

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.04.060>

УДК 550.34

В.В. Гордиенко

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

E-mail: gordienkovadim39@gmail.com

Глубина кровли переходной зоны между верхней и нижней мантией Земли

Представлено академиком НАН Украины В.И. Старостенко

Проведено сопоставление экспериментальных и рассчитанных значений глубины кровли переходной зоны между верхней и нижней частями мантии Земли. Доказано, что эта граница соответствует началу полиморфных преобразований мантийных пород. Оценена величина скачка скорости продольных сейсмических волн на уровне 0,45 км/с. Изучены изменения глубины кровли вследствие вариаций температуры под влиянием активного теплопереноса по схеме адвекционно-полиморфной гипотезы. Продемонстрировано приблизительное соответствие результатов (в пределах погрешностей вычислений) экспериментальным данным в различных регионах континентов. Под океанами ситуация в настоящее время остается неопределенной преимущественно за счет расхождения экспериментальных данных различных авторов.

Ключевые слова: *сейсмика, мантия, адвекционно-полиморфная гипотеза, продольные сейсмические волны.*

В работе представлен фрагмент проводимого автором исследования скоростных разрезов верхней мантии различных регионов Земли. Его результатом должен стать, в частности, контроль используемой адвекционно-полиморфной гипотезы глубинных процессов (АПГ). Процедура контроля подробно описана в [1], здесь отметим только, что она состоит из: 1) построения схемы глубинного процесса в изучаемом регионе; 2) расчета тепловой модели верхней мантии, по которой определяется скоростная модель; 3) сопоставления последней с экспериментально установленной. Успешным считается совпадение без подбора двух скоростных (V_p) разрезов в рамках реальных погрешностей обоих. В частности, такая работа проделана для океанов [2]. Согласование было достигнуто, однако, только для верхней мантии. Наличие скоростной границы на кровле мантийной переходной зоны (КМПЗ) использованным методом не определяется. Поэтому автор счел необходимым специально рассмотреть положение КМПЗ, отвечающее гипотезе, и сравнить его с экспериментально установленным в различных по геологической истории регионах.

Сведения о расположении и структуре КМПЗ. Изучению переходной зоны сегодня уделяется очень большое внимание. Годовое количество публикаций по проблеме увеличи-

лось на порядок в последние 20 лет прошлого века. Все больше становится ясной сложность КМПЗ, которая в скоростных моделях до сих пор часто представляется упрощенно как отражающая граница со скачком скорости около 0,6 км/с.

Кровля — явно не резкая граница. Сведения о ее толщине весьма разнообразны. По данным [3] она не превышает 5 км. По данным других источников она составляет 10 км [4] и 35 км [5]. Кроме того, показано, что мощность КМПЗ под континентами на 14 км больше, чем под океанами [6]. Согласно [7], где для исследования объекта была развернута специальная сеть пунктов наблюдения, результаты изучения раздела определяются плотностью сети сейсмостанций и возможностью изучения широкого спектра колебаний. Кровля на сравнительно небольшой территории диагностируется в диапазоне глубин около 20 км. Переход изменяет скорость на величину от 0,4 до 0,6 км/с, причем нельзя сказать, что он представляет собой серию ступеней, есть и фрагменты плавных изменений. Установлены признаки расщепления границы, изменения ее глубины и характера на незначительных расстояниях. Тем не менее полученную информацию можно уверенно интерпретировать как скоростной скачок, вызванный преобразованием минералогии пород верхней мантии.

Вариации глубины кровли по данным единичной сейсмостанции в Африке (одном из наиболее изученных в интересующем нас смысле регионов) составляют 13 км. В целом на континенте (где представлены в основном платформы, зоны современной активизации и рифты) изменения глубины раздела происходят в рамках 410—470 км [7].

Создается впечатление, что на достигнутом уровне изученности КМПЗ — сложный объект, глубина которого определяется со значительной погрешностью. По данным [4] она составляет около 15 км, в других источниках приводятся сопоставимые величины.

