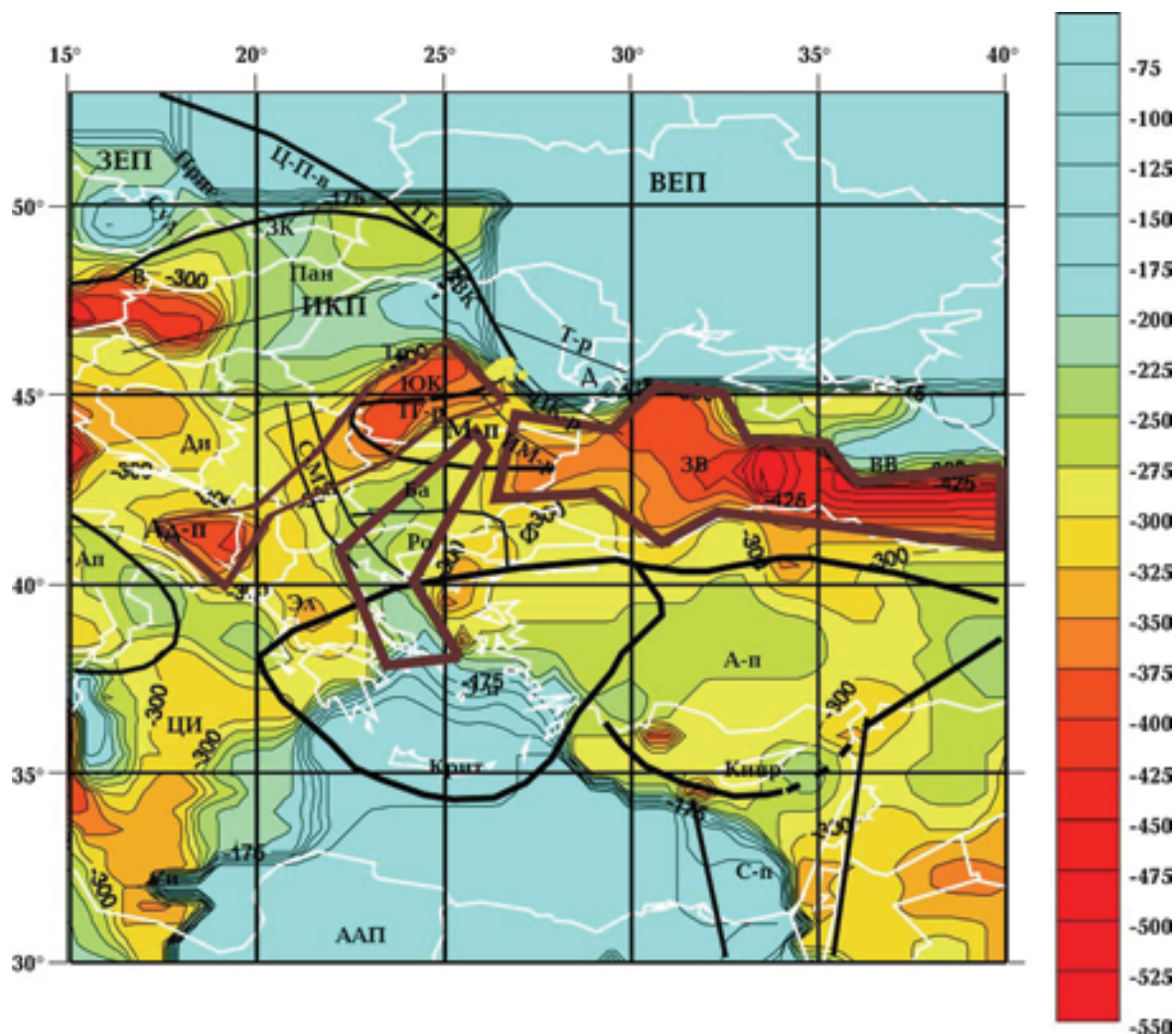


Рис. 8. Глубина залегания подошвы низкоскоростного слоя верхней мантии (блоки оконтурены линией коричневого цвета). Условные обозначения см. на рис. 2.

