———— СЕЙСМОЛОГИЯ ——

УДК 550.347

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ГРАНИЦ ЗОНЫ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

© 2022 г. А. Г. Гоев^{1,*}

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 01.06.2022 г. Поступило 01.06.2022 г. После доработки 10.06.2022 г. Принято к публикации 17.06.2022 г.

Представлены новые данные о характеристиках зоны фазовых переходов в верхней мантии Кольского полуострова (северо-восточная часть Фенноскандинавского щита) в интервалах глубин 410— 660 км. Исследования выполнены на базе новой площадной сети широкополосных сейсмических станций. Для всех станций выделены обменные волны от границ 410 и 660 км. Зарегистрированы и проанализированы времена вступлений этих фаз. Установлено, что литосфера изучаемого региона имеет повышенные сейсмические скорости относительно глобальной модели IASP91. Впервые для данного региона выявлена фаза, которая может означать присутствие в верхней мантии слоя пониженных скоростей на глубине порядка 350 км.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит, Кольский полуостров, зона фазовых переходов, функции приемника, обменные волны

DOI: 10.31857/S2686739722600928

По мере развития мировой сети сейсмических станций было показано, что некоторые наиболее важные геодинамические особенности строения Земли присутствуют повсеместно. Однако их параметры меняются в различных геодинамических обстановках. Одним из таких глобальных слоев является зона фазовых переходов в верхней мантии [1, 2]. Зоной фазовых переходов в верхней мантии (MTZ) является слой, лежащий на глубинах, близких к 410-660 км. Изучение характеристик этой области имеет важнейшее значение, т.к. она во многом контролирует массоперенос между верхней мантией и нижележащими частями Земли и существенно влияет на конвективные мантийные процессы. Оливин, основной минерал в составе верхней мантии, испытывает фазовый переход в вадслеит при РТ-условиях, существующих на глубине, близкой к 410 км, далее происходит переход в рингвудит на глубине порядка 520 км и в бриджманит на глубине около 660 км [3]. Каждый из фазовых переходов сопровождается изменением кристаллической структуры вещества с увеличением плотности, особенно заметной для переходов на глубинах 410 и 660 км.

Этот фактор, влияющий на скоростные характеристики среды, делает сейсмологические методы основными при изучении этих границ.

Глубины залегания границ 410 и 660 км, а также мощность МТZ, варьируются для различных регионов и даже в пределах одного региона. Важным фактором, влияющим на характеристики зоны фазовых переходов, является температурный режим. Так, при погружении в МТZ холодной субдуцирующей литосферы, граница 410 км поднимается вверх, тогда как граница 660 км опускается, в результате чего мощность зоны растет [4]. Вблизи активного плюма наблюдается обратный эффект и мощность зоны МTZ уменьшается. Отметим, что на глубины залегания обсуждаемых границ влияют и иные факторы, такие как содержание флюида и минеральный состав.

В западной и центральной частях Фенноскандинавского щита в рамках многочисленных масштабных проектов (например, ScanArray [5]) по изучению глубинного строения были проведены исследования по определению мощности и иных характеристик зоны фазовых переходов. Эти исследования продемонстрировали существенные изменения мощности MTZ в пределах Фенноскандинавского щита, а также значимую топографию обеих границ. Некоторые аномалии, требующие подтверждения, были продемонстрированы также в районе центральной и северной

¹ Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

^{*}E-mail: andr.goev@gmail.com

частей Кольского полуострова по очень ограниченному набору данных в этом регионе [6].