Оценки глубины КМПЗ по тепловым моделям. При определении глубины кровли расчетным путем тоже возникают значительные проблемы. Очевидна зависимость параметра от РТ-условий и состава пород. В составе основную роль играет железистость оливина. Автором она принята на уровне 13 %. Тем не менее для примерно того же состава в разных публикациях [2 и др.] приводятся заметно отличные модели (рис. 1), хотя наклон кривой Клайперона во всех случаях близок. Можно предположить использование несколько различающихся данных лабораторных экспериментов.

Величина скачка скорости Р-волн на КМПЗ лимитируется свойствами минералов до и после полиморфного преобразования. Около 60 % породы составляет оливин, при изменении его структуры от α -фазы к β -фазе скорость увеличивается на 0,6 км/с (рис. 2). Параллельно с увеличением глубины (давления) и температуры завершается преобразование пироксенов (преимущественно клинопироксена) в гранаты (преимущественно в мейджорит). Скорость в объеме примерно 10 % породы возрастает на 0,9 км/с. Т. е. общее увеличение V_p составляет около 0,45 км/с. Поэтому приводимая в некоторых скоростных моделях величина 0,7 км/с представляется избыточной.

Следует отметить, что рассматривается только перидотитовый парагенезис. Эклогитовый вариант на этих глубинах представляется автору маловероятным. В случае же его реальности переход будет представлен образованием мейджорита по клинопироксену в несколько большем интервале глубин. Скачок скорости заметно возрастет.

Приведенная схема процесса перехода предполагает существенные изменения глубины КМПЗ при активном теплопереносе и в периоды относительного покоя и сглажи-

Рис. 1. Расчетные глубины кровли мантийной переходной зоны для разных температур. 1 – зависимость, использованная автором; 2–4 – зависимости, применяемые в других моделях. Здесь и на рис. 3 *a–d* – диапазоны расчетных (по АПГ) температур у подошвы верхней мантии при разных эндогенных режимах на континентах; *a* – платформа перед активизацией; *b* – завершающий этап развития геосинклинали и рифта; *c, d* – одноактная активизация с двухэтажной (*c*) и одноэтажной (*d*) адвекцией

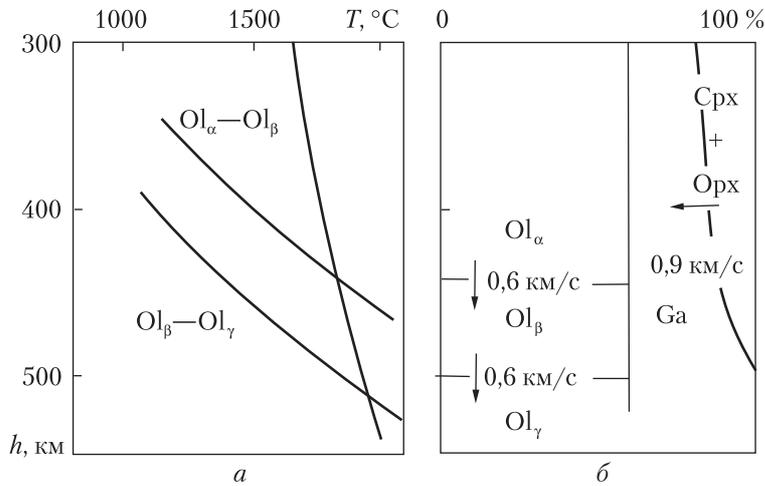
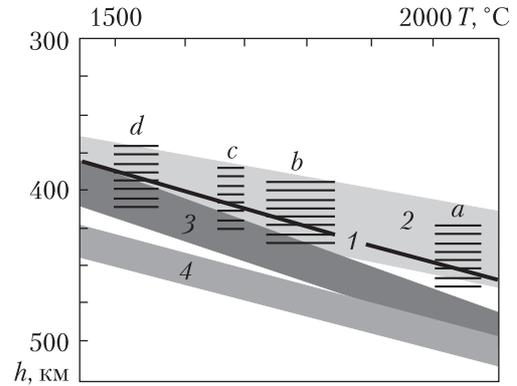


