ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Скоростное строение земной коры и верхней мантии Печенгского рудного района и сопредельных территорий в северо-западной части Лапландско-Кольского орогена методом функций приемника

А.Г.Гоев

Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского РАН, Москва, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Гоев А.Г. Скоростное строение земной коры и верхней мантии Печенгского рудного района и сопредельных территорий в северо-западной части Лапландско-Кольского орогена методом функций приемника // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 188-198. EDN NZMXJC

Аннотация. Представлено исследование земной коры и верхней мантии Печенгского рудного района, а также сопредельных территорий северо-западной части Кольского региона. Методом функций приемника, по данным новой и двух постоянных широкополосных сейсмических станций получены одномерные модели распределения сейсмических скоростей до глубины 300 км. Станции расположены в северных частях Финляндии и Норвегии, а также в Печенгском районе Российской Федерации. Несмотря на близкое (не более 100 км) расположение станций скоростные модели существенно разнятся, что свидетельствует о гетерогенности строения литосферы. Так для станции, расположенной в Финляндии, выявлен градиентный коро-мантийный переход, не прослеживающийся в двух других моделях. На глубинах около 150 км обнаружена зона пониженных скоростей, связанная со средне-литосферной неоднородностью, которая не обнаружена под Печенгским рудным районом. Также в строении земной коры Печенгского района выявлены аномально высокие значения параметра *Vp*/*Vs* до глубины около 20 км. С учетом того, что сейсмическая станция установлена в непосредственной близости от крупнейших медно-никелевых месторождений, эта аномалия может интерпретироваться как реликт протерозойской плюмовой активности.

***Ключевые слова*:** Кольский п-ов; Лапландско-Кольский ороген; литосфера; мантия; метод функции приемника; рудоносность; плюм

Благодарность. Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда, грант № 21-17-00161, кроме обзора тектонической истории всего Фенноскандинавского щита, осуществленного в соответствии с темой 122040400015-5.

Поступила: 31.05.2023 ***Принята: 27.12.2023*** ***Онлайн: 09.04.2024*** ***Опубликована: 25.04.2024***

Введение. Фенноскандинавский (Балтийский) щит – один из самых хорошо изученных докембрийских регионов Земли. Его основная, центральная, часть сформировалась в палеопротерозойское время – Свекофенская провинция (1,8-2,0 млрд лет назад) и Трансскандинавский изверженный пояс (1,6-1,8 млрд лет назад). Кроме того, на его юго-западной оконечности находится Свеконорвежский пояс возрастом 0,9-1,2 млрд лет [1]. Наиболее древние архейские породы обнажаются в северо-восточной части щита на территории Кольского п-ова, который, в свою очередь, состоит из трех основных тектонических элементов – Мурманского, Кольского и Беломорского блоков (Кольский и Беломорский блоки совместно с более мелкими Умбинско-Терским и Стрельнинским террейнами некоторыми исследователями объединяются в Лапландско-Кольский ороген [2]). Расположение основных тектонических элементов приведено на рис.1. Таким образом, в структуре Фенноскандинавского щита проявляется явная тенденция к «удревнению» пород с запада на восток, что совместно с отсутствием осадочного чехла делает его удобным полигоном для изучения эволюции Земли.

Лапландско-Кольский ороген (ЛКО), занимающий центральную часть Кольского п-ова, заключен между Мурманским блоком на севере и Карельским блоком на юге. Он представляет собой хорошо экспонированный участок щита, обнажающий все важнейшие тектонические элементы,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 188-198
© А.Г.Гоев, 2024

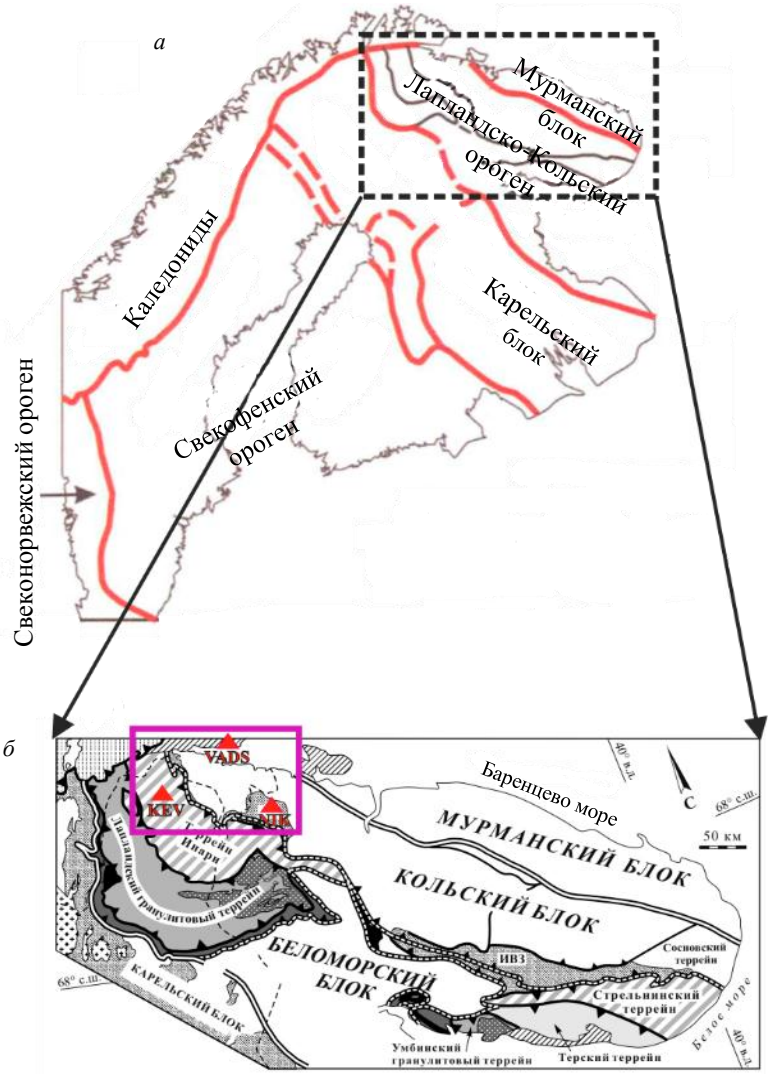


Рис.1. Тектоническая схема Фенноскандинавского щита по [3, 4] (*а*) и детальная тектоническая схема Кольского региона по [4, 5] (*б*). Красными треугольниками отмечено положение использованных в данной работе сейсмических станций VADS, NIK и KEV; фиолетовым прямоугольником показан регион исследования

тем самым обеспечивая понимание закономерностей геодинамических процессов с неоархейского до палеопротерозойского возрастов. ЛКО был центром крупных плюмовых процессов в позднем неоархее и до палеопротерозойского периода [6-8], что привело к рифтогенезу и распаду суперконтинента Кенорланд [9-12], а затем к образованию океанической коры, субдукции и генерации палеопротерозойской ювенильной континентальной коры [13, 14]. Кроме того, ЛКО известен обилием крупных месторождений никелевых и железных руд, апатита, платины, палладия, титана, бадделеита и т.д.