В данной работе для изучения характеристик зоны фазовых переходов в верхней мантии был использован метод приемных функций, основанный на анализе обменных волн P-S (метод PRF) [7]. При прохождении падающей волны через контрастную сейсмическую границу формируется обменная волна, амплитуда и время вступления которой зависят от характеристик границы и от глубины конверсии соответственно. В частности, для границ 410 и 660 км амплитуда составляет порядка 2-4% от амплитуды первой падающей волны. В качестве источников возбуждения использовались телесейсмические события, находящиеся в диапазоне эпицентральных расстояний 40°-100° (эпицентральные расстояния, соответствующие параметрам луча от 8.2 до 4.4 с/град) и с магнитудой более 5.5. Такие параметры обеспечивают достаточную глубину проникновения луча, а также различимость вступления первой падающей волны. Для дальнейшего анализа отбирались записи с отношением сигнал/шум более 3, а также близкие к импульсной форме вступления первой падающей волны. Последующий процесс расчета PRF стандартизован и включает в себя частотную фильтрацию, переход в лучевую систему координат и деконволюцию. В передоложенном исследовании исходные сейсмограммы фильтровались полосовым фильтром Баттерворта второго порядка с полосой пропускания 5-30 с. Далее, трехкомпонентные записи Р-волн от землетрясения переводились вращением из системы координат (Z, N, E) в лучевую систему координат (L, Q, T), где L – компонента соответствует главному направлению движения в продольной волне, а Q и Т соответствуют SV- и SH- компонентам. Далее осуществлялась стандартизация (деконволюция) L-, Q-, Т-компонент в предположении, что L-компонента является функцией источника, т.е. с точностью до нормирующего коэффициента определяется формой Р-волны, подошедшей к подошве исследуемой структуры под сейсмической станцией, и минимально зависит от самой структуры. То есть L-компонента в результате деконволюции приближается к стандартному импульсному источнику типа дельта функции, а на Q-компоненте выделяются зарегистрированные обменные волны. Полученную таким образом Q-компоненту будем называть индивидуальной PRF.

Для выявления обменных волн от целевых сейсмических границ индивидуальные PRF суммируются с поправками, которые зависят от параметра луча данной падающей волны и глубины границы обмена (строится стек). На практике суммарные трассы рассчитываются для многих предполагаемых глубин конверсии. Все события приводятся к одним значениям параметра луча — 6.4 с/град, а затем для каждой целевой глубины и для каждого события рассчитываются индивидуальные временные поправки, на которые "сдвигается" сейсмограмма перед суммированием. Согласно стандартной модели строения Земли IASP91 [8], обменные волны от границ 410 и 660 км для данного параметра луча должны наблюдаться на сейсмограмме на временах 44 и 67.9 с соответственно [9]. Здесь и далее за 0 принимается время вступления первой продольной волны.

До недавнего времени для исследователей были доступны данные всего двух сейсмических станций в пределах Кольского региона — "Апатиты" (АРА) и "Ловозеро" (LVZ). Однако с 2013 г. в регионе начали развиваться площадные сейсмологические исследования и, к настоящему моменту, сейсмическая сеть включает в себя семь станций, равномерно покрывающих северную и центральную части Кольского полуострова. В представленном исследовании были использованы данные всех станций новой сети, а также данные двух широкополосных станций мировой сети (VADS и VRF), расположенных в регионе исследования (рис. 1).

Станции сети были открыты в различное время, преимущественно в последние 2-3 года, что повлияло на количество рассчитанных PRF (табл. 1). Так, наиболее представительные выборки получены для станций LVZ, APA и TER, а также по данным станции международной сети - VRF (рис. 2). Для набора индивидуальных PRF по данным каждой из станций строились стеки, по которым определялись времена вступлений и амплитуды фаз, характеризующие границы 410 и 660 км. Основным критерием выделения целевых фаз являются времена вступления, близкие к 44 и 68 с, а также "фокусировка", т.е. наблюдение максимальной амплитуды на суммированных трассах стека, отвечающих ожидаемым глубинам 410 и 660 км.

На стеках, построенных по данным каждой из сейсмических станций новой сети, выделяются положительные фазы, отвечающие границам 410 и 660 км. Целевые фазы хорошо выделяются и фокусируются на трассах стеков, соответствующих ожидаемым глубинам. Наблюденные значения времен вступлений обменных волн от границ 410 и 660 км, а также их амплитуд и суммарное количество индивидуальных PRF, зарегистрированных по данным каждой из сейсмических станций, приведены в табл. 1. Кроме того, по данным всех станций, за исключением сейсмической станции VTUL, выделяется значимая отрицательная фаза, предшествующая волне P_{410s} и имеющая амплитуду, соотносимую с амплитудой обменной волны от границы 410 км.

Зарегистрированные времена вступлений обменных волн от границ фазовых переходов для



Рис. 1. Тектоническая схема Кольского полуострова по [10]. Красными треугольниками показаны использованные широкополосные сейсмические станции.