Рис. 2. Тепловая модель низов верхней мантии (*a*) и схема преобразования минерального состава для постгеосинклинальной фазы (*b*). Стрелками показаны направления увеличения скорости при полиморфном переходе минерала. Ol – оливин (13 % фаялита), Ga – гранат, Cpx, Opx – клино- и ортопироксены

вания тепловых аномалий. Тем не менее в большинстве современных скоростных томографических моделей мантии соответствующая граница априорно размещается на 410 км. Факты ее смещения в действительности на десятки километров установлены во многих исследованиях, проведенных на континентах и океанах [4, 7 и др.] во всех случаях, когда глубина действительно определяется экспериментально. Таким образом, закладываются основы для выявления ложных аномалий разного знака по сравнению с референтной моделью.

Диапазон расчетных по АПГ глубин КМПЗ составляет 380–460 км (см. рис. 1). Максимальное значение относится к длительно существующей неактивной платформе перед активизацией. В этот период у подошвы верхней мантии уже сформировался очаг частичного плавления, но тепломассоперенос еще не начался. По имеющимся данным невозможно определить, насколько распространены такие фрагменты платформ. Очевидно лишь, что они не могут существовать геологически длительное время. Минимальная глубина КМПЗ соответствует моменту одноактного тепломассопереноса в мантии под платформой в случае, когда глубинное вещество поступает непосредственно под кору (одноэтажный тепломассоперенос). Возникшая у КМПЗ отрицательная тепловая аномалия вначале довольно быстро сокращается (в том числе и за счет экзотермичности процесса уплотнения пород мантии), поэтому едва ли такие участки платформ широко распространены. Впрочем, быстрое сокращение аномалии заметно проявляется через 10 и более млн лет после акта теп-

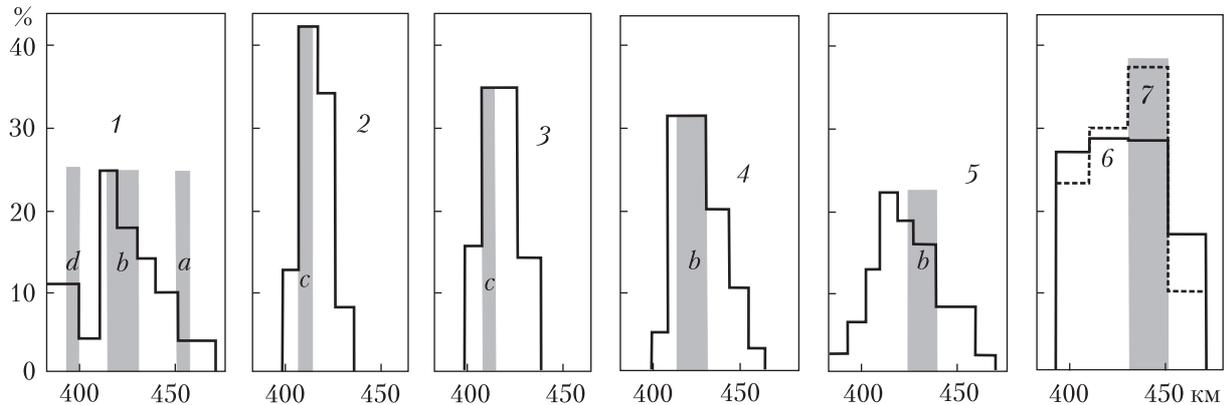


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных глубин КМПЗ в различных регионах. 1–3 – платформы Африканская (1), Северо-Американская (2), Восточно-Европейская (3); 4 – альпийский рифт провинции Бассейнов и Хребтов (Северная Америка); 5 – альпийские геосинклинали Тихоокеанского кольца; 6 – срединно-океанические хребты; 7 – океанические котловины

ломассопереноса. А многие зоны современной активизации существуют 3–5 млн лет. Возможно, в этом случае нужно учесть также и темп полиморфного преобразования вещества, но этот параметр в настоящее время для условий на глубине 400 км неизвестен.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Экспериментальных данных о глубине КМПЗ немного, автору удалось собрать около 300 значений параметра [9–15 и др.].