В статье представлены новые сейсмологические результаты исследований строения литосферы северо-западной части ЛКО, особое внимание уделено находящемуся в этой зоне Печенгскому рудному району и расположенной в нем сейсмической станции «Никель» (NIK). Повышенный интерес к исследованиям этой области вызван не только возможностью решения широкого комплекса фундаментальных научных задач, но и наличием одного из крупнейших сульфидных медно-никелевых месторождений.

Первые исследования глубинного строения Печенгского района были начаты в 1960-1963 гг. под руководством И.В.Литвиненко (Ленинградский горный институт) с помощью метода глубинного сейсмического зондирования по профилю Баренцево море – Печенга – Ловно и позднее были продолжены многими учеными [15]. Кроме того, в рамках Печенгской структуры был уникальный

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

эксперимент по сверхглубокому бурению скважины СГ-3, вскрывшей породы земной коры до глубины 12262 м, позволивший верифицировать результаты косвенных геофизических исследований прямыми наблюдениями. По мере накопления новых данных и изменения представлений об эволюции Земли менялись и представления о развитии Печенгской структуры и процессе генезиса месторождений полезных ископаемых. Согласно одной из наиболее современных концепций, их генерация связывается с плюмовым палеопротерозойским процессом, способствовавшим поднятию к поверхности недеплетированного материала примитивных магм, следы которых можно обнаружить и в настоящее время [16, 17].

Методы. Для получения глубинных скоростных разрезов в работе был применен метод функций приемника (Receiver function, RF). В его основе лежит использование обменных волн, формирующихся на контрастных сейсмических границах в районе сейсмической станции, при прохождении через них колебаний от удаленных сейсмических событий. Эти волны характеризуют ту часть среды, в которой они были сформированы. Таким образом, получаемые с применением RF результаты можно эффективно локализовать и интерпретировать путем расчета мест формирования обменных волн (или «точек обмена») на интересующих глубинах.

Метод разделяется на две составляющие по типам используемых обменных фаз – *P*-функцию приемника (или PRF), которая основывается на анализе обменных и кратных волн *P-S* (*Ps*), и, соответственно, *S*-функцию приемника (или SRF), построенную на обменных и кратных волнах *S-P* (*Sp*). Их совместное моделирование позволяет получить устойчивый скоростной разрез земной коры и верхней мантии [18, 19].

Для получения функций приемника был использован подход, многократно апробированный и детально описанный в литературе [20]. Наиболее важные аспекты методики: на первом этапе сейсмические события отбирались в соответствии с эпицентральными расстояниями; для анализа PRF использовались события, находящиеся в диапазоне расстояний 30-100°, для SRF – в диапазоне расстояний 65-100°. Для получения параметров анализируемых событий (времени в очаге, глубины и координат) использовался каталог CMT (Global Centroid Moment Tensor Catalog) [21, 22]. Кроме того, ввиду существенной удаленности очагов событий от станции, землетрясения магнитудой менее 5,5 не рассматривались. Для дальнейшего анализа отбирались события с импульсной формой колебания первой падающей волны (*P* для PRF и *S* для SRF) и высоким (более 3) отношением сигнал/шум. Сейсмограмма каждого отобранного события фильтровалась (в работе использован фильтр Баттерворта второго порядка с граничным периодом 5 с для получения PRF и 8 с при расчете SRF), после чего проводился переход из трехкомпонентной системы координат *ZNE* в лучевую систему координат *LQT* для PRF и *LAB* – для SRF. В лучевой системе координат *LQT* компонента *L* соответствует направлению колебаний в падающей *P*-волне, *Q* – перпендикулярна *L* в плоскости *P-SV*, *T* – ортогональна плоскости *LQ*. В системе координат *LAB* компонента *L* соответствует направлению выхода падающей волны, *A* – направлению поляризации *S*-волны, *B* – ортогональна *L* и *A*. Для стандартизации записей и минимизации влияния особенностей очагового процесса, к индивидуальным функциям приемника применялась деконволюция в предположении, что *L*- и *A*-компоненты в PRF и SRF с точностью до нормирующего коэффициента определяются формой падающей волны и минимально зависят от параметров среды. В процессе деконволюции подбирался фильтр, который приближает наблюдаемые волновые формы на *L*- и *A*-компонентах к импульсной форме типа дельта-функции.

Для выявления обменных волн от исследуемых сейсмических границ в земной коре и верхней мантии индивидуальные функции приемника суммировались. Причем механизм суммирования для PRF и SRF различается. В первом случае индивидуальные записи суммировались с поправками, которые зависят от параметра луча данной падающей волны и глубины границы обмена (строился стек). Все события приводились к одним значениям параметра луча – 6,4 с/град, а затем для каждой целевой глубины и для каждого события рассчитывались индивидуальные временные поправки, на которые «сдвигалась» сейсмограмма перед суммированием. Суммарные трассы рассчитывались для многих предполагаемых глубин конверсии. SRF суммировались с учетом весовых коэффициентов за уровень шума на каждой из трасс и за отклонение поляризации падающей *S*-волны от плоскости *P-SV*, а также относительно референтного (обычно среднего по всем зарегистрированным индивидуальным записям) эпицентрального расстояния. Подробно способ расчета этих коэффициентов приведен в работе [23].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 188-198
© А.Г.Гоев, 2024

Для расчета глубинных скоростных разрезов решалась обратная задача на основе совместной инверсии PRF и SRF. Поиск оптимальных моделей (минимизация) проходил с использованием хорошо известного алгоритма Левенберга – Марквардта [24]. Была использована модель среды, состоящая из латерально однородных слоев. Прямая задача по расчету синтетических функции приемника решалась с помощью матричного алгоритма Томсона – Хаскелла [25]. Для получения искомых скоростных моделей использовался вероятностно-статистический подход с генерацией множества случайных пробных априорных моделей. Его основным преимуществом является независимость от начальной скоростной модели, сформированной на основе априорной информации, которая часто является неполной или отсутствует для изучаемого района.

В представленной работе варьируемыми параметрами в индивидуальных моделях являлись: скорость поперечной волны *Vs*, отношение скоростей продольных и поперечных волн *Vp*/*Vs* и мощность каждого слоя; среда описывалась 14 слоями. Для данных каждой сейсмической станции было рассчитано по 100000 случайных начальных моделей и синтетические PRF и SRF, по которым затем минимизировались. Итоговая скоростная модель строилась как медиана по выборке из 2-3 % лучших решений (тех, синтетические PRF и SRF от которых наилучшим образом согласуются с наблюдениями). Для стабилизации инверсии и более корректной оценки абсолютных скоростей по разрезу в процесс решения обратной задачи были включены также невязки времен пробега обменных волн от границ 410 и 660 км в верхней мантии относительно модели IASP91 (Δtp и Δts) [26], как было показано в работе [27]. Для получения окончательного распределения варьируемых параметров пространство параметров модели было разбито на ячейки. Решение представлено как область сгущения минимизированных случайных исходных моделей, синтетические PRF и SRF от которых лучше всего соответствуют наблюдаемым данным. Выделяются те ячейки, через которые прошло наибольшее количество отобранных минимизированных пробных моделей. Использованный механизм получения решения обратной задачи подробно описан в работе [28].

