

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.12.052>

УДК 550.34

В.В. Гордиенко, Л.Я. Гордиенко

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев

E-mail: gordienkovadim39@gmail.com

Скорости Р-волн в подкоревой мантии Украины

Представлено академиком НАН Украины В.И. Старостенко

Рассмотрено распространение продольных сейсмических волн в верхней мантии Украины. Показано, что для объяснения времен прихода волн на удаленные сейсмостанции, когда значительная часть их пути проходит по верхней мантии, необходимо принять скоростную модель с зоной пониженной скорости под корой зон современной активизации. Аномалия скорости отвечает прогнозированной в соответствии с представлениями адвекционно-полиморфной гипотезы и вызвана повышением температуры пород верхней мантии по сравнению с температурами под докембрийской платформой в том же интервале глубин. Возможна небольшая степень плавления мантийных пород.

Ключевые слова: скоростная модель, тепловая модель, адвекционно-полиморфная гипотеза.

В работах авторов ранее было показано, что на территории Украины как на платформах разного возраста, так и в альпийской геосинклинали Карпат распространены зоны современной активизации (СА) [1–3 и др.]. С помощью различных геолого-геофизических методов в них установлен мантийный этаж, в котором на небольшой глубине под корой располагается зона частичного плавления ультраосновных пород. Подтверждением этого могли бы служить сведения о значительном понижении скорости продольных сейсмических волн (V_p) в соответствующем интервале глубин. Но достоверных данных об этом параметре в пределах Украины довольно мало. Причем информации по скоростным разрезам верхней мантии явно не хватает и по охвату территории, и по точности определений V_p геологического истолкования. Поэтому представляет интерес продолжение исследований скоростных разрезов верхов мантии, тем более что в настоящее время в них может быть использован опыт, приобретенный авторами в процессе изучения одномерных распределений скоростей в верхней мантии океанов и переходных зон между континентами и океанами [4 и др.].

Прогнозные скоростные модели. Используемая авторами адвекционно-полиморфная гипотеза глубинных процессов (АПГ) предполагает, что современная активизация платформы есть следствие выноса под кору значительного количества перегретого и частично расплавленного вещества с больших глубин (минимум — около 200 км) [3]. В альпидях источник перегретого вещества — неглубокая остаточная астеносфера. Однако результа-

© В.В. Гордиенко, Л.Я. Гордиенко, 2017

тивные тепловые аномалии под корой близки платформенным. Это подтверждается не только результатами моделирования, но и данными геотермометров [3 и др.]. Расчет тепловой модели для ситуации, возникшей вследствие тепломассопереноса, показывает, что появляющаяся неглубокая астеносфера приводит к образованию значительной отрицательной скоростной аномалии на уровне не менее 0,4 км/с в центральной части объекта. Но в настоящее время подобное возмущение не обязательно сохранилось. Неопределенность времени начала активизации не дает возможности точно определить степень остывания астеносферы и, соответственно, спада возмущения V_p . Кроме того, часть расплавленного материала из мантии перенесена в кору, на его место опустились эклогитизированные базиты из нижней и средней коры. Скорость в эклогитах выше скорости в мантийном перидотите, особенно учитывая возможность преобразования последнего под корой в шпинелевую или плагиоклазовую фации. Эклогитизированные блоки опускаются в глубину мантии со значительной скоростью. Отсутствие точной информации о времени начала этого процесса (по АПГ он, в отличие от образования мантийной части СА, стартовал не миллионы, а сотни тысяч лет назад) не позволяет определить, на какой глубине и в каком количестве указанные эклогитовые блоки находятся сейчас. Значения скорости могут вырасти на 0,05–0,40 км/с. Еще одной, менее важной, но все же заметной, причиной изменчивости прогнозной V_p под зоной СА могут быть вариации теплогенерации пород коры и мантии, приводящие к изменению фона, на который накладываются тепловые (и, соответственно, скоростные) аномалии. Перечисленные факторы дают основание представить скоростную модель верхов мантии под активизированными зонами Украины в виде сложной мозаики возмущений разного знака и интенсивности.

