ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2023, том 513, № 1, с. 106–111

ГЕОДИНАМИКА

УДК 550.385

СЛЕДЫ ПЛЮМОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СОВРЕМЕННОМ СКОРОСТНОМ СТРОЕНИИ ЛИТОСФЕРЫ ХИБИНО-ЛОВОЗЕРСКОГО ТЕКТОНИЧЕСКОГО УЗЛА

© 2023 г. Академик РАН В. В. Адушкин[1], А. Г. Гоев[1,*]

Поступило 04.07.2023 г.
После доработки 06.07.2023 г.
Принято к публикации 06.07.2023 г.

В работе представлены новые модели глубинного скоростного строения земной коры и верхней мантии в районе Хибинско-Ловозерского тектонического узла, расположенного на Кольском полуострове. Обсуждаются артефакты плюм-литосферных взаимодействий, развивавшихся в изучаемом районе с протерозойского по палеозойское время. Проведено детальное сопоставление скоростного строения Имандра-Варзугской рифтогенной структуры, Хибинской и Ловозерской интрузий и прилегающей к ним архейской части Фенноскандинавского щита. Показана существенная неоднородность строения коры, верхней мантии, а также структуры и глубины залегания коро-мантийного перехода. Выявлено присутствие зоны пониженных сейсмических скоростей в верхней мантии, связанной со средне-литосферной неоднородностью (MLD). Особенности строения зоны Мохо и верхней мантии в районе Хибинской и Ловозерской интрузий впервые интерпретированы как артефакты плюмового процесса.

Ключевые слова: Кольский регион, функции приемника, поперечные волны, верхняя мантия, плюм, средне-литосферная неоднородность

DOI: 10.31857/S2686739723601527, **EDN:** LMCMEG

Кольский полуостров является древней северо-восточной частью Фенноскандинавского щита и состоит из трех крупных мегаблоков – Мурманского, Кольского и Беломорского [1]. Кольский и Беломорский блоки, совместно с более мелкими Умбинско-Терским и Стрельнинским террейнами, объединяются в Лапландско-Кольский ороген (ЛКО).

ЛКО представляет собой хорошо экспонированный участок щита, обнажающий все важнейшие тектонические элементы, обеспечивая тем самым понимание закономерностей геодинамических процессов с неоархейского до палеопротерозкого возрастов. ЛКО был центром крупных плюмовых процессов [2] в позднем неоархее и до раннего палеопротерозоя, что привело к рифтогенезу и распаду суперконтинента Кенорланд [3]. ЛКО известен также обилием крупных месторождений никелевых и железных руд, апатита, платины, палладия, титана, бадделеита и т.д.

При изучении эволюции ЛКО особый интерес представляет исследование района расположения Хибинской и Ловозерской интрузий, где архейские метаморфические и ультраметаморфические образования Фенноскандинавского щита рассечены Имандра-Варзугской протерозойской рифтогенной структурой и соседствуют также с щелочными интрузиями (плутонами) палеозойского возраста (см. рис. 1). При этом формирование как Имандра-Варзугской рифтогенной структуры, так и упомянутых плутонов, связывается с плюмовыми процессами [4, 5], следы которых могут быть различимы в глубинном строении и в наше время.

В представленной работе Хибино-Ловозерский тектонических узел впервые детально изучается с точки зрения выявления следов древних плюм-литосферных процессов, которые не только привели к формированию современной тектонической обстановки в Кольском регионе, но также и к генерации крупных месторождений полезных ископаемых [1].