Исходные данные. В качестве исходных данных в работе использованы записи новой сейсмической станции NIK, расположенной в пос. Никель Мурманской обл. вблизи крупнейших медно-никелевых месторождений Печенгского района. Станция открыта в 2020 г. и укомплектована широкополосным велосиметром с частотным диапазоном 0,03-50 Гц и сейсмическим регистратором RefTek 130.

Для оценки качества данных, получаемых новой сейсмической станцией NIK, были проведены исследования регистрируемого микросейсмического фона. Для этого по записям каждой из компонент (*Z*, *N*, *E*) по всему набору непрерывных сейсмических данных за все время регистрации была рассчитана спектральная плотность мощности шума SPM (рис.2), которая сравнивалась с допустимыми

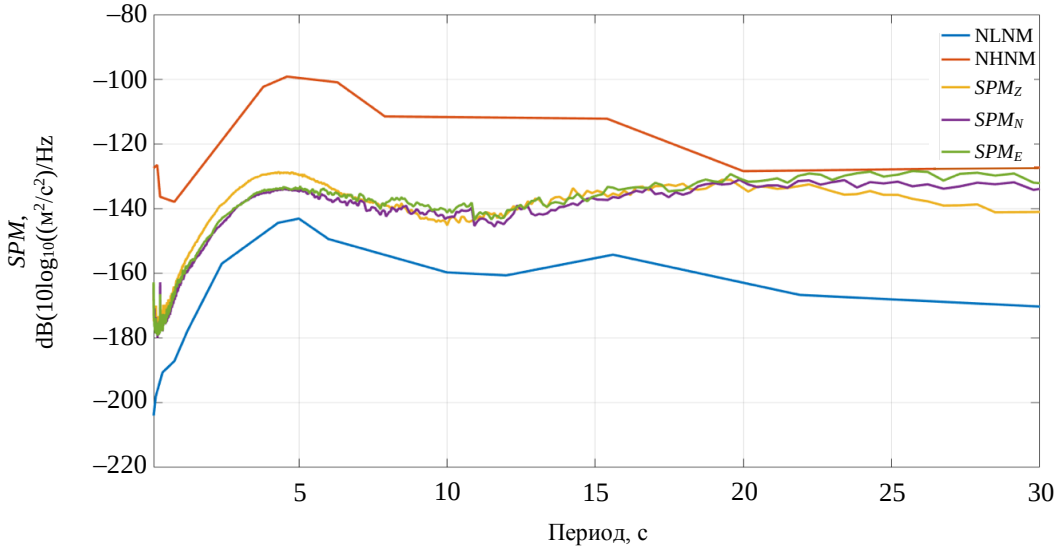


Рис.2. Распределение спектральных плотностей мощности микросейсмического шума для каждой из компонент (SPM_Z, SPM_N, SPM_E) по данным станции «Никель»
NLNM и NHNM – минимальные и максимальные допустимые значения этого параметра

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

значениями этого параметра, полученными по наблюдениям 75 «эталонных» сейсмических станций мировой сети*. Уровень микросейсмического шума не выходил за пределы стандартных значений для всех регистрируемых периодов, и, более того, станцию можно отнести к разряду «тихих» при анализе сигналов с периодом до 15 с.

Помимо данных станции NIK, в работе также были проанализированы данные двух других широкополосных сейсмических станций мировой сети, расположенных в северо-западной части ЛКО, – «Вадсо» (VADS) и «Кево» (KEV). Обе станции являются стационарными, работают более семи лет и укомплектованы велосиметрами с граничным периодом регистрации не менее 120 с, что обеспечивает высокое качество регистрируемого сейсмического материала. Основные характеристики использованных сейсмических станций приведены в таблице.

Основные параметры сейсмических станций и количество рассчитанных индивидуальных функций приемника PRF и SRF

Код станции	Название станции	Широта	Долгота	Год открытия	Тип датчика	Полоса пропускания, Гц	PRF	SRF
NIK	Никель	69,24	30,13	2020	RefTek 151-30	0,03-50	41	32
VADS	Вадсо	70,12	29,36	2016	Trillium 120 PA	0,008-30	85	143
KEV	Кево	69,75	27,00	1993	STS 1	0,002-10	247	200

На основе проанализированного объема сейсмических данных для станции VADS были рассчитаны 143 индивидуальных SRF и 85 индивидуальных PRF; для станции KEV – 200 SRF, 247 PRF; для станции NIK – 32 SRF, 41 PRF. Распределение эпицентров отобранных событий приведено на рис.3. Распределение эпицентров использованных событий позволяет избежать азимутальной зависимости при получении скоростных моделей после суммирования индивидуальных PRF и SRF даже для станции NIK, по которой имеется наименьший объем данных. По периметру сетки отложены значения азимута в градусах, вдоль азимутальных направлений отложены эпицентральные расстояния в градусах.

Результаты. Особенностью метода функций приемника является высокая чувствительность получаемых глубинных скоростных моделей к контрастам сейсмических скоростей при не всегда точных оценках их абсолютных значений. Эту проблему можно решить, используя значения обнаруженных невязок времен пробега обменных волн от границ зоны фазовых переходов в верхней

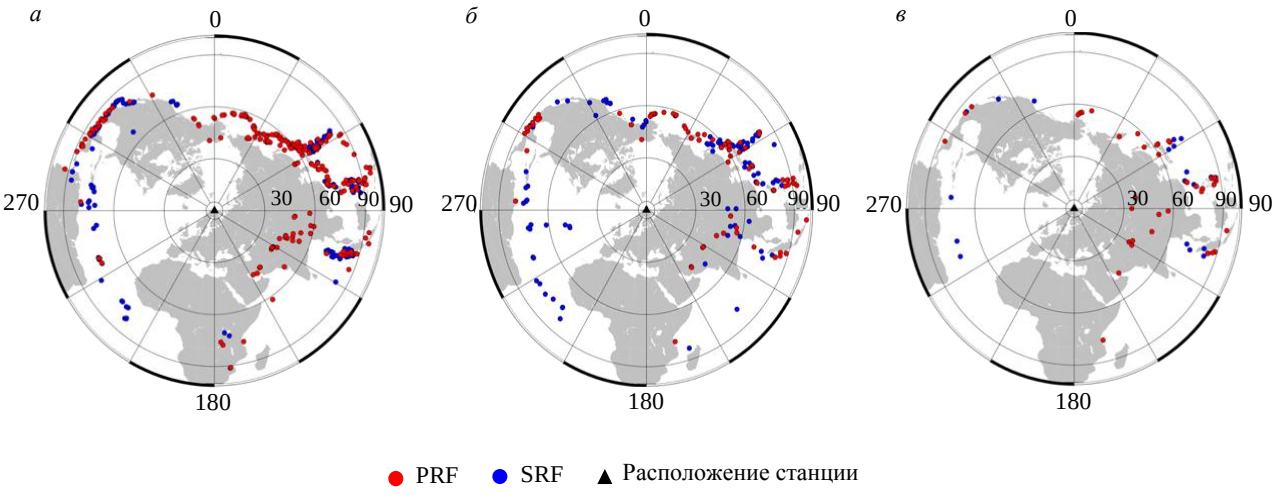


Рис.3. Распределения эпицентров отобранных событий для расчета индивидуальных PRF и SRF для станций KEV (*а*), VADS (*б*) и NIK (*в*)