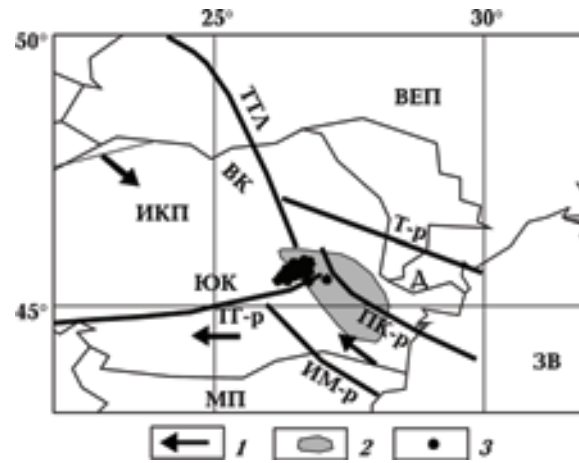


Рис. 5. Проекция на поверхность высокоскоростной области в районе Вранча, сформированная наклонным слоем (см. рис. 4): 1 — региональные векторы напряжений [Besutio, Cadicaneanu, 2002; Zugravescu, Polonic, 2002; Besutio, 2002], 2 — проекция высокоскоростной области, 3 — проекция промежуточных землетрясений области Вранча с магнитудой более 4,5 за период с 1973 по 2010 г. [Restangular ..., 2010].