Структура и строение изучаемого тектонического узла ранее, начиная с 60-х годов прошлого века, исследовались по комплексу геолого-геофизических данных. Отдельно необходимо выделить сейсмические исследования с применением

[1]*Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия*
*****E-mail: andr.goev@gmail.com*

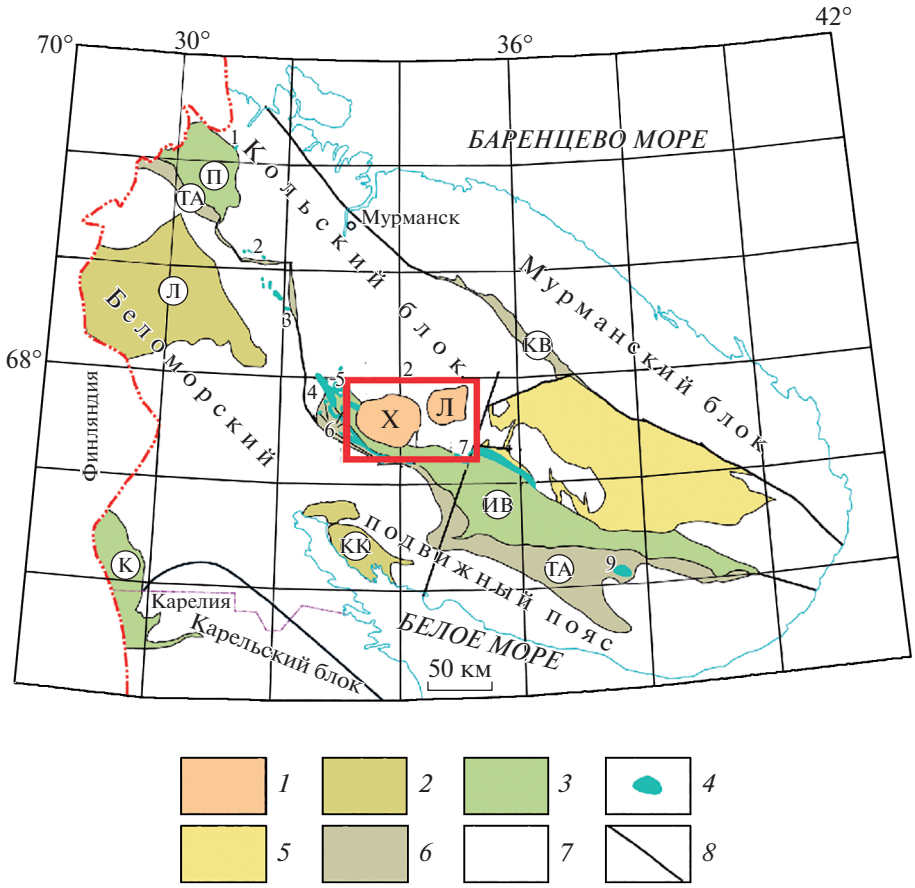

Рис. 1. Основные тектонические элементы Кольского полуострова по [1]. *1* – палеозойские плутоны нефелиновых щелочных сиенитов и фоидолитов: Хибинский (Х), Ловозерский (Л); *2* – гранулитовые пояса: Лапландский (Л), Кандалакшско-Колвицкий (КК); *3* – палеопротерозойские рифтогенные структуры: Печенгская (П), Имандра-Варзугская (ИВ) и Куолаярвинская (К); *4* – расслоенные базитультрабазитовые интрузии с возрастом около 2.45–2.52 млрд лет: г. Генеральская (*1*), Солозеро (*2*), Улитаозерская (*3*), Мончетундровская (*4*), Мончеплутон (*5*), Имандровский комплекс (*6*), Федорова тундра (*7*), Панские тундры (*8*), Песочная (*9*); *5* – неоархейская Кейвская структура с щелочными гранитами в ее обрамлении; *6* – неоархейские зеленокаменные пояса: Колмозеро-Воронинский (КВ), Терско-Аллареченский (ТА); *7* – архейские метаморфические и ультраметаморфические образования; *8* – разрывные нарушения. Регион исследования показан красным прямоугольником.