* *Peterson J.* Observation and modeling of seismic background noise: Open-File Report 93-322. Albuquerque: U.S. Department of Interior, Geological Survey, 1993. 94 p. DOI: 10.3133/ofr93322

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 188-198
© А.Г.Гоев, 2024

мантии на глубинах около 410 и 660 км [27]. Кроме того, наличие хорошо определяемых на записях фаз от этих глобальных границ является дополнительным индикатором высокого качества исходных данных. Для определения отмеченных невязок по данным PRF каждой из анализируемых станций, в соответствии с описанной выше методикой, были построены стеки (рис.4).

Анализируемые обменные волны *Ps* от границ зоны фазовых переходов P410s и P660s хорошо выделяются на записях. Причем обращает на себя внимание «фокусировка» этих фаз, т.е. максимальная амплитуда фазы наблюдается на трассе, отвечающей ожидаемой глубине (около 410 или 660 км). От каждой из станций получены согласованные (с точностью до ошибки измерения, составляющей примерно 0,1 с) значения времен вступления этих фаз. Согласно стандартной скоростной модели Земли IASP91 для параметра луча 6,4 с/град, к которому приведены отмеченные записи, фазы P410s и P660s должны фиксироваться на записях на 44 и 67,9 с. Для всех анализируемых данных наблюдаются согласованные отрицательные невязки времен $t_{набл} - t_{станд} = -1$, причем как для фазы P410s, так и для фазы P660s. Зарегистрированное таким образом «опережение» наблюдаемых времен вступления изучаемых фаз свидетельствует о средних повышенных скоростях в верхней мантии.

На основе совместного моделирования PRF и SRF, а также невязок времен пробега обменных волн P410s и P660s были получены скоростные модели земной коры и верхней мантии до глубины около 300 км для каждой из анализируемых станций (рис.5). Наиболее значимой выявленной особенностью строения верхней мантии является слой относительно пониженных скоростей в районе станции VADS на глубинах 140-170 км. На тех же глубинах выделяется слой пониженных скоростей и по данным станции KEV, однако существенно менее выраженный. По данным станции NIK слой относительно пониженных скоростей на глубине около 150 км не проявляется.

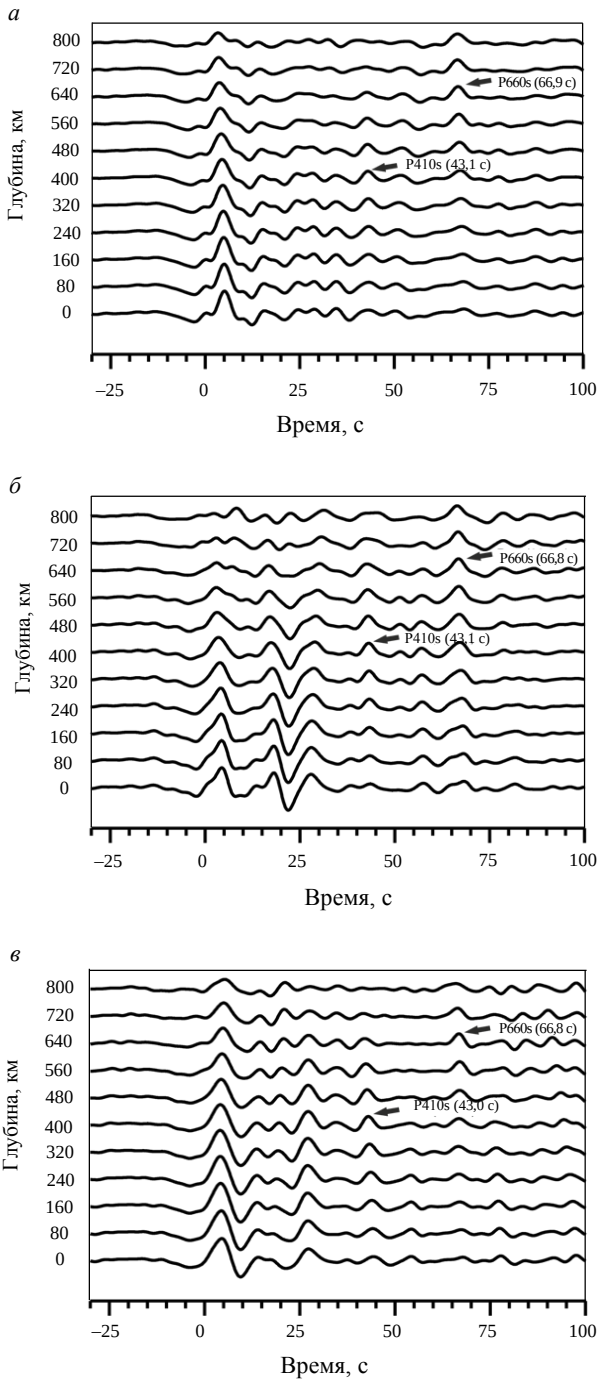


Рис.4. Стеки записей PRF для станций KEV (*а*), VADS (*б*) и NIK (*в*) (в скобках указаны отмеченные времена запаздывания максимальных значений амплитуд обменных волн относительно времени вступления первой *P*-волны; для каждой трассы указана целевая глубина конверсии)

Скоростное строение земной коры изучаемого района не демонстрирует ярких особенностей или ярко контрастных сейсмических границ (рис.6). Средние значения скоростей в коре, полученные по данным станции VADS, существенно выше как значений стандартной скоростной модели Земли IASP91, так и значений по данным станций KEV и NIK. Кроме того, привлекает внимание существенное различие в строении коро-мантийного перехода. Согласно модели в районе станции VADS, он представляет собой единый раздел на глубине около 46 км, тогда как в районе станции