Континентальные платформы представлены Африканской, Северо-Американской и Восточно-Европейской. Первая характеризуется наиболее широким спектром значений глубин КМПЗ. Это не удивительно, так как геологическая информация свидетельствует о широком распространении в ее пределах молодой одноэтажной активизации и рифтогенеза. Возможно, активизации представлены обоими типами (одноэтажной и двухэтажной адвекцией). Не вызывает сомнений молодая (плиоцен-четвертичная) активизация изученного фрагмента Северо-Американской платформы – Великих равнин восточнее Скалистых гор. Для Восточно-Европейской платформы такой вывод менее обоснован. Хорошо изучены зоны молодой активизации платформенной части Украины, занимающие около половины ее площади. Известны обширные области повышенного теплового потока (Прибалтика, Прикаспий, Поволжье, Приуралье и др.) и нефтегазонасности на платформенной части Европейской России. Поэтому сопоставление экспериментальной информации с использованными расчетными данными и в этом случае кажется обоснованным.

Почти полностью отсутствуют экспериментально установленные глубины КМПЗ, отвечающие расчетным для платформы перед активизацией (рис. 3). Дело в том, что на Африканской и Северо-Американской платформах должны были бы встречаться участки, готовые к активизации, но еще не начавшие ее, и они могут быть очень незначительными по площади. В обоих случаях повсеместно распространены значительные отметки рельефа, высокий тепловой поток, проявления молодого магматизма в Африке. На Восточно-Европейской платформе таких очевидных проявлений нет, но комплексное геолого-геофизическое исследование территории Украины показывает, что активизация возможна и без них. А на значительной части Восточно-Европейской платформы с аномально низким

тепловым потоком условия для активизации в настоящее время еще отсутствуют. Т. е. определение максимально глубокой границы по имеющимся данным маловероятно, нужна дополнительная информация.

В целом соответствие экспериментальных и расчетных значений глубин КМПЗ для платформ при очевидных источниках погрешностей можно признать удовлетворительным, расхождения средних величин не превышают ошибок.

То же можно сказать и об изученных рифте провинции Бассейнов и Хребтов в Северной Америке и геосинклиналях Тихоокеанского кольца. Принадлежность регионов к названным типам эндогенного режима не вызывает сомнений, расчетные глубины близки экспериментально установленным.

Ситуация под океанами не определена. Приведенное на рис. 3 сравнение расчетных и экспериментальных значений глубины КМПЗ говорит об их примерном соответствии. Но расчетные значения не включают варианта тепловой модели, который мог бы появиться после активизации мантии котловин с образованием молодых абиссальных холмов, а не срединно-океанических хребтов. С другой стороны, известны экспериментальные данные для тех же районов, сведения по которым приведены на рис. 3, с существенно иными значениями глубины [4, 10 и др.].

