

Важный вклад в изучение литосферы Северной Европы по сейсмическим данным

© В. И. Старостенко, А. А. Трипольский, 2018

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 21 февраля 2018 г.

С каждым годом возрастает интерес к глубинному строению Земли, особенно к геологии и металлогении докембрия. Это объясняется тем, что история докембрия охватывает более 87 % всего периода геологического развития Земли. За это время сформировалось основное строение земной коры. В недрах докембрийских структур сосредоточено 80 % мировых запасов железных руд, около 70 % хромитов, 60 % меди, 70 % сульфидного никеля, более 90% золота и кобальта, почти половина запасов урана и большая часть запасов платиноидов.

В последние десятилетия возрос объем глубинных исследований литосферы сейсмическими методами ГСЗ (глубинное сейсмическое зондирование), МОВ—ОГТ (метод отраженных волн — общей глубинной точки) и МОВЗ (метод обменных волн землетрясений). Много сделал в этом плане Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины совместно с известными геофизическими центрами Европы и США [Старостенко и др., 2017а,б; Grad et al., 2003; Starostenko et al., 2013а,б; 2015; 2017; 2018; Sydorenko et al., 2017].

Результаты исследований литосферы геолого-геофизическими методами российской части Фенноскандинавского щита, а также по всему щиту, освещены во многочисленных статьях и ряде монографий [Проблемы, 1991; Изучение..., 1986; Luosto, 1987; Литосфера..., 1989; Шаров, 1993; Сейсмогеологическая..., 1998; Трипольский, Шаров, 2004; Строение..., 2005; Europan..., 2006].

В то же время обобщающей монографии, освещающей глубинную структуру земной коры и верхней мантии Северной Европы по сейсмическим данным, до последнего времени не было. Николай Владимирович Шаров взял на себя нелегкий труд восполнить указанный пробел и подготовил вышедшую недавно монографию, [Шаров, 2017].

Оценим, насколько успешно решена эта задача.

Вначале автор рассматривает такие важные вопросы, как разрешающая способность и точность сейсмических построений, а также комплексирование сейсмических методов при изучении литосферы. Автор приходит к справедливому, на наш взгляд, выводу, что при комплексной интерпретации наиболее целесообразным является совмещение технологий ОГТ—МРС (метод разведочной сейсмологии) — ГСЗ.

Заметим, что при рассмотрении особенностей применения метода ГСЗ для изучения литосферы в монографии несколько занижены возможности данного метода. Так, в пределах Украинского щита детальный анализ внутреннего строения некоторых сейсмических границ позволил изучить тонкослоистую структуру как горизонта K_2 в средней части консолидированной коры, так и в переходной зоне кора—мантия [Kharitonov, Tripolsky, 1994; Starostenko et al., 1999].

По-видимому, такой факт можно объяснить тем, что детальность исследований ГСЗ на территории Украинского щита

выше, чем на Балтийском щите, что и позволило получить более точные результаты.

В целом, автором убедительно показано, что идея совместной интерпретации сейсмических методов заключается в том, что недостатки одного метода могут быть частично устранены за счет преимуществ другого. Это в конечном итоге позволяет получить более достоверную геологическую модель исследуемого региона.

Далее в монографии приведены основные результаты сейсмической изученности земной коры Фенноскандинавского щита и сопредельных структур (табл. 1 монографии). Примечательно, что автор принимал активное участие во многих исследованиях, проведенных на территории изучаемого региона. Следовательно, Н. В. Шаров выступает не в роли постороннего наблюдателя, а напротив, — в роли активного участника работ, которые проводились в пределах Фенноскандинавского щита.

Большое внимание автор уделил анализу результатов бурения глубоких и сверхглубоких скважин на территории Фенноскандинавского щита: Кольской, Россия (SG-3), до глубины 12262 м (1970—1990); Гравберг (GR) и Штенберг, Центральная Швеция, до глубины 6337 м (1984—1987) и 6529 м (1991—1992); Оутокумпу (OU), в юго-восточной Финляндии, до глубины 2516 м (2004—2005); Пограничной (P-1), Россия, Мурманская область, на полуострове Средний, до глубины 5200 м (2004—2006); Онежской (ON), Россия, в Центральной Карелии, до глубины 3537 м (2007—2008). Анализ выявил серьезные несоответствия между прогнозными сейсмогеологическими моделями и фактическим строением верхней части консолидированной коры.