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

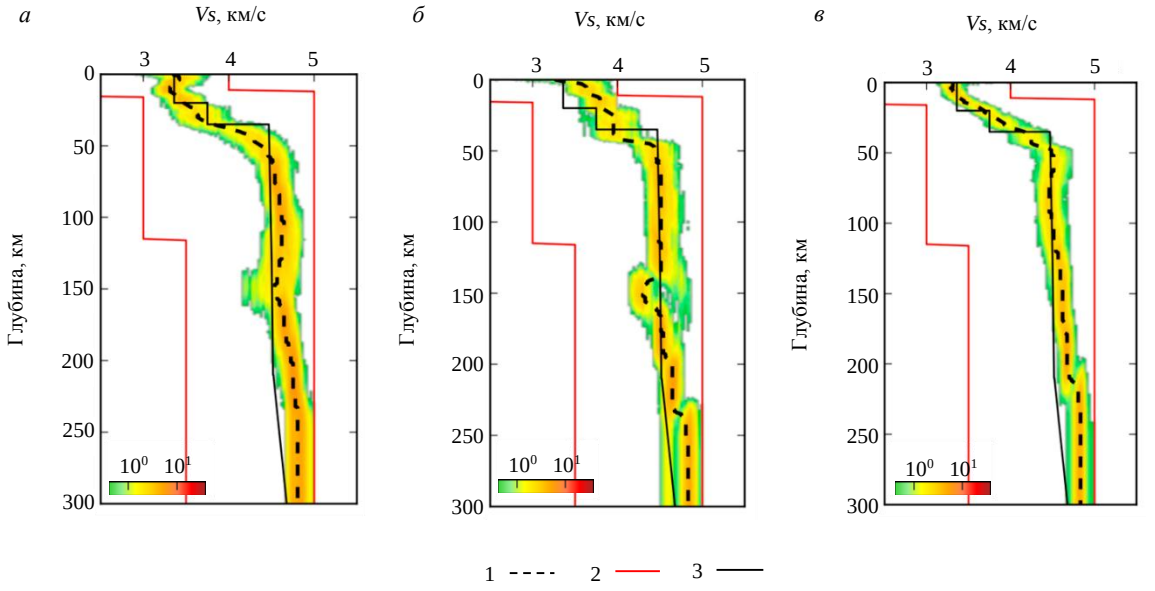


Рис.5. Скоростные модели поперечных волн *Vs* до глубин около 300 км для станций KEV (*а*), VADS (*б*) и NIK (*в*) (поля сгущения индивидуальных минимизированных случайных моделей)

1 – итоговые медианные модели; 2 – границы формирования случайных начальных моделей; 3 – модель IASP91

KEV выявлен градиентный слой с выходом на стандартные для мантии значения скоростей на глубине около 55 км. В модели, характеризующей Печенгский рудоносный район (данные станции NIK), выявляются две значимые границы в нижней коре – на глубинах 37 и 47 км; причем стандартные мантийные скорости достигаются на глубине около 47 км, что делает ее предпочтительной при определении сейсмической границы Мохо.

Обсуждение результатов. Несмотря на относительную близость расположения сейсмических станций, сейсмические модели скоростного строения литосферы северо-западной части ЛКО существенно отличаются. Причем отличия прослеживаются не только в структуре земной коры, но и в верхней мантии. Согласованные по всем станциям результаты достигаются только при анализе особенностей строения границ на глубинах 410 и 660 км.

По модели распределения скоростей *Vs*, полученной на основе данных станции VADS, можно сделать вывод о наличии в верхней мантии слоя пониженных скоростей на глубинах 140-170 км.

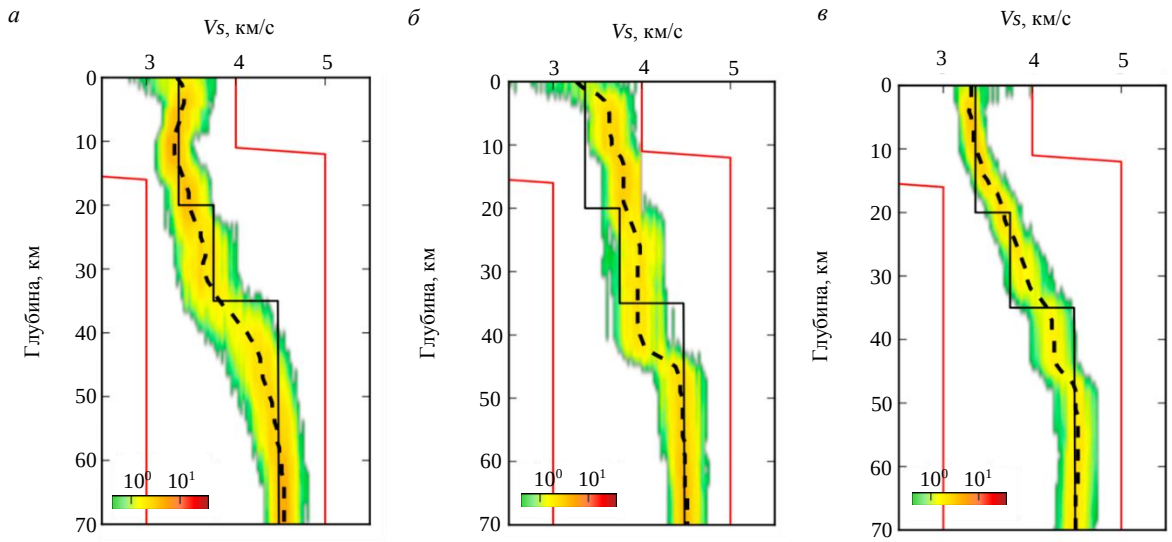


Рис.6. Скоростные модели поперечных волн *Vs* до глубин около 70 км для станций KEV (*а*), VADS (*б*) и NIK (*в*) (условные обозначения см. на рис.5)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 188-198
© А.Г.Гоев, 2024

По модели, полученной по данным станции KEV, на указанных глубинах также выявляется тенденция к понижению сейсмических скоростей, однако выделяется она не явно и констатировать наличие или отсутствие слоя пониженных скоростей по имеющимся данным нельзя. Относительно малые глубины (около 140-170 км), на которых обнаружен этот слой, не позволяют связывать его с астеносферой [29]. Вероятно, в данном случае в разрезе выявляется среднелитосферная неоднородность или MLD (mid-lithosphere discontinuity). Наличие этого слоя в различных регионах Земли, в том числе и Фенноскандинавском щите, впервые показано на основе сейсмических данных в работе [30]. Очевидно, этот слой является глобальным, во всяком случае для областей кратонов. Однако глубины его залегания, мощность, а также сейсмические скорости в нем различаются для различных тектонических структур и, вероятно, зависят от условий их формирования [31-33]. Стоит обратить внимание, что для большинства регионов Земли этот слой определяется в диапазоне глубин 100-150 км. В частности, для центральной и восточной частей Кольского региона на основе анализа данных сверхдлинного профиля «Кварц», отработанного с применением «мирных ядерных взрывов», показано наличие этого слоя на глубинах около 80-140 км [34]. Для территории Финляндии, по данным сейсмической томографии, также выявлен слой пониженных скоростей, причем его параметры различаются для северной и южной частей Финляндии. В частности, глубина его залегания увеличивается с юга на север [35]. В районе установки станции KEV он определен на глубине около 180 км, что не противоречит оценкам автора с учетом точности методики RF на этих глубинах.