методов глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) по сверхдлинному профилю “Кварц” с применением мирных ядерных взрывов [6, 7], а также изучение локальной скоростной структуры методом функций приемника [8, 9]. Следует отметить, что в упомянутых работах мало внимания уделено обсуждению плюм-литосферных взаимодействий как причине формирования Хибино-Ловозерского тектонического узла.

В качестве методики исследования был использован метод функций приемника (см. [10] и ссылки в ней). В основе этого метода лежит использование данных об обменных волнах от удаленных сейсмических событий. Обычно его разделяют на две составляющие по типам используемых обменных фаз – *P*-функция приемника (или *PRF*) использует обменные и кратные волны *P*–*S* (*Ps*) и, соответственно, *S*-функция приемника (или SRF), использующая обменные и кратные волны *S*–*P* (*Sp*). Сейсмические события отбираются в соответствии с эпицентральными расстояниями: для *PRF* их диапазон составляет 30–100°, для SRF – 65–100°. В связи с большими эпицентральными расстояниями, события с магнитудами <5.5 не рассматривались. Для дальнейшего анализа отбирались события с импульсной формой колебания первой падающей волны (*P* для *PRF* и *S* для *SRF* соответственно) и высоким отношением сигнал/шум (более 3). Важно отметить, что итоговая функция приемника является совокупностью многих обменных фаз, сформированных на контрастных сейсмических границах. Таким образом, чтобы локализовать скоростную модель в рамках определенного тектонического элемента, необходимо вычислить точки формирования обменных волн для интересующей глубины и суммировать индивидуальные