Такая картина обнаруживается, в частности, по результатам изучения распределения скорости Р-волн в верхней мантии Северной Евразии [3, 5]. Здесь в подкорковой мантии зон СА установлены очень интенсивные вариации скорости ($\pm 0,15$ – $0,20$ км/с), а средние величины много выше расчетных, не учитывающих влияния погруженных в мантию эклогитов. Под неактивными платформами достигается согласование средних экспериментальных и расчетных значений. Не очень значительны и отклонения от средних наблюдаемых значений скорости ($\pm 0,05$ – $0,10$ км/с). Это свидетельствует об адекватности существующих представлений о составе пород мантии и влиянии на V_p температуры (T) и давления. На территории Украины ситуация в принципе сходная (рис. 1, 2).

Следует отметить, что расчетные значения V_p для Северной Евразии, в значительной мере отражающие ситуацию на Сибирской платформе и расположенных в ее пределах зонах СА, учитывают широкое распространение здесь районов с пониженным тепловым потоком. Поэтому они несколько повышены по сравнению с типичными.

Изменчивость скорости в мантии Украины под платформами оказывается примерно той же, что для Северной Евразии в целом. Согласование расчетных и экспериментальных данных вполне удовлетворительное. Но это относится не ко всем данным. Вариант разреза, например, по [9] (см. ниже) не согласуется с расчетными данными под платформой и информацией по трансектам.

Под зонами СА Украины скорости несколько ниже (ближе к расчетным, определенным без учета эклогитовых блоков) и менее изменчивы (0,05–0,15 км/с), чем под Северной Евразией. Тем не менее и здесь отмечается влияние не только повышенной по сравнению с