В настоящее время не существует единой модели, описывающей механизм формирования и природу MLD. Среди высказываемых гипотез можно выделить следующие: реологическую – расслоенность при температуре, близкой к точке солидуса [36]; петрофизическую – расслоенность в условиях либо частичного подплава вещества [37], либо в присутствии базальтовых расплавов [36, 38]; изменение деформационных свойств с глубиной [39].

Несхожесть глубины и структуры коро-мантийного перехода, зафиксированного по данным станций KEV и VADS, не может быть однозначно интерпретирована на основе данных всего трех сейсмических станций. Для того, чтобы оказать существенное влияние на структуру зоны Мохо, необходим вклад масштабного тектонического процесса. Наиболее логично связать выявленную особенность с артефактами процессов формирования Каледонского орогена, сформированного в результате коллизии микроконтинентов Балтика-Авалония-Лаврентия [40, 41]. Изменение сейсмической резкости Мохо может быть связано с переработкой в процессе деформации, вызвавшей утрату высокоскоростного слоя нижней коры, обнаруженного в центральной и южной Швеции [42] (который, возможно, был переработан в эклогиты, местами обнаруживаемые на поверхности вдоль побережья Норвегии).

Наибольший интерес представляет модель глубинного строения Печенгского региона, полученная на основе данных новой сейсмической станции NIK (рис.7). Она расположена в непосредственной близости от крупнейших медно-никелевых месторождений Котсельваара-Каммикиви и Ждановского восточного рудного узла, а также в 42 км от Кольской сверхглубокой скважины СГ-3.

В полученной модели скоростного строения земной коры контрастные сейсмические границы не выявляются. В нижней части скоростного разреза как *Vp*, так и *Vs* выделяются две сейсмические границы на глубинах 37 и 47 км соответственно. Причем значения скоростей начинают соответствовать стандартным для верхней мантии на глубинах около 47 км. Сложная двухэтапная структура перехода кора – мантия с двумя границами M1 и M2 в целом подтверждается результатами, полученными на основе других геофизических методов [43, 44]. Такое «расщепление» коро-мантийного перехода может быть интерпретировано реликтом масштабного тектонического процесса, например мантийного диапира или плюма, предположительно существовавшего на территории Печенгского района в протерозойское время [16]. Необходимо отметить, что следы мантийных диапиров в современном строении среды обнаружены в различных регионах Земли (например, на Дальнем Востоке России [45]).

Еще одной яркой особенностью полученных новых глубинных моделей является зона аномально высоких значений параметра *Vp*/*Vs* (~ 2), начинающаяся от поверхности и достигающая глубин около 20 км. Полученные методом RF скоростные модели можно пространственно локализовать для заданной глубины. Чтобы определить регион, который характеризуется скоростными

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

моделями, могут быть вычислены «точки обмена», т.е. проекции на дневную поверхность областей формирования обменных волн для заданной глубины. На рис.7 показаны точки обмена для глубины 20 км и оконтурена характеризуемая полученными скоростными моделями область. Наличие зоны с такими высокими *Vp*/*Vs* в земной коре может свидетельствовать не только о сохранившейся промежуточной магматической камере [46], которая может содержать в себе полезные ископаемые, но и о сохранности на изучаемой территории реликтового магматического канала, через который материал достигал поверхности.

Прямое сопоставление скоростных разрезов, полученных в рамках представленной работы, с результатами исследований СГ-3 затруднено по ряду причин. В первую очередь это вызвано длиннопериодным характером данных, используемых в методике RF, что способствует существенному латеральному осреднению и, конечно, не позволяет определять слои мощностью в несколько сотен метров, выявленные путем анализа керна Кольской сверхглубокой скважины [47]. Кроме того, в рамках работ на СГ-3 существенно более точно определены скорости *Vp*, тогда как метод RF в большей степени фокусируется на определении *Vs*. При этом необходимо отметить, что полученные автором значения сейсмических скоростей находятся в качественном согласии со значениями, показанными по разрезу СГ-3 и в современных региональных объемных томографических моделях Печенгской структуры [43, 47].

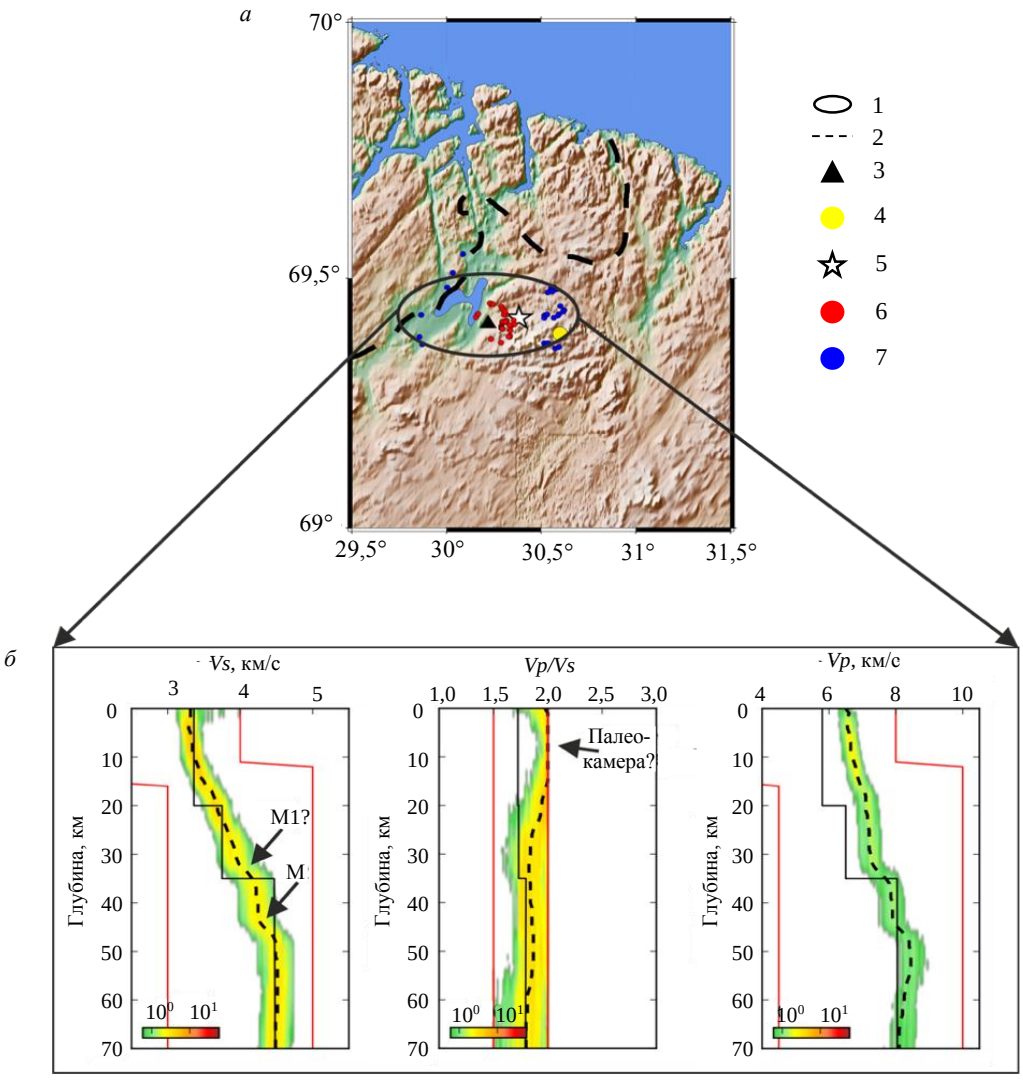


Рис.7. Карта Печенгского района (*а*) и модели распределения (*б*) *Vs*, *Vp*/*Vs* и *Vp* с глубиной (условные обозначения см. на рис.5)