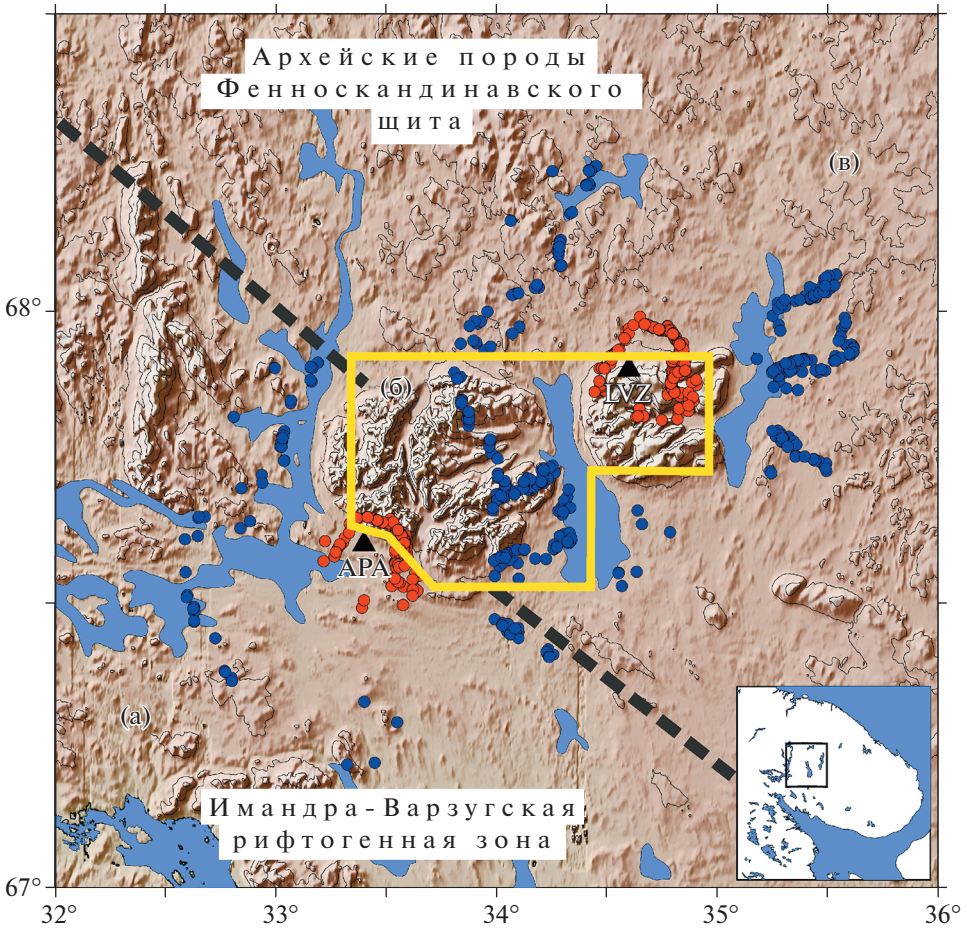

Рис. 2. Карта региона исследования с нанесенными на нее основными тектоническими элементами. Красными кружками показано расположение точек обмена для глубины 40 км для индивидуальных PRF; синими – для SRF. Черными треугольниками показано расположение сейсмических станций. Желтым выделена зона, характеризующая Хибинскую и Ловозерскую интрузии. На врезке показана карта Кольского полуострова, черным прямоугольником показан регион исследования.

PRF и SRF в соответствии с положением точек обмена [11]. Далее, по полученному таким образом наборам PRF и SRF решается обратная задача по методу, подробно описанному в [12]. Его суть такова – происходит генерация случайных начальных моделей, в которых варьируемыми параметрами являются скорости поперечных волн, отношение скоростей продольных и поперечных волн, а также мощности слоев. После этого производится решение обратной задачи с применением алгоритма Левенберга-Марквардта и генерация следующей начальной модели. После генерации 100 000 случайных начальных моделей отбирается 2–3% лучших, медианные значения по полученной таким образом выборке считаются итоговой моделью.

В исследовании были использованы данные двух широкополосных станций ФИЦ ЕГС РАН – “Апатиты” (APA) и “Ловозеро” (LVZ). Станции установленны в непосредственной близости от Хибинского и Ловозерского плутонов и ведут регистрацию начиная с 1991 г. В результате анализа более чем 10 000 исходных записей телесейсмических событий с применением описанных выше критериев, было рассчитано 414 индивидуальных PRF и 448 индивидуальных SRF. На рис. 2 показано расположение сейсмических станций, тектонических структур, а также точек обмена, рассчитанных для предполагаемой средней глубины залегания коро-мантийного перехода в изучаемом регионе (40 км), по всему набору индивидуальных функций приемника. Как видно, пространственное распределение точек формирования обменных волн и количество сейсмических данных позволяют выделить три представительные выборки PRF и SRF, характеризующие основные структуры изучаемого тектонического узла, на основе всего двух сейсмических станций. Первая группа данных характеризует строение Имандра-Варзугской рифтогенной структуры (а), вторая – Хибинской и Ловозерской щелочных интрузий (б),