всех станций демонстрируют меньшие времена вступлений относительно значений, соответствуюших стандартной скоростной модели Земли IASP91 (44 с для границы 410 км и 67.9 с для границы 660 км). Этот эффект может быть объяснен либо меньшими, нежели 410 и 660 км, глубинами залеганий анализируемых границ, либо более высокоскоростной верхней мантией и литосферой над границей 410 км. В данном случае мы предполагаем справедливость второго объяснения. Оно подтверждается независимыми исследованиями литосферы Кольского региона, которые выявили повышенные, относительно глобальной модели, скорости в земной коре и верхней мантии [11]. Кроме того, как уже отмечалось, основным фактором, влияющим на глубину фазового перехода, является распределение температуры в низах верхней мантии [4]. Для синхронного поднятия обеих границ необходимо, чтобы граница 410 км испытывала остывание, тогда как граница 660 км – нагрев. На данный момент нет никаких свидетельств того, что в мантии исследуемого региона может наблюдаться настолько аномальный тепловой режим [12]. Существуют и другие факторы, влияющие на глубины залегания анализируемых границ – присутствие флюида и особенности минерального состава [4], однако у нас также нет оснований считать их вклад значимым для данного региона.

Отдельного внимания заслуживает разность зарегистрированных времен вступлений обменных волн от границ 410 и 660 км. На всех станциях, с учетом ошибок определения времен, не превышающих 0.2 с, она близка к стандартной отно-

Код станции	PRF	t ₄₁₀	t _{набл} — t _{IASP91}	A ₄₁₀	t ₆₆₀	$t_{\rm набл} - t_{\rm IASP91}$	A ₆₆₀	$t_{660} - t_{410}$
VADS	85	43.1	-0.9	0.022	66.8	-1.1	0.030	23.7
TER	59	43.4	-0.6	0.018	67.2	-0.7	0.022	23.8
NIK	36	42.7	-1.3	0.020	66.6	-1.3	0.018	23.9
VRF	243	43.0	-1.0	0.025	66.7	-1.2	0.021	23.7
VTUL	11	44.0	0	0.020	66.5	-1.4	0.030	22.5
APA	232	43.7	-0.3	0.032	68	0.1	0.034	24.3
LVZ	220	43.5	-0.5	0.022	67	-1.0	0.022	23.5
KVDA	28	43.5	-0.5	0.021	_	_	_	_

Таблица 1. Наблюденные значения времен вступлений обменных волн от границ 410 и 660 км, а также их амплитуд и суммарное количество индивидуальных PRF для каждой сейсмической станции

ГОЕВ



Рис. 2. Стеки, полученные суммированием индивидуальных PRF по данным станций LVZ (a), VRF (6), TER (в) и APA (г). Показаны вступления обменных волн от границ 410 км (P_{410s}) и 660 км (P_{660s}). На всех стеках выделяются отрицательные фазы, вероятно, связанные с границей на глубине порядка 350 км.

сительно модели IASP91. Тем самым наши измерения не подтверждают вывод об уменьшении мощности MTZ в районе исследования, показанный в работе [6]. Такое несоответствие в результатах может объясняться тем, что Кольский регион находится на окраине Фенноскандинавского щита и авторы цитируемой работы испытывали недостаток локальных данных. Наши оценки подтверждаются данными аналогичной работы, выполненной по суммированным данным станций LVZ и APA [13].

Из теоретических расчетов известно, что на границах, отвечающих повышению и понижению сейсмических скоростей, формируются обменные волны, регистрирующиеся с амплитудами различных знаков (например, [14]). В выбранной нами системе координат повышению скоростей соответствует обменная волна положительной амплитуды, а понижению – отрицательной. На стеках данных всех станций регистрируется четкая отрицательная фаза с амплитудой, близкой к 0.15, фокусирующаяся на трассах стеков, отвечающих глубинам порядка 320 км (рис. 2). Времена ее вступлений близки к 39 с, что соответствует глубине порядка 350 км. Данная фаза может указывать на наличие в исследуемом регионе слоя пониженных скоростей в верхней мантии. Заметим, что при применении метода функций приемника наличие этой фазы также отмечалось для Индийского щита [15], Срединно Атлантического хребта [16] и Центральной Турции [17].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке "Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира".