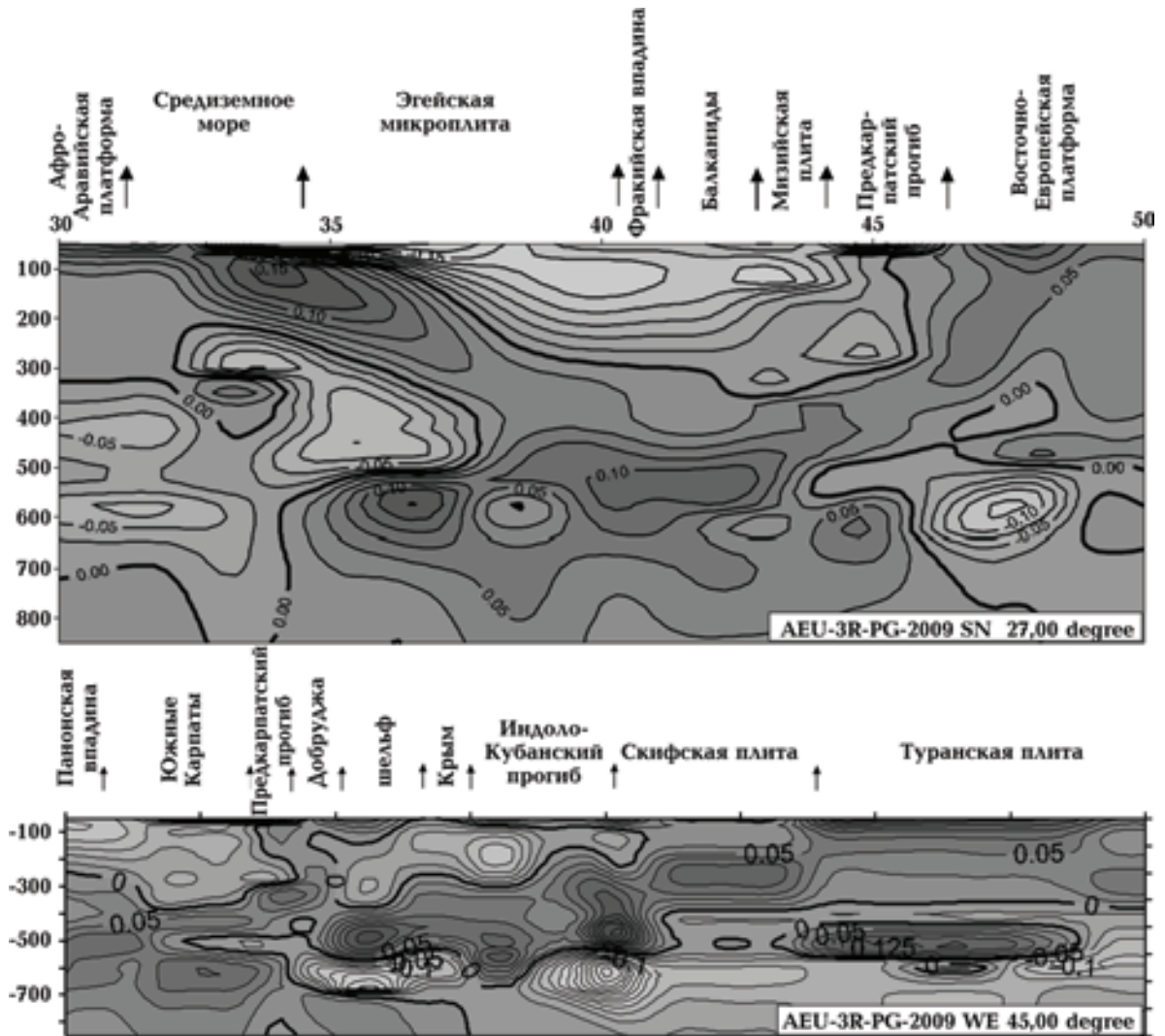


Рис. 7. Долготное (27° в. д.) и широтное (45° с. ш.) сечения 3D P -скоростной модели верхней мантии.

тией под Афро-Аравийской, Восточно-Европейской платформами, Скифско-Туранской плитой и Адриатической микроплитой. Указанные взаимосвязи определяются основной геодинамической направленностью процессов, в частности, движениями трех мантийных блоков (Южно-Адриатического, Черноморского и Эгейского), которые могут порождать спусковые процессы землетрясений зоны Вранча.

Зона Вранча и ее окружение обладает множеством скоростных мантийных характеристик, которые влияют на ее неустойчивость и

могут служить как причиной, так и спусковым механизмом землетрясений. Остаются открытыми некоторые проблемы.

1. Какой из вышеперечисленных факторов или какое их сочетание (и в сочетании с экзогенными факторами) приводит к высокоамплитудным разрушительным землетрясениям зоны Вранча?
2. Построение блочно-иерархической системы мантии под Европой.
3. Роль сверхглубинных флюидных процессов при землетрясениях зоны Вранча.

Список литературы

- Богданов Н.А., Короновский Н.В., Ломизе М.Г., Чехович В.Д., Юцис В.В. Тектоническая карта Средиземного моря. — Москва: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1994. — 1 л.
- Бугаенко И.В., Шумлянская Л.А., Заец Л.Н., Цветкова Т.А. Трехмерная *P*-скоростная модель мантии Черного моря и прилегающей территории // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 5. — С. 145—160.
- Винник Л.П. Неоднородности верхней мантии в районе Вранчской зоны промежуточных землетрясений // Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия. — Москва: Наука, 1980. — С. 41—45.
- Гейко В.С., Бугаенко И.В., Шумлянская Л.А., Заец Л.Н., Цветкова Т.А. 3D *P*-скоростное строение верхней мантии Восточного Средиземноморья // Геофиз. журн. — 2007. — **29**, № 4. — С. 13—30.
- Гейко В.С., Цветкова Т.А., Санникова Н.П., Ливанова Л.П., Гейко К.В. Региональная 3D *P*-скоростная структура мантии северо-западной Евразии. I. Европа 1 // Геофиз. журн. — 1998. — **20**, № 3. — С. 67—91.
- Гейко В.С., Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Региональная 3D *P*-скоростная модель мантии Сарматии (юго-запад Восточно-Европейской платформы) // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 6. — С. 927—939.
- Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия / Отв. ред. А.В. Друмя. — Москва: Наука, 1980. — 272 с.
- Карпатское землетрясение 30 августа 1986 г. / Отв. ред. А.В. Друмя, Н.В. Шебалин. — Кишинев: Штиинца, 1990. — 333 с.
- Латынина Л.А. Проблема прогноза землетрясений — в прошлом веке и в настоящее время // Свойства, структура, динамика и минералогия литосферы Восточно-Европейской платформы. — Воронеж: Научная книга, 2010. — С. 6—11.
- Писаренко В.Ф., Рогкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // Вычисл. сейсмология. — 2007. — Вып. 38. — 236 с.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Новые данные о сейсмической опасности г. Одесса и Одесской области // "Будівельні конструкції". Механіка ґрунтів, геотехніка, фундаментобудування. — 2004. — **2**, вип. 61. — С. 388—397.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. — Москва: Наука, 1985. — 408 с.
- Рогкин М.В., Никитин А.Н., Васин Р.Н. Сейсмо-тектонические эффекты твердофазных превращений в геоматериалах. — Москва: ГЕОС, 2009. — 196 с.
- Сагалова Е.А. Фокальная зона Карпатских землетрясений у гор Вранча // Геофиз. сб. — 1975. — **68**. — С. 5—81.
- Саговский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. — Москва: Наука, 2004. — 440 с.
- Соллогуб В.Б., Чекунов А.В., Старостенко В.И., Кутас Р.И., Булах Е.Г., Соллогуб Н.В., Харитонов О.М., Пашкевич И.К., Пустыльников М.Р., Бородулин М.Л., Шляховский В.А., Капица Ю.М.,