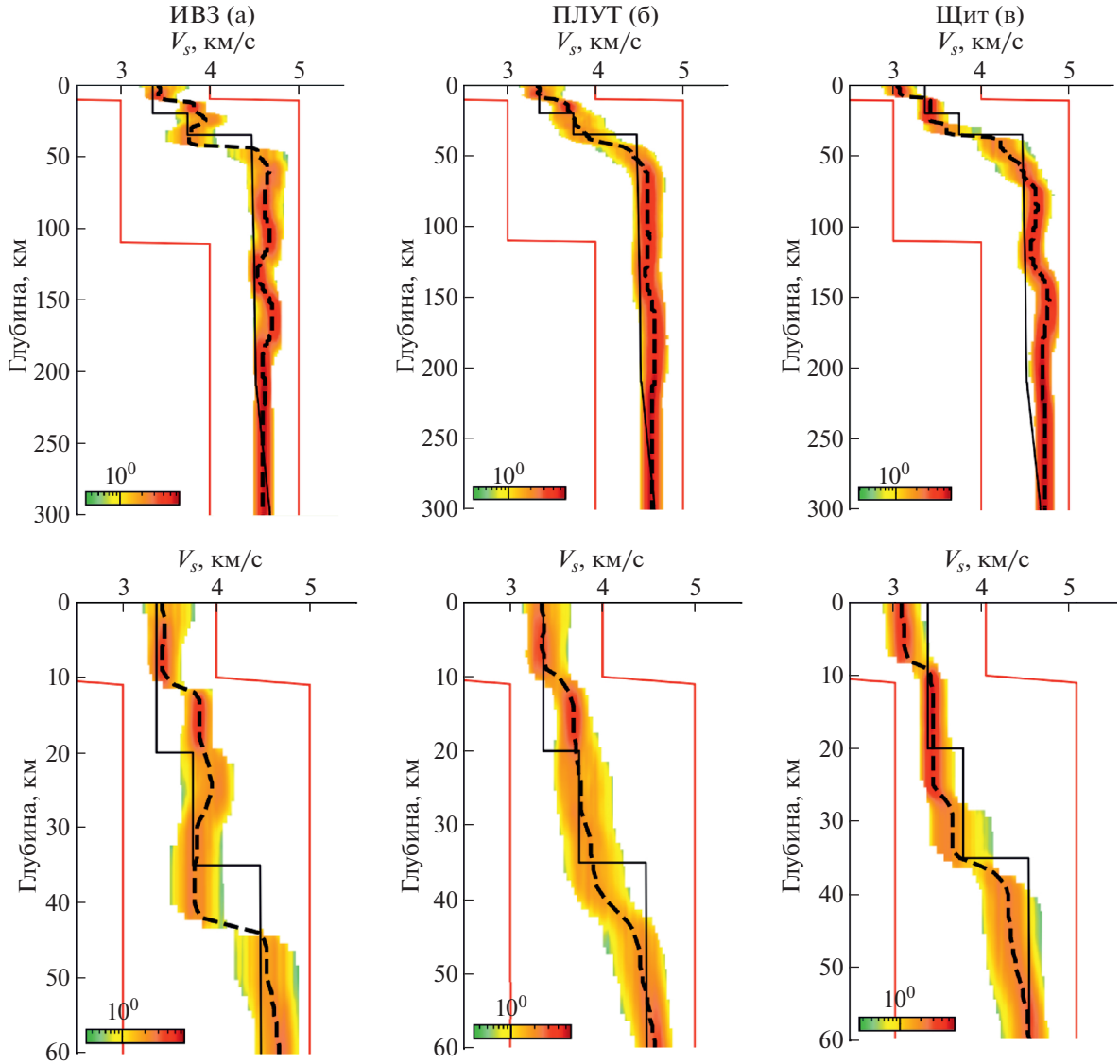

Рис. 3. Модели распределения значений скоростей поперечных волн (Vs) с глубиной для трех тектонических структур – Имандра-Варзугской зоны (а), Хибинского и Ловозерского плутонов (б), архейской части Фенноскандинавского щита (в). Цветами показаны поля сгущения индивидуальных минимизированных случайных моделей. Пунктирными линиями показаны медианные модели. Красные линии обозначают границы формирования случайных начальных моделей. Черные линии представляют модель IASP91. Верхний ряд содержит полные скоростные модели до глубины 300 км. Нижний – те же модели с более подробной представленной корой до глубины 60 км.

третья – строение архейской части Кольского региона (в).

В результате разделения данных на три группы, в группу (а) было отобрано 88 PRF и 78 SRF; в группу (б) – 246 PRF и 140 SRF; (в) – 116 PRF и 223 SRF. Для каждой из полученных подгрупп была решена обратная задача для восстановления глубинного скоростного разреза земной коры и верхней мантии. Для этого было рассчитано по 100 000 случайных начальных моделей среды, представленной 16 слоями. Построенные таким образом одномерные скоростные модели приведены на рис. 3.