Центральное место в этом плане занимает Кольская сверхглубокая скважина по своей глубине и детальности проработки данных уникального комплекса геофизических исследований [Кольская..., 1984, 1998]. Выводы, сделанные автором, являются справедливыми и, на наш взгляд, не потеряют своей актуальности в обозримом будущем. Вот некоторые из них:

1) с глубиной не происходит снижения дифференциации физических свойств под влиянием литостатического давления и других факторов;

2) в реальных разрезах с глубиной не происходит постепенного увеличения плотности и скорости упругих волн; эти свойства могут как возрастать, так и уменьшаться с глубиной;

3) основные сейсмические границы верхней части кристаллической коры связаны с изменением упругих свойств среды, вызванными различием состава пород (литостратиграфические границы), либо с изменением физического состояния пород: раздробленность, дезинтеграция (тектонические границы);

4) впервые получены новые данные о составе и строении древней кристаллической коры до глубины 12262 м;

5) установлено присутствие рудной минерализации и флюидов вплоть до максимальной глубины скважины, изменились представления о природе геофизических границ.

Результаты бурения глубоких скважин позволили Н. В. Шарову прийти к важному выводу: только результаты бурения глубоких скважин в кристаллической коре позволяют получить сведения о вещественном составе пород и петрофизических характеристиках. Это позволяет построить объективный геолого-геофизический разрез верхней части земной коры.

Далее автор приводит основные результаты изучения глубинной структуры земной коры Фенноскандинавского щита и его обрамления. Из всех многочисленных крупных участков изучения Фенноскандинавского щита максимальная плотность глубинных сейсмических исследований приходится на Печенго-Аллареченский район. При активном участии автора монографии построена трехмерная скоростная модель района для площади 150×150 км² до границы Мохоровичича [Строение..., 2005; Шаров и др., 2007]. С помощью проведенного сейсмотомографического анализа (СТ) материалов сейсмических исследований ГСЗ, ОГТ, МОВЗ—МРС получено

несколько вариантов разноволновых глубинных разрезов земной коры на суше и смежной акватории Баренцева моря. Это впервые позволило выявить вариации физических параметров среды в трехмерном пространстве, а не только в плоскости разреза. Сейсмотомографическая модель была также использована для построения объемной геологической модели земной коры Печенго-Аллареченского района и его обрамления.

Совместный анализ результатов исследований ГСЗ, МОВЗ—МРС и Кольской сверхглубокой скважины, выполненных в Печенго-Аллареченском районе, позволил автору прийти к следующим выводам об особенностях глубинного строения и природы некоторых глубинных границ:

1) на всех профилях МОВЗ фиксируются разломы, которые пересекают земную кору, а иногда и границу Мохо, разделяя земную кору на блоки;

2) область понижения скорости, зафиксированная в скважине СГ-3 на уровне 8—12 км, является предполагаемым волноводом под всей Печенгской структурой;

3) поверхность Мохоровичича на Кольском полуострове представляет собой наиболее выдержанную сейсмическую границу, которая проявляется отраженными, преломленными и обменными волнами с разной степенью устойчивости.

Автор не ограничивается региональными сейсмическими исследованиями на территории Печенго-Аллареченского района. Он также рассматривает комплексные исследования ГСЗ, ОГТ, МОВЗ—МРС в пределах других районов Фенноскандинавского щита, что в совокупности формирует целостную и разноцветную картину, где каждый ее элемент занимает свое место.

Далее автор затрагивает важные теоретические и практические вопросы изучения литосферы докембрийских щитов.

Детальное изучение строения литосферы Фенноскандинавского щита и анализ большого количества экспериментальных данных привели Н. В. Шарова к выводу, что обобщенная модель земной коры изучаемого района представлена тремя струк-

турными этажами, разделенными границами K_1 и K_2 , со скоростями продольных и поперечных волн: 5,8—6,3 и 3,5—3,8 км/с (верхний этаж), 6,4—6,6 и 3,6—3,9 км/с (средний), 6,8—7,3 и 3,7—4,2 км/с (нижний этаж). Заметим, что по результатам анализа большого объема региональных сейсмических исследований ГСЗ на территории Украинского щита подобные скоростные этажи, как правило, не выделяются [Трипольский, 1995]. Такое расхождение в интерпретации результатов исследований может объясняться следующим образом. При наблюдениях методом ГСЗ на Фенноскандинавском щите основное внимание при анализе волновой картины уделялось наблюдениям на больших удалениях от пункта возбуждения. Это обеспечивало преимущества для регистрации головных и закритически отраженных волн и создавало благоприятные условия выделения протяженных волн, которые впоследствии увязывались с субгоризонтальными границами в коре или со скоростными этажами. На Украинском щите интерпретация осуществлялась аналогично, но с одним дополнением — регистрировались также сейсмические волны на вертикальных и субвертикальных лучах, что часто указывало на отсутствие в земной коре протяженных и выдержанных границ, которые в совокупности формируют скоростные этажи.