- Кулик С.Н., Коря И., Бишер М., Демитреску К., Лазареску В., Помпилян А., Рагулеску Ф., Рейману В. Строение литосферы вдоль геотранверса V на основании комплексных геолого-геофизических данных // Геофиз. журн. — 1985. — 7, № 4. — С. 3—18.
- Старостенко В.И., Кендзера А.В., Бугаенко И.В., Цветкова Т.А. Землетрясение в Аквиле и особенности трехмерного *P*-скоростного строения мантии под Адриатической плитой и ее окружением // Геофиз. журн. — 2011. — 33, № 4. — С. 62—73.
- Трифонов В.Г., Иванова Т.П., Бачманов Д.М. Горнообразование в новейшей геодинамике Альпийско-ималайского пояса // Материалы XLIII Тектон. совещания "Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ". — Москва: ГЕОС, 2010. — Т. 2. — С. 371—375.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В. Сейсмотомография мантии под Восточно-Европейской платформой: мантийные скоростные границы // Геофиз. журн. — 2012. — 5, № 34 — С. 161—172.
- Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмотомография Восточно-Европейской платформы: трехмерная *P*-скоростная модель мантии под Фенноскандией. Ч. I // Геофиз. журн. — 2009. — 31, № 1. — С. 53—72.
- Чекунов А.В. Сейсмоактивный район Вранча — тектонический аспект // Доп. АН УРСР. Сер. Б. — 1986. — № 5. — С. 21—26.
- Чекунов А.В. Тектоническая модель сейсмоактивного района Вранча в Карпатах // Геол. журн. — 1987. — № 4. — С. 3—11.
- Шевченко В.И., Арефьев С.С., Лукк А.А. Близвертикальные скопления очагов землетрясений, не связанные с тектонической структурой земной коры // Физика Земли. — 2011. — № 4. — С. 16—38.
- Щукин Ю.К., Добрев Т.Д. Глубинное геологическое строение, геодинамика и геофизические поля очаговой зоны Вранча // Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия. — Москва: Наука, 1980. — С. 7—40.
- Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Альпийский Средиземноморский пояс. — Москва: Недра, 1984. — 344 с.
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). — Москва: Научный мир, 2001. — 606 с.
- Харитонов О.М., Красовский С.С., Куприенко П.Я., Кутас В.В., Сологуб Н.В., Дрогицкая Г.М., Тимошенко В.И., Шляховский В.А. Литосферный трансект Вранча — Южно-Украинская АЭС // Геофиз. журн. — 1993. — 15, № 5. — С. 23—31.
- Aki K., Christoffersson A., Husebye E.S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere // J. Geophys. Res. — 1977. — 82. — P. 277—296.
- Artemieva I.M., Thybo H., Kaban M.K. Deep Europe today: Geophysical synthesis of the upper mantle structure and lithospheric processes over 3,5 Ga // Geol. Soc. Spec. Publ. — 2006. — 32. — P. 11—41. — www.lithosphere.info/papers/2006-ELD-DeepEurope.pdf.
- Besutio L. Vrancea active seismic area: evidence towards a continental unstable triple junction // The natural geodynamic laboratory Vrancea, a challenge for the 21st century. — Bucharest, 2002. — P. 129—147.
- Besutio L., Cadicheanu N. Preliminary considerations on the space-time dynamics of the intermediate-depth seismicity within Vrancea zone // The natural geodynamic laboratory Vrancea, a challenge for the 21st century. — Bucharest, 2002. — P. 25—33.
- Besutio L., Zugravesku D. Considerations on the Black Sea opening and its seismotectonic consequences // The natural geodynamic laboratory Vrancea, a challenge for the 21st century. — Bucharest, 2002. — P. 79—97.
- Bijward H., Spakman W. Non-linear global *P*-tomography by iterated linearized inversion // Geophys. J. Int. — 2000. — 141. — P. 71—82.
- Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography // J. Geophys. Res. — 1998. — 103. — P. 30,055—30,078.
- De Jonge M., Wortel M., Spakman W. Regional scale tectonic evolution and the seismic velocity structure of the lithosphere and upper mantle: the Mediterranean region // J. Geophys. Res. — 1994. — 99, № B6. — P. 12,091—12,108.
- Geyko V.S. A general theory of the seismic travel-time tomography // Геофиз. журн. — 2004. — 26, № 2. — С. 3—32.
- Fan G., Wallace T. C., Zhao D. Tomographic imaging of deep velocity structure beneath the Eastern and Southern Carpathians, Romania: Implications for continental collision // J. Geo-