Скоростное строение верхней мантии изучаемого района представлено весьма неоднородно. На моделях (а) и (в) отчетливо выделяется слой пониженных скоростей в верхней мантии. Причем в модели Имандра-Варзугской зоны (а) этот слой выделяется на глубинах около 120–150 км, а в модели Фенноскандинавского щита (в) на глубинах 90–140 км. Таким образом, при схожей глубине залегания подошвы этого слоя, глубина его кровли существенно отличается. В модели строения верхней мантии в районе Хибинского и Ловозерского плутонов слой пониженных скоростей не выявляется.

В моделях строения земной коры выделяется граница на глубине около 10 км, однако, кроме этого, в скоростной структуре трех изучаемых тектонических элементов отсутствуют схожие детали. В модели строения Имандра-Варзугской зоны (а) скорости поперечных волн практически одинаковы на участках 10–20 км и 30–44 км, а в диапазоне глубин 10–20 км ярко выделяется высокоскоростной слой. Коро-мантийный переход проявлен резкой границей на глубине около 45 км. Сейсмические скорости в земной коре по модели, характеризующей среду под интрузиями (б), демонстрируют слабовыраженный градиентный рост с отсутствием особенностей на участке разреза 10–40 км, после чего выделяется переходная зона Мохо мощностью около 7 км. Строение земной коры области Фенноскандинавского щита может быть представлено тремя слоями с границами на глубинах 10 и 27 км. Граница Мохо выделяется единым разделом на глубине около 38 км.

Выявленная несхожесть глубинного строения изучаемых тектонических элементов, вероятно, отражает геологическую историю их формирования. Так, слой пониженных скоростей в верхней мантии, с учетом его относительно малой глубины залегания, вероятно маркирует средне-литосферную неоднородность (MLD). Генезис этого слоя, обнаруженный в настоящий момент практически под всеми кратонами [13], вызывает дискуссии [14–16]. В частности, высказываются предположения о его связи с выделением флюида при процессах субдукции или плюм-литосферных взаимодействий при формировании кратонов [13]. В этом случае можно сделать предположение о том, что MLD в Кольском регионе мог сформироваться в процессе протерозойского рифтогенеза, а потом быть разрушенным в районе Хибинского и Ловозерского массивов в рамках локального плюмового проявления, зафиксированного в этом районе в палеозойское время по комплексу геохимических данных [1]. Также возможным сейсмологическим свидетельством плюм-литосферного процесса является градиентная структура коро-мантийного перехода под Хибинской и Ловозерской интрузиями, которая свидетельствует о разрушении резкой границы Мохо, обнаруженной нами в близлежащих районах Имандра-Варзугской структуры и архейской части Фенноскандинавского щита.