По-видимому, при последующих исследованиях на территории Фенноскандинавского щита на подобное расхождение следует обратить особое внимание.

При анализе сейсмичности Фенноскандинавского щита автор монографии вполне справедливо подчеркивает, что «несмотря на относительно низкий уровень сейсмической активности, детальное изучение этой территории представляет не только теоретический, научный интерес, но и практическое значение, заметно возросшее в связи с наличием в регионе крупных промышленных комплексов, гидротехнических сооружений и особенно объектов атомной энергетики».

Присоединяясь к этому заключению,

подчеркнем его актуальность и для Украинского щита, что в будущем обоснованно предполагает плодотворное сотрудничество российских и украинских исследователей в данном вопросе.

Рецензируемая монография представляет собой фундаментальное исследование в области изучения строения и динамики литосферы. Основные достоинства монографии заключаются в следующем.

1. В работе собран, систематизирован и проанализирован большой объем научных публикаций и производственных отчетов (с. 26—28, табл. 1).

2. Монография является новым этапом в изучении геолого-геофизическими методами строения и динамики литосферы докембрийских щитов. Результаты исследований, приведенные в монографии, могут быть использованы при составлении и уточнении новых сейсмических и сейсмо-

геологических моделей земной коры и литосферы не только Фенноскандинавского, но и других докембрийских щитов Земли.

3. Работа рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области изучения земной коры и литосферы докембрийских щитов, а также на студентов, аспирантов и молодых специалистов, интересующихся тайнами земных глубин.

4. Высокий научный уровень монографии В. Н. Шарова создает обоснованные предпосылки для ее представления к премии. В этом плане данная рецензия может рассматриваться в качестве соответствующего представления¹.

В заключение подчеркнем, что в полиграфическом плане монография издана прекрасно.

¹ Заметим, что один из авторов этого отзыва был официальным рецензентом монографии [Шаров, 2017].

Список литературы

- Изучение* глубинного строения восточной части Балтийского щита и прилегающих акваторий сейсмическими методами. Ред. Н. В. Шаров. Апатиты: КФ АН СССР, 1986. 116 с.
- Кольская* сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. Ред. Е. А. Козловский. Москва: Недра, 1984. 490 с.
- Кольская* сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. Гл. ред. В. П. Орлов, Н. П. Лаверов. Москва: МФ «Технонефтегаз», 1998. 260 с.
- Литосфера* Центральной и Восточной Европы: Восточно-Европейская платформа. Ред. В. Б. Соллогуб, А. В. Чекунов, Р. Г. Гарецкий. Киев: Наук. думка, 1989. 188 с.
- Проблемы* комплексной интерпретации геолого-геофизических данных. Ред. В. А. Глебовицкий, Н. В. Шаров. Ленинград: Наука, 1991. 224 с.
- Сейсмогеологическая* модель литосферы Северной Европы: Баренц-регион. Ред. Ф. П. Митрофанов, Н. В. Шаров. Апатиты: КарНЦ РАН, 1998. Ч. I. 237 с.; Ч. II. 205 с.
- Старостенко В. И., Яник Т., Гинтов О. Б., Лысынчук Д. В., Сьрода П., Чуба В., Коломиец Е. В., Александровский П., Омельченко В. Д., Коминахо К., Гутерх А., Тиура Т., Гринь Д. Н., Легостаева О. В., Тибо Г., Толкунов А. П.* Скоростная модель земной коры и верхней мантии вдоль профиля DOBRE-4 от Северной Добруджи до центральной области Украинского щита. 1. Сейсмические данные. *Физика Земли*. 2017а. № 2. С. 24—35.
- Старостенко В. И., Яник Т., Гинтов О. Б., Лысынчук Д. В., Сьрода П., Чуба В., Коломиец Е. В., Александровский П., Омельченко В. Д., Коминахо К., Гутерх А., Тиура Т., Гринь Д. Н., Легостаева О. В., Тибо Г., Толкунов А. П.* Скоростная модель земной коры и верхней мантии вдоль профиля DOBRE-4 от Северной Добруджи до центральной области Украинского щита. 2. Геотектоническая интерпретация. *Физика Земли*. 2017б. № 2. С. 36—44.
- Строение* литосферы российской части Ба-