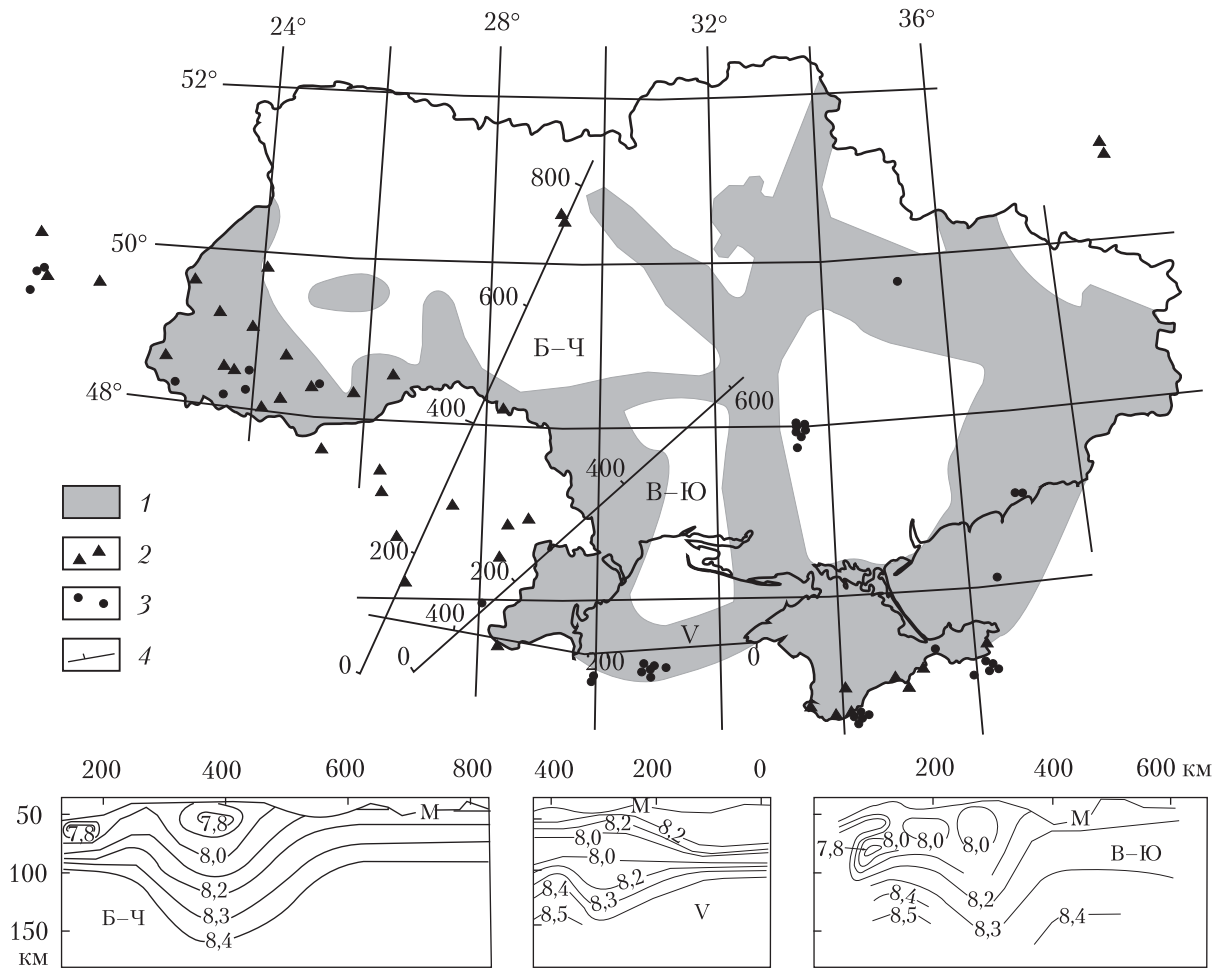


Рис. 1. Зоны СА Украины (1), сейсмостанции (2) и эпицентры землетрясений (3), использованные в работе, геотрансекты, вдоль которых построены скоростные разрезы мантии (4) [6–8]. На врезке – скоростные разрезы по трансектам V, B–Ю – Вранча–Южно-Украинская АЭС, B–Ч – Бухарест – Чернобыль

платформой температуры мантии и, возможно, небольшой степени частичного плавления, но и высокоскоростных эклогитизированных блоков. Впрочем, не исключено, что сказывается и/или более длительное остывание перегретого подкорового объема вещества мантии (см. рис. 2, б).

По имеющимся данным (см. рис. 1 и др.) можно предположить, что скоростные аномалии в мантии внутри зон СА представляют собой не единый объект, а разделены на более мелкие фрагменты, образуют цепочки низкоскоростных блоков, разделенных блоками с относительно повышенными (примерно на 0,2 км/с) скоростями. Это необходимо учитывать при оценке одномерных скоростных моделей верхней мантии, в которых сглаживаются указанные неоднородности. Размеры аномальных объектов составляют примерно 50–100 км по горизонтали, т. е. согласуются с прогнозируемыми по АПГ.

Априорные данные. Перечислим кратко имеющиеся сведения о величинах V_p в мантии Украины.

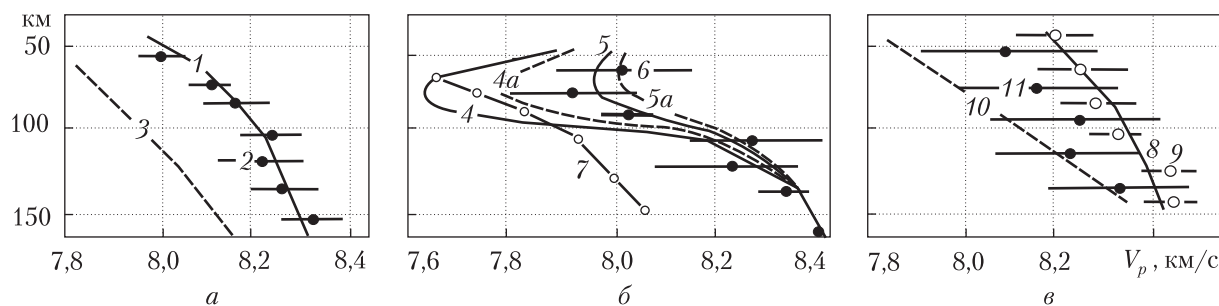


Рис. 2. Сравнение расчетных (1, 3, 4, 5, 7, 8, 10) и экспериментальных (2, 6, 9, 11) значений скоростей продольных сейсмических волн в мантии под платформенными (а) и активизированными (б) районами Украины по данным трансектов (рис. 1) и мантии Северной Евразии (в). а, б (платформы): 1 – расчетные, 2 – экспериментальные V_p по [6–8], 3 – по [9]; в (зоны СА): 4, 5 – расчетные (4 – в центре, 5 – на окраине СА для начала процесса 5 млн лет назад, 4а, 5а – для начала процесса 10 млн лет назад), 6 – экспериментальные V_p , 7 – расчетные для условий солидуса; в: 8, 9 – платформы, 10, 11 – зоны СА