1 – область, характеризуемая скоростными моделями; 2 – государственная граница; 3 – сейсмическая станция NIK; 4 – Кольская сверхглубокая скважина; 5 – рудник Каула-Котсельваара; 6 – точки обмена PRF для глубины 20 км; 7 – точки обмена SRF для глубины 20 км

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Заключение. Проанализированы сейсмологические данные трех сейсмических станций, расположенных в северо-западной части Лапландско-Кольского орогена. Две из них являются постоянными – KEV в северной части Финляндии и VADS в северо-восточной части Норвежских каледонид, а также одной новой станции NIK, установленной в 2020 г. в Печенгском рудном районе. В рамках проведенных исследований показано, что литосфера изучаемой территории имеет неоднородное скоростное строение не только в рамках земной коры, но и в верхней мантии до глубины примерно 200 км. В структуре верхней мантии прослеживается зона пониженных скоростей на глубинах около 150 км, вероятно, связанная со среднелитосферной неоднородностью (MLD). Причем наиболее ярко MLD проявляется в северной части Финляндии, существенно слабее эта область выявляется в структуре под Норвежскими каледонидами и не маркируется под Печенгским районом. Выявлены существенные отличия в строении коро-мантийного перехода, представленного единым разделом на глубине 46 км (по данным станции VADS), градиентного слоя с выходом на стандартные для мантии значения скоростей сейсмических волн на глубине около 55 км (по данным станции KEV) и сложной зоной с двумя границами на глубинах около 37 и 47 км под Печенгской структурой (по данным станции NIK). При этом, с учетом абсолютных значений скоростей, нижняя граница выглядит более предпочтительной при обнаружении границы Мохо.

В модели среды Печенгского рудного района, от поверхности и до глубин около 20 км, выявлено наличие аномально высоких значений отношения *Vp*/*Vs* (~ 2) в районе крупнейших медно-никелевых месторождений Котсельваара-Каммикиви и Ждановского восточного рудного узла. Такие высокие значения, характерные, в частности, для пород недеплетированной мантии, могут быть связаны с реликтом промежуточной магматической камеры, сформированной в процессе протерозойского рифтогенеза.

Выявленные аномалии в строении коро-мантийного перехода, значений *Vp*/*Vs*, а также отсутствие MLD под Печенгским районом (на соседних территориях показано его наличие) могут быть совместно интерпретированы как артефакты протерозойского этапа плюмового магматизма, характерного для Печенгского района и подтвержденного комплексом геологических и изотопно-геохимических данных [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Daly J.S., Balagansky V.V., Timmerman M.J., Whitehouse M.J.* The Lapland–Kola orogen: Palaeoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere // European Lithosphere Dynamics: Geological Society Memoirs. London: Geological Society, 2006. Vol. 32. P. 579-598. DOI: 10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.35

2. *Hjelt S.-E., Daly J.S.* SVEKALAPKO colleagues. SVEKALAPKO: evolution of Palaeoproterozoic and Archaean Lithosphere // Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. Uppsala: EUROPROBE Secretariat, Uppsala University, 1996. P. 56-67.

3. *Gorbatschev R., Bogdanova S.* Frontiers in the Baltic Shield // Precambrian Research. 1993. Vol. 64. Iss. 1-4. P. 3-21. DOI: 10.1016/0301-9268(93)90066-B

4. *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. DOI: 10.7868/S0016853X1304005X

5. *Балаганский В.В., Глазнев В.Н., Осипенко Л.Г.* Раннепротерозойская эволюция северо-востока Балтийского щита: террейновый анализ // Геотектоника. 1998. № 2. С. 16-28.

6. *Amelin Y.V., Semenov V.S.* Nd and Sr isotopic geochemistry of mafic layered intrusions in the eastern Baltic shield: implications for the evolution of Paleoproterozoic continental mafic magmas // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1996. Vol. 124. Iss. 3-4. P. 255-272. DOI: 10.1007/s004100050190

7. *Lobach-Zhuchenko S.B., Arestova N.A., Chekulaev V.P. et al.* Geochemistry and petrology of 2.40-2.45 Ga magmatic rocks in the north-western Belomorian Belt, Fennoscandian Shield, Russia // Precambrian Research. 1998. Vol. 92. Iss. 3. P. 223-250. DOI: 10.1016/S0301-9268(98)00076-X

8. *Шарков Е.В., Богатиков О.А., Красивская И.С.* Роль мантийных плюмов в тектонике раннего докембрия восточной части Балтийского щита // Геотектоника. 2000. № 2. С. 3-25.

9. *Williams H., Hoffman P.F., Lewry J.F. et al.* Anatomy of North America: thematic geologic portrayals of the continent // Tectonophysics. 1991. Vol. 187. Iss. 1-3. P. 117-134. DOI: 10.1016/0040-1951(91)90416-P

10. *Pesonen L.J., Elming S.-Å., Mertanen S. et al.* Palaeomagnetic configuration of continents during the Proterozoic // Tectonophysics. 2003. Vol. 375. Iss. 1-4. P. 289-324. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00343-3

11. *Mints M.V., Konilov A.N.* Geodynamic crustal evolution and long-lived supercontinents during the Palaeoproterozoic: evidence from granulite-gneiss belts, collisional and accretionary orogens // The Precambrian Earth, Tempos and Events. Elsevier, 2004. Vol. 12. P. 223-239.

12. *Балаганский В.В., Минц М.В., Дэйли Дж.С.* Палеопротерозойский Лапландско-Кольский ороген // Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE. М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2006. Вып. 2. С. 158-171.