- ренц-региона. Ред. Н. В. Шаров, Ф. П. Митрофанов, М. Л. Вербя, К. Гиллен. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 159 с.
- Трипольский А. А. Структура земной коры древних щитов по сейсмическим данным: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Киев, 1995. 46 с.
- Трипольский А. А., Шаров Н. В. Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 159 с.
- Шаров Н. В. Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным. Апатиты: КарНЦ РАН, 1993. 243 с.
- Шаров Н. В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 173 с.
- Шаров Н. В., Исанина Э. В., Пожиленко В. И., Ступак В. М. Повышение достоверности геологических моделей земной коры района полуостровов Средний-Рыбачий на основе комплексирования сейсмических методов ОГТ, ГСЗ, МРС. *Уральский геофиз. вестник*. 2007. № 4. С. 98—105.
- European Lithosphere Dynamics, 2006. Eds. D. G. Gee, R. A. Stephenson. *Geological Society. London. Memoirs*. № 32. 662 p.
- Grad M., Gryn' D., Guterch A., Janik T., Keller R., Lang R., Lyngsie S. B., Omelchenko V., Starostenko V. I., Stephenson R. A., Stovba S. M., Thybo H., Tolkunov A. P., 2003. «DOBREFraction'99» — velocity model of the crust and upper mantle beneath the Donbas foldbelt (East Ukraine). *Tectonophysics* 371(1-4), 81—110. doi: 10.1016/S0040-1951(03)00211-7.
- Kharitonov O., Tripolsky A., 1994. Stratification of the upper lithosphere of the Ukrainian shield by seismic sounding data. *Acta Geophysica Polonica* 42(2), 137—148.
- Luosto U., 1987. Deep seismic sounding Studies in Finland 1979—1986. Inst. Seismol. Univ. Helsinki. 21 p.
- Starostenko V., Janik T., Kolomiyets K., Czuba W., Šroda P., Grad M., Kovacs I., Stephenson R., Lysynchuk D., Thybo H., Artemieva I., Omelchenko V., Gintov O., Kutas R., Gryn D., Guterch A., Hegedüs E., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A., 2013a. Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics* 608, 1049—1072. doi: 10.1016/j.tecto.2013.07.008.
- Starostenko V., Janik T., Lysynchuk D., Šroda P., Czuba W., Kolomiyets K., Aleksandrowski P., Gintov O., Omelchenko V., Komminaho K., Guterch A., Tiira T., Gryn D., Legostaeva O., Thybo H., Tolkunov A., 2013b. Mesozoic(?) lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *Geophys. J. Int* 195(2), 740—766. doi: 10.1093/gji/ggt292.
- Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Rusakov O., Czuba W., Šroda P., Grad M., Guterch A., Flüh E., Thybo H., Artemieva I., Tolkunov A., Sydorenko G., Lysynchuk D., Omelchenko V., Kolomiyets K., Legostaeva O., Danowski A., Shulgin A., 2017. DOBRE-2 WARR profile: the Earth's upper crust across Crimea between the Azov Massif and the northeastern Black Sea. In: M. Sossou, R. A. Stephenson, S. A. Adamia (eds). *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus. Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 428, 199—220.
- Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Šroda P., Thybo H., Artemieva I., Sossou M., Volfman Yu., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A., 2015. Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the north western Black Sea and the Crimea peninsula. *Geophys. J. Int.* 201(1), 406—428. doi: 10.1093/gji/ggv018.
- Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Czuba W., Šroda P., Lysynchuk D., Aizberg R., Garetsky R., Karataev G., Gribik Y., Farfuliak L., Kolomiyets K., Omelchenko V., Komminaho K., Tiira T., Gryn D., Guterch A., Legostaeva O., Thybo H., Tolkunov A., 2018. Lithospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripjat-Dnieper-Donets Basin (Belarus and Ukraine). *Geophys. J. Int.* 212(3), 1932—1962. doi: 10.1093/gji/ggx509.
- Starostenko V., Kharitonov O., Tripolsky A., 1999. Seismic structure of the crust-mantle transition zone of the Ukrainian shield. *Acta Geophysica Polonica* 47(2), 185—201.

Sydorenko G., Stephenson R., Yegorova T., Starostenko V., Tolkunov A., Janik T., Majdanski M., Voitsitskiy Z., Rusakov O., Omelchenko V., 2017. Geological structure of the northern part of the Eastern Black Sea from regional seismic reflec-

tion data including the DOBRE-2 CDP profile. In: M. Sosson, R. A. Stephenson, S. A. Adamia (eds). *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 428(1), 307—321. doi: 10.1144/SP428.15.