Таким образом, результаты проведенного исследования глубин расположения кровли мантийной зоны минеральных преобразований показывают, что несмотря на повышенное внимание, уделяемое изучению этого объекта в последние десятилетия, в его поведении остаются значительные неопределенности. Все же можно сделать вывод, что имеющиеся представления о природе этой границы верны. Известные данные о ней не противоречат схемам глубинных процессов, вытекающим из общих положений адвекционно-полиморфной гипотезы. Количественное согласование расчетных и экспериментальных величин в рамках погрешностей достигается.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Gordienko V. Essential points of the advection-polymorphism hypothesis. *NCGT Journal*. 2015. **3**, № 2. P. 115–137.
2. Gordienko L., Gordienko V. P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NCGT Journal*. 2016. **4**, № 3. P. 389–405.
3. Yamazaki A., Hirahara K. The thickness of upper mantle discontinuities, as inferred from short-period J-array data. *Geophys. Res. Lett.* 1994. **21**, № 17. P. 1811–1814.
4. Flanagan M., Shearer P. A map of topography on the 410-km discontinuity from PP precursors. *Geophys. Res. Lett.* 1999. **26**, № 5. P. 549–552.
5. Priestley K., Cipar J., Egorkin A., Pavlenkova N. Upper-mantle velocity structure beneath Siberian platform. *Geophys. J. Int.* 1994. **118**. P. 309–378.
6. Gossler J., Kind R. Seismic evidence for very deep roots of continents. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. **138**. P. 1–13.
7. Melbourne T., Yelmerger D. Fine structure of the 410-km discontinuity. *J. Geophys. Res.* 1998. **103**. № B5. P. 10091–10102.
8. Frost D.J. The upper mantle and transition zone. *Elements*. 2008. **4**. P. 171–176.
9. Gu Y.J., Zhang Y., Sacchi M.D., Chen Y., Contenti S. Sharp mantle transition from cratons to Cordillera in southwestern Canada. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2015. **120**, P. 5051–5069.
10. Houser C., Williams Q. Reconciling Pacific 410 and 660 km discontinuity topography, transition zone shear velocity patterns, and mantle phase transitions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. **296**. P. 255–266.

11. Julia J., Nyblade A. Probing the upper mantle transition zone under Africa with P520s conversions: Implications for temperature and composition. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. **368**. P. 151–162.
12. Świeczak M., Grad M., TOR and SVEKALAPKO Working Groups. Upper mantle seismic discontinuities topography variations beneath eastern Europe. *Acta Geophys. Pol.* 2004. **52**, № 3. P. 251–270.
13. Tauzin B., Debayle E., Wittlinger G. Constraints on the mantle transition zone structure from P-to-Sv converted waves. URL: <http://www.mantleplumes.org/TransitionZone3.html>
14. Tauzin B., van der Hilst R.D., Wittlinger G., Ricard Y. Multiple transition zone seismic discontinuities and low velocity layers below western United States. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2013. **118**. P. 2307–2322.
15. Thomas C., Billen M.I. Mantle transition zone structure along a profile in the SW Pacific: Thermal and compositional variations. *Geophys. J. Int.* 2009. **176**, Iss. 1. P. 113–125.