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (грант № 21-17-00161) и в соответствии с темой НИР № 122040400015-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary reference Earth model // Phys. Earth Planet. Inter. 1981. V. 25. № 4. P. 297–356.
- Wajeman N. Detection of underside P reflections at mantle discontinuities by stacking broadband data // Geophys. Res. Lett. 1988. V. 15. № 7 P. 669–672.
- 3. *Ringwood A. E.* Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 2083–2110.
- Helffrich G. Topography of the transition zone seismic discontinuities // Rev. Geophys. 2000. V. 38. № 1. P. 141–158.
- Thybo H., Bulut N., Grund M., Mauerberger A., Makushkina A., Artemieva I. M., Balling N., Gudmundsson O., Maupin V., Ottemøller L., Ritter J., Tilmann F., ScanArray – A Broadband Seismological Experiment in the Baltic Shield. // Seismological Research Letters. 2021. V. 92. № 5. P. 2811–2823.
- 6. *Makushkina A., Tauzin B., Tkalcic H., Thybo H.* The mantle transition zone in Fennoscandia: Enigmatic high topography without deep mantle thermal anomaly // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. P. 3652–3662.
- Винник Л. П. Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16–27.
- Kennett B.L.N., Engdahl, E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophys. J. Int. 1991 V. 105. P. 429–465.

- 9. Бурмаков Ю.А., Винник Л.П., Косарев Г.Л. и др. Структура и динамика литосферы по сейсмическим данным. М.: Наука. 1988. 221 с.
- Мудрук С.В., Балаганский В.В., Горбунов И.А., Раевский А.Б. Альпинотипная тектоника в палеопротерозойском Лапландско-Кольском орогене // Геотектоника. 2013. № 4. С. 13–30.
- Павленкова Г.А., Павленкова Н.И. Результаты совместной обработки данных ядерных и химических взрывов по сверхдлинному профилю "Кварц" (Мурманск-Кызыл) // Физика Земли. 2008. № 4. С. 62–73.
- Waszek L., Tauzin B., Schmerr N.C., Ballmer M.D., Afonso J.C. A poorly mixed mantle transition zone and its thermal state inferred from seismic waves // Nature Geoscience. 2021. V. 14. P. 949–955.
- 13. Dricker I.G., Roecker S.W., Kosarev G.L., Vinnik L.P. Shear wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath the Kola peninsula // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. № 23. P. 3389–3392.
- 14. Гоев А.Г., Косарев Г.Л., Ризниченко О.Ю., Санина И.А. Скоростная модель западной части Волго-Уралии методом функции приемника // Физика Земли. 2018. № 6. С. 154–169.
- Kosarev G.L., Oreshin, S.I., Vinnik L.P., Kiselev S.G., Dattatrayam R.S., Suresh G., Baidya P.R. Heterogeneous lithosphere and the underlying mantle of the Indian subcontinent // Tectonophysics. 2013. V. 592. P. 175–186.
- Agius M.R., Rychert C.A., Harmon N., et al. A thin mantle transition zone beneath the equatorial Mid-Atlantic Ridge // Nature. 2021. V. 589. P. 562–566.
- Erduran M., Oreshin S., Vinnik L., et al. Mantle lithosphere, asthenosphere and transition zone beneath Eastern Anatolia // J. Seismol. 2022. V. 26. P. 265–281.

ON SOME FEATURES OF THE KOLA PENINSULA MANTLE TRANSITION ZONE

A. G. Goev^{*a*,#}

^a Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

#E-mail: andr.goev@gmail.com

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin June 1, 2022

New data are presented on the characteristics of the upper mantle transition zone of the Kola Peninsula (the northeastern part of the Fennoscandian shield) in the depth of about 410–660 km. The studies were carried out on the basis of a new broadband seismic network. Converted waves from the boundaries of 410 and 660 km were identified for all stations. The arrival times of these phases are recorded and analyzed. It has been established that the lithosphere of the studied region has some higher seismic velocities relative to the IASP91 global model. For the first time, a phase has been identified for this region, which may indicate the presence of a layer of lower velocities in the upper mantle at a depth of about 350 km.

Keywords: Fennoscandian Shield, Kola Peninsula, mantle transition zone, receiver functions, converted waves