- phys. Res. — 1998. — **103**, № B2. — P. 2705—2723.
- Girbacea R., Frisch W.* Slab in the wrong place: lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the Eastern Carpathian subduction retreat // *Geology*. — 1998. — **26**. — P. 611—614.
- Goes S., Govers R., Vachers P.* Shallow mantle temperatures under Europe from *P*- and *S*-wave tomography // *J. Geophys. Res.* — 2000. — **105**, № B5. — P. 11,153—11,169.
- Hauser F., Raileanu V., Fielitz W., Bala A., Prodehl C., Polonic G., Schulze A.* VRANCEA99 — The crustal structure beneath the southeastern Carpathians and the Moesian Platform from a seismic refraction profile in Romania // *Tectonophysics*. — 2001. — **340**. — P. 233—256. — DOI:10.1016/S0040—1951(01)00195-0.
- Hauser F., Raileanu V., Fielitz W., Dinu C., Landes M., Bala A., Prodehl C.* Seismic crustal structure between the Transylvanian Basin and the Black Sea, Romania // *Tectonophysics*. — 2007. — **430**. — P. 1—25.
- Ismail-Zadeh A., Schubert G., Tsepelev I., Korotkii A.* Thermal evolution and geometry of the descending lithosphere beneath the SE-Carpathians: an insight from the past // *Earth Planet. Sci. Let.* — 2008. — **273**. — P. 68—79.
- Kennett B. L. N., Engdahl E. R., Buland R.* Constraints on seismic velocities in the Earth from travel-times // *Geophys. J. Int.* — 1995. — **122**. — P. 108—124.
- Knapp J. H., Knapp C. C., Raileanu V., Matenco L., Mocanu V., Dinu C.* Crustal constraints on the origin of mantle seismicity in the Vrancea Zone, Romania: The case for active continental delamination // *Tectonophysics*. — 2005. — **410**. — P. 311—323. — DOI:10.1016/j.tecto.2005.02.020.
- Koch M.* Nonlinear inversion of local seismic travel times for the simultaneous determination of the 3D-velocity structure and hypocenters — Application to the seismic zone Vrancea // *J. Geophys.* — 1985. — **56**. — P. 160—173.
- Koulakov I., Kaban M. K., Tesauro M., Cloetingh S.* *P*- and *S*-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data // *Geophys. J. Int.* — 2009. — **179**. — P. 345—366.
- Koulakov I., Zaharia B., Enescu B., Radulian M., Popa M., Parolai S., Zschau J.* Delamination or slab detachment beneath Vrancea New arguments from local earthquake tomography // *Geochem. Geophys. Geosystems*. — 2010. — **11**, № 3. — P. Q03002. — DOI: 10.1029/g//c002811.
- Landes M., Fielitz W., Hauser F., Popa M., the CALIXTO Group.* 3D upper crustal tomographic structure across the Vrancea seismic zone, Romania // *Tectonophysics*. — 2004. — **382**. — P. 85—102. — DOI:10.1016/j.tecto.2003.11.013.
- Lorenz F. P., Martin M., Sperner B., Wenzel F., Popa M.* Teleseismic travel-time tomography of the compressional-wave velocity structure in the Vrancea zone, Romania // *EOS, Transactions, American Geophys. Union*. — 1997. — **78**. — P. 497.
- Marquering H., Snieder R.* Shear-wave velocity structure beneath Europe, the northeastern Atlantic and western Asia from waveform inversions including surface-wave mode coupling // *Geophys. J. Int.* — 1996. — **124**. — P. 283—304.
- Martin M., Ritter J. R. R., the CALIXTO Working Group.* High resolution teleseismic body wave tomography beneath SE Romania, I. Implication for three-dimensional versus one-dimensional crustal correction strategies with a new crustal velocity model // *Geophys. J. Int.* — 2005. — **162**. — P. 448—460. — DOI:10.1111/j.1365—246X.2005.02661.x.
- Martin M., Wenzel F., the CALIXTO Working Group.* High resolution teleseismic body wave tomography beneath SE Romania, II. Imaging of a slab detachment scenario // *Geophys. J. Int.* — 2006. — **164**. — P. 579—595. — DOI:10.1111/j.1365—246X.2006.02884.x.
- Mason P. R. D., Seghedi I., Szakacs A., Downes H.* Magmatic constraints on geodynamic models of subduction in the East Carpathians, Romania // *Tectonophysics*. — 1998. — **297**. — P. 157—176.
- Oncescu M. C.* Deep structure of Vrancea region, Romania, inferred from simultaneous inversion for hypocenters and 3D velocity structure // *Annal. Geophys.* — 1984. — **2**. — P. 23—28.
- Oncescu M. C., Bonjer K.-P.* A note on the depth recurrence and strain release of large Vrancea earthquakes // *Tectonophysics*. — 1997. — **272**. — P. 291—302.
- Oncescu M. C., Bulacu V., Anghel M., Smalbergher V.* Three-dimensional *P*-wave velocity image under the Carpathian Arc // *Tectonophysics*. — 1984. — **106**. — P. 305—319.
- Piromallo C., Morelli A.* *P*-wave tomography of the mantle under the Alpine-Mediterranean area