Согласно данным [9–11], в верхах мантии под зонами СА в изучаемом регионе скорость составляет около 7,8–8,2 км/с, однако разница в моделях между публикациями разных лет в среднем превышает 0,1 км/с, что делает выявленные возмущения малодостоверными. Например, на глубине около 80 км по [9] одна изолиния скорости протягивается от северной части Украинского щита до Паннонской впадины, т. е. уравнивает V_p в полярных по аномальности районах. Скорость продольных сейсмических волн под платформой оказывается много ниже, чем по данным других сейсмологов (см. рис. 2).

Авторами собрана некоторая информация о величинах V_p в верхах мантии: в Карпатах по сведениям о временах пробега продольных волн от Береговского землетрясения 1965 г. и непосредственно у раздела М (преимущественно по граничным скоростям) по данным ГСЗ на остальной территории [2, 3 и др.]. В первом случае получены значения для зон СА – около 7,95 км/с на глубине 45 км и 8,05 км/с на глубине 70–80 км, во втором – на глубине 45 км около 8,0 и 8,1 км/с в зонах СА и под платформой вне них соответственно.

В публикациях [7, 8] (см. рис. 1, 2) на большей части платформенной территории Украины фиксируются под корой скорости около $8,0 \pm 0,05$ км/с, в районах аномалий – $8,0 \pm 0,2$ км/с.

В работе [12] общеевропейская модель восточной периферией захватывает западную часть Украины и Крым. Восточнее линии, проходящей на северной границе Украины по меридиану 25° и на южной – 32° , информации для достоверных построений, по мнению авторов, недостаточно. В статье, посвященной сейсмической томографии примерно того же региона (преимущественно южной Европе и северному Средиземноморью) [13], показано, что в такой ситуации погрешность значений V_p резко возрастает, достигая 0,05 км/с (речь идет только о погрешности, связанной с рассматриваемым обстоятельством). Полученные данные для глубины 50 км составляют 8,05–8,10, редко $7,9 \pm 0,05$ км/с, на глубине 100 км – 8,10–8,15, редко $8,0 \pm 0,05$ км/с. В пределах одной зоны активизации Карпат и Предкарпатья значения V_p изменяются во всем указанном диапазоне.

Некоторые из результатов, приведенные на рис. 1 и 2, свидетельствуют о существенных по интенсивности аномалиях, однако характеризуют лишь отдельные зоны СА и районы платформ. Для описания ситуации в целом хотя бы на уровне одномерных моделей двух указанных вариантов разрезов (под платформами и СА) этого явно недостаточно.

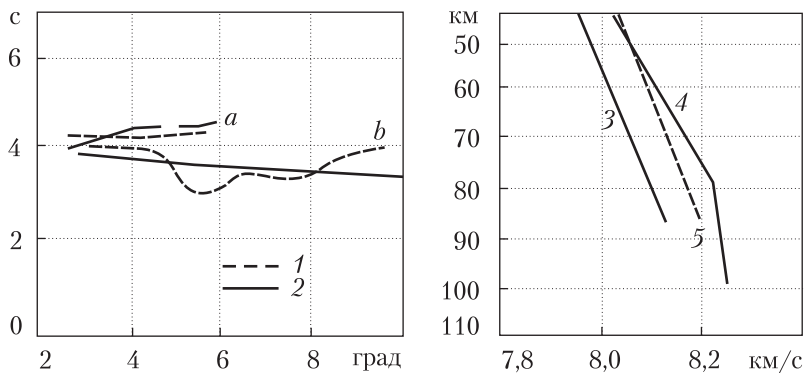


Рис. 3. Годографы для зон СА (а) и остальной части Украины, включающей платформенные и активизированные районы (b), и скоростные разрезы верхов мантии. Годографы: 1 – экспериментальные, 2 – расчетные. Скоростные разрезы: 3 – зон СА, 4 – “смеси” платформенных и активизированных зон, 5 – средний разрез для платформы и зоны СА Украины с использованием данных рис. 2, а