13. *Daly J.S., Balagansky V.V., Timmerman M.J. et al.* Ion microprobe U–Pb zircon geochronology and isotopic evidence for a trans-crustal suture in the Lapland–Kola Orogen, northern Fennoscandian Shield // Precambrian Research. 2001. Vol. 105. Iss. 2-4. P. 289-314. DOI: 10.1016/S0301-9268(00)00116-9

14. *Lahtinen R., Huhma H.* A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen // Precambrian Research. 2019. Vol. 330. P. 1-19. DOI: 10.1016/j.precamres.2019.04.022

15. *Шаров Н.В.* Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. 173 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

16. *Скуфьин П.К., Баянова Т.Б.* Раннепротерозойский вулкан центрального типа в Печенгской структуре и его связь с рудоносным габбро-верлитовым комплексом, Кольский полуостров // Петрология. 2006. Т. 14. № 6. С. 649-669.
17. *Арзамасцев А.А., Степанова А.В., Самсонов А.В. и др.* Базитовый магматизм северо-восточной части Фенноскандии (2,06-1,86 млрд лет): геохимия вулканитов и корреляция с дайковыми комплексами // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2020. Т. 28. № 1. С. 3-40. DOI: 10.31857/S0869592X20010020
18. *Kosarev G.L., Oreshin S.I., Vinnik L.P. et al.* Heterogeneous lithosphere and the underlying mantle of the Indian subcontinent // Tectonophysics. 2013. Vol. 592. P. 175-186. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.02.023
19. *Oreshin S., Kiselev S., Vinnik L. et al.* Crust and mantle beneath western Himalaya, Ladakh and western Tibet from integrated seismic data // Earth and Planetary Scientific Letters. 2008. Vol. 271. Iss. 1-4. P. 75-87. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.03.048
20. *Винник Л.П.* Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16-27. DOI: 10.31857/S0002-33372019116-27
21. *Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1981. Vol. 86. Iss. B4. P. 2825-2852. DOI: 10.1029/JB086iB04p02825
22. *Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M.* The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2012. Vol. 200-201. P. 1-9. DOI: 10.1016/j.pepi.2012.04.002
23. *Farra V., Vinnik L.* Upper mantle stratification by P and S receiver functions // Geophysical Journal International. 2000. Vol. 141. Iss. 3. P. 699-712. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00118.x
24. *Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P.* Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. New York: Cambridge University Press, 2007. 1256 p.
25. *Haskell N.A.* Crustal reflection of plane *P* and *SV* waves // Journal of Geophysical Research. 1962. Vol. 67. № 12. P. 4751-4768. DOI: 10.1029/JZ067i012p04751
26. *Kennett B.L.N., Engdahl E.R.* Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. Vol. 105. Iss. 2. P. 429-465. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x
27. *Vinnik L., Kozlovskaya E., Oreshin S. et al.* The lithosphere, LAB, LVZ and Lehmann discontinuity under central Fennoscandia from receiver functions // Tectonophysics. 2016. Vol. 667. P. 189-198. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.11.024
28. *Алешин И.М.* Построение решения обратной задачи по ансамблю моделей на примере инверсии приемных функций // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 63-66. DOI: 10.31857/S2686739721010047
29. *Wang Z., Kusky T.M.* The importance of a weak mid-lithospheric layer on the evolution of the cratonic lithosphere // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 190. P. 557-569. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.02.010
30. *Thybo H., Perchuć E.* The Seismic 8° Discontinuity and Partial Melting in Continental Mantle // Science. 1997. Vol. 275. Iss. 5306. P. 1626-1629. DOI: 10.1126/science.275.5306.1626
31. *Yang H., Artemieva I.M., Thybo H.* The Mid-Lithospheric Discontinuity Caused by Channel Flow in Proto-Cratonic Mantle // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2023. Vol. 128. Iss. 4. № e2022JB026202. DOI: 10.1029/2022JB026202
32. *Weijia Sun, Li-Yun Fu, Erdinc Saygin, Liang Zhao.* Insights Into Layering in the Cratonic Lithosphere Beneath Western Australia // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. Vol. 123. Iss. 2. P. 1405-1418. DOI: 10.1002/2017JB014904
33. *Rychert C.A., Shearer P.M.* A Global View of the Lithosphere-Asthenosphere Boundary // Science. 2009. Vol. 324. Iss. 5926. P. 495-498. DOI: 10.1126/science.1169754
34. *Егорова Т.П., Павленкова Г.А.* Сейсмо-плотностные модели земной коры и верхней мантии Северной Евразии по сверхдлинным сейсмическим профилям «Кварц», «Кратон» и «Кимберлит» // Физика Земли. 2015. № 2. С. 98-115. DOI: 10.7868/S0002333715010044
35. *Silvennoinen H., Kozlovskaya E., Kissling E.* POLENET/LAPNET teleseismic P wave travel time tomography model of the upper mantle beneath northern Fennoscandia // Solid Earth. 2016. Vol. 7. Iss. 2. P. 425-439. DOI: 10.5194/se-7-425-2016
36. *Thybo H.* The heterogeneous upper mantle low velocity zone // Tectonophysics. 2006. Vol. 416. Iss. 1-4. P. 53-79. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.11.021
37. *Yuan H., Romanowicz B.* Lithospheric layering in the North American craton // Nature. 2010. Vol. 466. Iss. 7310. P. 1063-1068. DOI: 10.1038/nature09332
38. *Rader E., Emry E., Schmerr N. et al.* Characterization and Petrological Constraints of the Midlithospheric Discontinuity // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2015. Vol. 16. Iss. 10. P. 3484-3504. DOI: 10.1002/2015GC005943
39. *Shun-ichiro Karato, Olugboji T., Park J.* Mechanisms and geologic significance of the mid-lithosphere discontinuity in the continents // Nature Geoscience. 2015. Vol. 8. № 7. P. 509-514. DOI: 0.1038/ngeo2462
40. *Corfu F., Gasser D., Chew D.M.* New perspectives on the Caledonides of Scandinavia and related areas: introduction // New Perspectives on the Caledonides of Scandinavia and Related Areas. London: Geological Society, 2014. Special Publications. Vol. 390. P. 9-43. DOI: 10.1144/SP390.28
41. *Егоров А.С., Винокуров И.Ю., Телегин А.Н.* Научно-методические приемы повышения геологической и прогнозно-поисковой эффективности государственного геологического картирования российского арктического шельфа // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 447-458. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.447
42. *Buntin S., Artemieva I.M., Malehmir A. et al.* Long-lived Paleoproterozoic eclogitic lower crust // Nature Communications. 2021. Vol. 12. № 6553. DOI: 10.1038/S41467-021-26878-5
43. *Исанина Э.В.* Сейсмологические исследования методом МОВЗ в районе Кольской скважины СГ-3 // Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Лапландско-Печенгский район. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1997. С. 101-115.
44. *Шаров Н.В., Исанина Э.В., Крупнова Н.А.* Глубинное строение района бурения Кольской сверхглубокой скважины (по сейсмическим данным) // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2007. Т. 10. № 2. С. 309-319.
45. *Алексеев В.И.* Глубинное строение и геодинамические условия гранитоидного магматизма Востока России // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 259-265. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.259
46. *Лобанов К.В., Чичеров М.В., Чижова И.А. и др.* Глубинное строение и рудообразующие системы Печенгского рудного района (Арктическая зона России) // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3 (35). С. 107-122. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-107-122
47. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования. М.: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. 260 с.

***Автор* А.Г.Гоев,** *канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, andr.goev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9477-5963 (Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского РАН, Москва, Россия).*

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0