- // J. Geophys. Res. — 2003. — **108** (B2) . — 2065.
— DOI:10.1029/2002JB001757. — P. 1—23.
- Restangular Area Earthquake Search* // USGS/NEIC.
— 2010. — earthquake.usgs.gov/earthquakes/
egarchives/epic/epic_rect/php.
- Spakman W., van der Lee S., van der Hilst R.* Travel-time tomography of the European-Mediterranean mantle down to 1400 km // Phys. Earth Planet. Int. — 1993. — **79**. — P. 3—74.
- Sperner B., Lorenz F., Bonjer K., Hettel S., Müller B., Wenzel F.* Slab break-off — abrupt cut or gradual detachment? New insights from the Vrancea Region (SE Carpathians, Romania) // Terra Nova. — 2001. — № 13. — P. 172—179.
- The natural geodynamic laboratory Vrancea, a challenge for the 21st century* / Ed. D. Zugravescu. — Bucharest, 2002. — 299 p.
- Tondi R., Achauer U., Landes M., Davy R., Besuttu L.* Unveiling seismic and density structure beneath the Vrancea seismogenic zone, Romania // J. Geophys. Res. — 2009. — **114**. — P. B11307. — DOI:10.1029/2008JB005992.
- Weidle C., Widiyantoro S., CALIXTO Working Group.* Improving depth resolution of teleseismic tomography by simultaneous inversion of teleseismic and global *P*-wave travel-time data — application to the Vrancea region in South-Eastern Europe // Geophys. J. Int. — 2005. — **162**. — P. 811—823.
- Wenzel F., Sperner B., Lorenz F., Mocanu V.* Geodynamics, tomographic images and seismicity of the Vrancea region (SE-Carpathians, Romania) // EGU Stephan Mueller Special Publication Series. — 2002. — **3**. — P. 95—104.
- Wortel M., Spakman W.* Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region // Science. — 2000. — **290**. — P. 1910—1917.
- Zielhuis A., Nolet G.* Shear-wave velocity variations in the upper mantle beneath central Europe // Geophys. J. Int. — 1994. — **117**. — P. 695—715.
- Zugravescu D., Polonic G.* Present-day stress field in the southeastern in the Vrancea region derived from seismicity data // The natural geodynamic laboratory Vrancea, a challenge for the 21st century. — Bucharest, 2002. — P. 35—45.