Использованная информация. Для решения поставленной задачи были использованы сведения [14] о более чем 400 временах пробега сейсмических волн от 40 землетрясений к 40 сейсмостанциям на территории Украины и соседних стран. Предпринята попытка построить отдельную скоростную модель для Карпатской дуги и Причерноморья (включая Крым), мантия под которыми заведомо активизирована. В случае реализации этого подхода устанавливаются скорости сейсмических волн под зоной СА отдельно, без вклада неактивизированной платформы (см. рис. 1). Почти все землетрясения в пределах дуги оказались на небольших эпицентральных расстояниях, обеспечивающих лишь незначительное проникновение лучей в мантию, в Причерноморье можно использовать данные по несколько больше проникающим лучам, но все же результат менее глубокий, чем для остального массива информации.

В общем полученный материал оказался вполне пригодным для изучения распределения V_p до глубины примерно 100 км для Украины в целом (т. е. без разделения на платформенные и активизированные районы) и до 70–80 км в указанных выше зонах активизации Карпат и Причерноморья.

Времена пробега волн были пересчитаны для приведения глубин гипоцентров землетрясений к 45 км. При этом использовались предварительно подобранные по многочисленным литературным данным скоростные разрезы коры и (в небольшом количестве случаев, где кора под сейсмостанциями была много тоньше 45 км) верхней мантии по результатам ГСЗ и приведенным выше сведениям о мантийных скоростях. Специальными расчетами показано, что возможные отличия скоростных моделей коры от принятых заметно не влияют на результат. При построении годографов использовалось редуцирование к скорости 8,2 км/с. Отклонение точек от осредняющего годографа оказалось в среднем не больше обычного для построений такого рода – около 1 с. Такой результат указывает на небольшое распространение в основной выборке данных, полученных только в платформенной мантии или в мантии зон СА.

Результаты расчета. Вычисления, позволяющие контролировать ход лучей и определять времена появления волн в первых вступлениях, проведены по программе SEIS-83 И. Пшенчика и В. Червени.

Несколькими итерационными изменениями скоростных разрезов верхних горизонтов мантии подобраны расчетные годографы, согласующиеся с экспериментальными (рис. 3) для обоих вариантов эндогенного режима, характерных для территории Украины.

Расхождения между расчетными и экспериментальными годографами незначительны: на уровне 0,2–0,3 с. Можно считать, что отвечающие расчетным годографам скоростные разрезы в полной мере соответствуют имеющимся сейсмологическим данным.

Скоростной разрез мантии зон СА имеет значения V_p , заметно пониженные по сравнению с показанными на рис. 2, в. Можно предположить, что рассматриваемый интервал глубин в меньшей степени насыщен погружившимися в мантию эклогитами, чем многие другие активизированные районы Сибирской и Восточно-Европейской платформ. Однако, скорее всего, этот материал в верхах мантии присутствует и предполагать полное соответствие скорости тепловой модели зоны СА (без помех) можно примерно с глубины 150 км.

Районы с низким тепловым потоком в пределах платформенной части Украины распространены мало и расчетное распределение скорости в мантии неактивизированной платформы (которое согласуется с данными по многим платформам Евразии и других континентов) оценено верно. Границы зон современной активизации на территории Украины определены неточно, поэтому нельзя с полной уверенностью установить соотношение площади СА и платформы. Если считать их вклад примерно одинаковым, то среднее для изученного региона распределение V_p должно быть посередине между платформенным и активным вариантами (см. рис. 3). Такой скоростной разрез оказывается очень близким к расчетному. Отличия составляют менее 0,05 км/с. Тем не менее можно констатировать, что на изученной территории площади СА распространены несколько шире, чем платформенные.