Представленные новые данные о детальном глубинном скоростном строении Хибино-Ловозерского тектонического узла демонстрируют наличие в его современной структуре аномалий скоростного строения верхней мантии, а также коро-мантийного перехода, которые могут интерпретироваться как следы палеозойских, а возможно, и протерозойских плюмовых процессов.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке ФИЦ ГС РАН – “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 122040400015-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chashchin V.V., Mitrofanov F.P.* The Paleoproterozoic ImandraVarzugavrifting structure (Kola Peninsula): intrusive magmatism and minerageny // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. V. 5. № 1. P. 231–256.
2. *Шарков Е.В., Богатиков О.А., Красивская И.С.* Роль мантийных плюмов в тектонике раннего докембрия восточной части Балтийского щита // Геотектоника. 2000. Т. 2. С. 3–25.
3. *Pesonen L.J., Elming S.A., Mertanen S., Pisarevsky S., D'Agrella-Filho M.S., Meert J.G., Schmidt P.W., Abrahamsen N., Bylund G.* Palaeomagnetic configuration of continents during the Proterozoic // Tectonophysics. 2003. V. 375. P. 289–324.
4. *Mitrofanov F.P., Bayanova T.B.* Duration and timing of orebearing Paleoproterozoic intrusions of Kola province // In: Mineral deposits: Processes to Processing. 1999. Balkena, Rotterdam, P. 87–93.
5. *Mitrofanov F.P., Bayanova T.B., Korchagin A.U., Groshev N.Yu., Malitch K.N., Zhirov D.V., Mitrofanov A.F.* East Scandinavian and Noril'sk plume mafic large igneous provinces of Pd–Pt ores: geological and metallogenic comparison // Geology of Ore Deposits. 2013. V. 55. № 5. P. 305–319.
6. *Егоркин А.В., Галдин Н.Е., Зюганов С.К., Кагалова Л.И.* Выделение блоков древнейшей коры Балтийского щита по профилю МОВЗ-ГСЗ Печенга-Умбозеро-Ручьи / Проблемы комплексной интерпретации геолого-геофизических данных. Отв. ред. В.А. Глебовицкий, Н.В. Шаров. Л., Наука. 1991. С. 107–122.
7. *Павленкова Н.И., Павленкова Г.А.* Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. М., ГЕОКАРТ: ГЕОС. 2014. Вып. 5. 192 с.
8. *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. Let. 1996. V. 23. № 23. P. 3389–3392.
9. *Гоев А.Г., Санина И.А., Орешин С.И., Резниченко Р.А., Тарасов С.А., Федоров А.В.* Скоростное строение литосферы Хибинского и Ловозерского массивов (северо-восточная часть Балтийского щита) методом функции приемника // Физика Земли. 2021. № 5. С. 30–40.

10. *Винник Л.П.* Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16–27.
11. *Vinnik L., Deng Y., Kosarev G., Oreshin S., Makeyeva L.* Permian plume beneath Tarim from receiver functions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. V. 9. P. 1179–1185.
12. *Алешин И.М.* Построение решения обратной задачи по ансамблю моделей на примере инверсии приемных функций // ДАН. Науки о Земле. Т. 496. № 1. 2021. С. 63–66.
13. *Fu H.Y., Li Z.H., Chen L.* Continental mid-lithosphere discontinuity: A water collector during craton evolution // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49. e2022GL101569.
14. *Thybo H.* The heterogeneous upper mantle low velocity zone // Tectonophysics. 2006. V. 416. P. 53–79.
15. *Karato S.I., Park J.* On the origin of the upper mantle seismic discontinuities // Lithospheric Discontinuities. 2018. P. 5–34.
16. *Eeken T., Goes S., Pedersen H.A., Arndt N.T., Bouilhol P.* Seismic evidence for depth-dependent metasomatism in cratons // Earth and Planetary Science Letters. 2018. V. 491. P. 148–159.

IMPRINTS OF PLUME PROCESSES IN THE MODERN LITHOSPHERIC VELOCITY STRUCTURE OF THE KHIBINO-LOVOZERO REGION

Academician of the RAS V. V. Adushkin[a] and A. G. Goev[a,#]

[a]*Sadovskiy Institute of Geosphere Dynamics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[#]*E-mail: andr.goev@gmail.com*

The paper presents new deep velocity of the earth's crust and upper mantle in the Khibiny-Lovozero tectonic region located on the Kola Peninsula. The artifacts of plume-lithospheric interactions that occurred in the investigated area from the Proterozoic to the Paleozoic time are discussed. A detailed comparison of the velocity structure of the Imandra-Varzug rift, the Khibiny and Lovozero plutons, and the adjacent Archean part of the Fennoscandinavian Shield has been carried out. A significant heterogeneity of the structure of the crust, upper mantle, as well as the structure and depth of the crust-mantle transition is shown. The presence of a zone of low seismic velocities in the upper mantle associated with the mid-lithospheric discontinuity (MLD) has been revealed. Structural features of the Moho zone and the upper mantle in the region of the Khibiny and Lovozero plutons were interpreted as artifacts of the plume process.

Keywords: Kola region, receiver functions, shear waves, upper mantle, plume, mid-lithospheric discontinuity