Поступило в редакцию 22.11.2017

REFERENCES

1. Gordienko, V. (2015). Essential points of the advection-polymorphism hypothesis. *NCGT Journal*, No. 2, pp.115-137.
2. Gordienko, L. & Gordienko, V. (2016). P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NCGT Journal*. 4, No. 3, pp. 389-405.
3. Yamazaki, A. & Hirahara, K. (1994). The thickness of upper mantle discontinuities, as inferred from short-period J-array data. *Geophys. Res. Lett.*, 21, No. 17, pp. 1811-1814.
4. Flanagan, M. & Shearer, P. (1999). A map of topography on the 410-km discontinuity from PP precursors. *Geophys. Res. Lett.*, 26, No. 5, pp. 549-552.
5. Priestley, K., Cipar, J., Egorkin, A. & Pavlenkova, N. (1994). Upper-mantle velocity structure beneath Siberian platform. *Geophys. J. Int.* 118, pp. 309-378.
6. Gossler, J. & Kind, R. (1996). Seismic evidence for very deep roots of continents. *Earth Plan. Sc. Lett.*, 138, pp. 1-13.
7. Melbourne, T. & Yelmerger, D. (1998). Fine structure of the 410-km discontinuity. *J. Geophys. Res.*, 103, No. B5, pp. 10091-10102.
8. Frost, D. J. (2008). The upper mantle and transition zone. *Elements*. 4, pp. 171-176.
9. Gu, Y. J., Zhang, Y., Sacchi, M. D, Chen, Y. & Contenti, S. (2015). Sharp mantle transition from cratons to Cordillera in southwestern Canada. *J. Geophys. Res. Solid Earth.*, 120, pp. 5051-5069.
10. Houser, C. & Williams, Q. (2010). Reconciling Pacific 410 and 660 km discontinuity topography, transition zone shear velocity patterns, and mantle phase transitions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 296, pp. 255-266.
11. Julia, J. & Nyblade, A. (2013). Probing the upper mantle transition zone under Africa with P520s conversions: Implications for temperature and composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 368, pp. 151-162.
12. Świeczak, M., Grad, M., TOR & SVEKALAPKO Working Groups. (2004). Upper mantle seismic discontinuities topography variations beneath eastern Europe. *Acta Geophys. Pol.*, 52, No. 3, pp.251-270.
13. Tauzin, B., Debayle, E. & Wittlinger, G. Constraints on the mantle transition zone structure from P-to-Sv converted waves. Retrieved from <http://www.mantleplumes.org/TransitionZone3.html>
14. Tauzin, B., van der Hilst, D., Wittlinger, G. & Ricard, Y. (2013). Multiple transition zone seismic discontinuities and low velocity layers below western United States. *J. Geophys. Res. Solid Earth.*, 118, pp.2307-2322.
15. Thomas, C. & Billen, M. (2009). Mantle transition zone structure along a profile in the SW Pacific: Thermal and compositional variations. *Geophys. J. Int.*, 176, Iss. 1, pp.113-125.

Received 22.11.2017

V.V. Гордієнко

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

ГЛИБИНА ПОКРІВЛІ ПЕРЕХІДНОЇ ЗОНИ МІЖ ВЕРХНЬОЮ ТА НИЖНЬОЮ МАНТІЄЮ ЗЕМЛІ

Проведено зіставлення експериментальних та розрахованих значень глибини покрівлі перехідної зони між верхньою та нижньою частинами мантиї Землі. Доведено, що ця межа відповідає початку поліморфних перетворень мантийних порід. Оцінено величину стрибка швидкості поздовжніх сейсмічних хвиль на рівні

0,45 км/с. Вивчено зміни глибини покрівлі внаслідок варіацій температури під впливом активного тепломасопереносу за схемою адвекційно-поліморфної гіпотези. Показано приблизну відповідність результатів (у межах похибок обчислень) експериментальним даним у різних регіонах континентів. Під океанами ситуація на даний час лишається невизначеною переважно за рахунок розбіжності експериментальних даних різних авторів.

Ключові слова: *сейсміка, мантія, адвекційно-поліморфна гіпотеза, поздовжні сейсмічні хвилі.*

V.V. Gordienko

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

E-mail: gordienkovadim39@gmail.com

THE ROOF DEPTH OF THE TRANSITION ZONE BETWEEN UPPER AND LOWER EARTH'S MANTLE

The experimental and calculated values of the roof depth of the transition zone between the upper and lower mantle of the Earth are compared. It is proved that this boundary corresponds to the beginning of polymorphic transformations of mantle's rocks. The magnitude of the jump in the velocity of longitudinal seismic waves at a level of 0.45 km/s is estimated. Changes in the depth of the roof due to temperature variations under the influence of the active heat and mass transfer according to the scheme of the advection-polymorphic hypothesis are studied. The approximate correspondence of the results (within the limits of calculation errors) to experimental data in different regions of the continents is demonstrated. Under the oceans, the situation remains uncertain now, mainly due to the differences in the experimental data of different authors.

Keywords: *seismic, mantle, advection-polymorphic hypothesis, longitudinal seismic waves.*