Несмотря на установленный упрощенный (одномерный) вид скоростной модели верхов мантии под зонами СА он согласуется с приведенными в [7, 8]. Поэтому на достигнутом уровне изученности проблемы последний можно считать типичным для зон современной активизации Украины. В соответствии с полученными данными вероятно небольшая по мощности зона частичного плавления на глубинах около 60 км под отдельными наиболее прогретыми фрагментами зон СА.

Таким образом изучение скоростных разрезов верхних горизонтов мантии платформенной и активизированной частей Украины с использованием сейсмологических данных позволило: 1) обнаружить отличия в скоростных моделях для двух типов эндогенных режимов; 2) показать возможность согласования скоростных моделей с глубинными процессами по представлениям АПГ; 3) сопоставить скоростные модели с тепловыми и выявить их соответствие; 4) продемонстрировать близость полученных результатов к приведенным ранее данным исследований по трансектам, базировавшимся на сейсмичности зоны Вранча.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гордиенко В.В. Глубинные процессы и сейсмичность. *Геофиз. журн.* 2014. № 1. С. 19–42.
2. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. О скорости распространения продольных сейсмических волн в подкоровой мантии Карпатского региона. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 3. С. 104–109.
3. Gordienko V. Deep-seated processes in the tectonosphere of continental rifts. *NCGT Journal*. 2016. 3. P. 361–388.
4. Gordienko L., Gordienko V. P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NCGT Journal*. 2016. 3. P. 389–405.
5. Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I. Upper mantle structure in Northern Eurasia based on the data of peaceful nuclear explosion. *Tectonophysics*. 2006. 416. P. 33–52.
6. Соллогуб В.Б. Литосфера Украины. Киев: Наук. думка. 1986. 184 с.

7. Харитонов О.М., Красовский С.С., Куприенко П.Я. и др. Литосферный трансект Вранча — Южно-Украинская АЭС. *Геофиз. журн.* 1993. № 5. С. 23–31.
8. Харитонов О.М., Омельченко В.Д., Дрогицкая Г.М. и др. Литосферный трансект Бухарест—Чернобыль. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 1995. № 5. С. 84–87.
9. Гейко В.С., Цветкова Т.А., Санникова Н.П., Ливанова Л.П., Гейко К.В. Региональная 3-D P-скоростная структура мантии северо-западной Евразии. *Геофиз. журн.* 1998. № 3. С. 67–91.
10. Гейко В.С., Цветкова Т.А., Ливанова Л.П. и др. Скорости P-волн в верхней мантии впадины Черного моря и структур юга Украины по данным землетрясений. *Геодинамика и глубинное строение сейсмогенных зон Украины*. Киев: Наук. думка, 1993. С. 31–59.
11. Гинтов О.Б., Егорова Т.П., Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Муровская А.В. Геодинамические особенности зоны сочленения Евразийской плиты и Альпийско-Гималайского пояса в пределах Украины и прилегающих территорий. *Геофиз. журн.* 2014. № 5. С. 26–63.
12. Koulakov I., Kaban K., Tesauro M. et al. 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.
13. Diaz J., Gil A., Gallart J. Uppermost mantle seismic velocity and anisotropy in the Euro-Mediterranean region from Pn and Sn tomography. *Geophys. J. Int.* 2013. **192**. P. 310–325.
14. Bulletin of the International Seismological Centre. 2014. URL: <http://www.isc.ac.uk>

Поступило в редакцию 04.07.2017

REFERENCES

1. Gordienko, V. V. (2014). Deep processes and seismicity. *Geofiz. zhurn.* No. 1, pp. 19-42 (in Russian).
2. Gordienko, V. V. & Gordienko, L. Ja. (2012). On the propagation velocity of longitudinal seismic waves in the subcrustal mantle of the Carpathian region. *Dopov. Nac. acad. nauk Ukr.*, No. 3, pp. 104-109 (in Russian).
3. Gordienko, V. (2016). Deep-seated processes in the tectonosphere of continental rifts. *NCGT Journal*, 3, pp. 361-388.
4. Gordienko, L. & Gordienko, V. (2016). P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NCGT Journal*, 3, pp. 389-405.
5. Pavlenkova, G. A. & Pavlenkova, N. I. (2006). Upper mantle structure in Northern Eurasia based on the data of peaceful nuclear explosion. *Tectonophysics*, 416, p. 33-52.
6. Sollogub, V. B. (1986). *Lithosphere of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
7. Kharitonov, O. M., Krasovsky, S. S., Kuprienko, P. Ya. et al. (1993). Lithospheric transect Vrancea — South-Ukrainian NPP. *Geofiz. zhurn.*, No. 5, pp. 23-31 (in Russian).
8. Kharitonov, O. M., Omelchenko, V. D., Drogitskaya, G. M. et al. (1995). Lithospheric Transect Bucharest-Chernobyl. *Dopov. Nac. acad. nauk Ukr.*, No. 5, pp. 84-87 (in Russian).
9. Geyko, V. S., Tsvetkova, T. A., Sannikova, N. P., Livanova, L. P. & Geyko, K. V. (1998). Regional 3-D P-velocity structure of the mantle of the north-western Eurasia. *Geofiz. zhurn.*, No. 3, pp. 67-91 (in Russian).
10. Geyko, V. S., Tsvetkova, T. A., Livanova, L. P. et al. (1993). P-waves velocities in the upper mantle of the Black sea depression and structures of the Ukraine's south after the earthquake's data. In *Geodynamics and deep structure of the seismogenic zones of Ukraine* (pp. 31-59). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
11. Gintov, O. B., Egorova, T. P., Tsvetkova, T. A., Bugaenko, I. V. & Murovskaya, A. V. (2014). Geodynamic Geodynamic features of the junction zone of the Eurasian plate and the Alpine-Himalayan belt within Ukraine and adjacent territories. *Geofiz. zhurn.*, No. 5, pp. 26-63 (in Russian).
12. Koulakov, I., Kaban, K. & Tesauro, M. et al. (2009). P- and S-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data. *Geophys. J. Int.*, 179, pp. 345-366.
13. Diaz, J., Gil, A. & Gallart J. (2013). Uppermost mantle seismic velocity and anisotropy in the Euro-Mediterranean region from Pn and Sn tomography. *Geophys. J. Int.*, 192, pp. 310-325.
14. Bulletin of the International Seismological Centre. (2014). Retrieved from <http://www.isc.ac.uk>

Received 04.07.2017

В.В. Гордієнко, Л.Я. Гордієнко

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ
E-mail: gordienkovadim39@gmail.com

ШВИДКОСТІ Р-ХВИЛЬ
У ПІДКОРОВІЙ МАНТІЇ УКРАЇНИ

Розглянуто поширення поздовжніх сейсмічних хвиль у верхній мантиї України. Показано, що для пояснення часу приходу хвиль на віддалені сейсмостанції, коли значна частина шляху проходить по верхній мантиї, необхідно прийняти швидкісну модель із зоною зниженої швидкості під корою зон сучасної активізації. Аномалія швидкості відповідає прогнозованій у відповідності до уявлень адвекційно-поліморфної гіпотези та зумовлена підвищенням температури порід верхньої мантиї в порівнянні з температурами під докембрійською платформою в тому самому інтервалі глибин. Можливий невеликий ступінь часткового плавлення порід мантиї.

Ключові слова: швидкісна модель, теплова модель, адвекційно-поліморфна гіпотеза.

V.V. Gordienko, L.Ja. Gordienko

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: gordienkovadim39@gmail.com

VELOCITIES OF P-WAVES
IN THE UKRAINIAN SUBCRUSTAL MANTLE

The propagation of longitudinal seismic waves in the Ukrainian subcrustal mantle is analyzed. It is shown that, to explain the arrival times of seismic waves on the remote seismic stations when a significant portion of their path passes through the upper mantle, it is necessary to take a velocity model with a low velocity zone under the crust of recent activation zones. The anomaly corresponds to the value predicted in accordance with ideas of the advection-polymorphic hypothesis and is caused by rising the temperature of rocks in the upper mantle compared with the temperatures at the Precambrian platform in the same depth interval. A small degree of melting of mantle rocks is possible.

Keywords: speed model, heat model, advection-polymorphous hypothesis.