

**ОБЪЕМНАЯ МОДЕЛЬ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ
СВЕКОФЕННСКОГО АККРЕЦИОННОГО ОРОГЕНА
И СОПРЕДЕЛЬНОЙ ОКРАИНЫ КАРЕЛЬСКОГО
КРАТОНА: СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ
СЕЙСМОПРОФИЛИРОВАНИЯ МОВ-ОГТ, МТ ЗОНДИРОВАНИЯ
И ПЛОТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Минц М. В.¹, Соколова Е. Ю.^{2,3}, Глазнев В. Н.⁴, и рабочая группа ЛАДОГА

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия, michael-mints@yandex.ru

²Институт физики Земли РАН, Москва, Россия, sokol_l@mail.ru

³Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

*⁴Воронежский Государственный Университет, Воронеж, Россия,
glaznev@geol.vsu.ru*

**3D MODEL OF DEEP STRUCTURE OF THE SVECOFENNIAN
ACCRETIONARY OROGEN AND ADJACENT MARGIN
OF THE KARELIA CRATON: MUTUAL USING OF REFLECTION SEISMIC,
MT SOUNDING AND DENSITY MODELING**

Mints M. V.¹, Sokolova E. Yu.^{2,3}, Glaznev V. N.⁴ and LADOGA_WG

¹Geological Institute of RAS, Moscow, Russia, michael-mints@yandex.ru

²Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia, sokol_l@mail.ru

³Tyumen State University, Tyumen, Russia

⁴Voronezh State University, Voronezh, Russia, glaznev@geol.vsu.ru

Abstract

A 3D model of the deep structure of the Late Paleoproterozoic Svecofennian accretionary orogen is based on coordinated data of geological mapping, reflection seismic survey along profiles FIRE-1-2a-2 and FIRE-3-3a [3], uses cross-sections of the 3D density crustal model, the results of magnetotelluric studies along Vyborg-Suojärvi profile in Northern Ladoga area and previous investigations in Southern Finland [5] (fig. 1–4). The electrically conductive horizons on the SVEKA profile [2] and the series of electro-prospecting profiles [6] were designed for the profile line FIRE-2-2a-1 and interpreted as layers of graphite-bearing metasediments in the accretionary complex, at the base of the Yormua succession and in the South Finland granulite-gneiss belt. Rocks of similar composition were identified in the blind bodies of accretionary complex owing to electrical conductivity anomalies in the cross-section along the FIRE-2-2a-1 profile. The 3D model was used as a starting point for the development of the evolutionary model of the Svecofennian Accretionary Orogen and reconstruction of its role in the history of the Paleoproterozoic Lauro-Russian intracontinental orogeny

that swept the predominant part of Lauroscandia, a paleocontinent that united the North American and East European cratons [4]. The main feature of the Paleoproterozoic evolution of the Svecofennian accretionary orogen and Lauroscandia as a whole was a causal relationship with the superplume development, one of the elements of which was the initiation of plate-tectonic events. In the axial zone of the intracontinental orogen, the Svecofennian–Pre-Labradorian Ocean appeared, after closure of which accretionary orogens were formed along its continental margins.

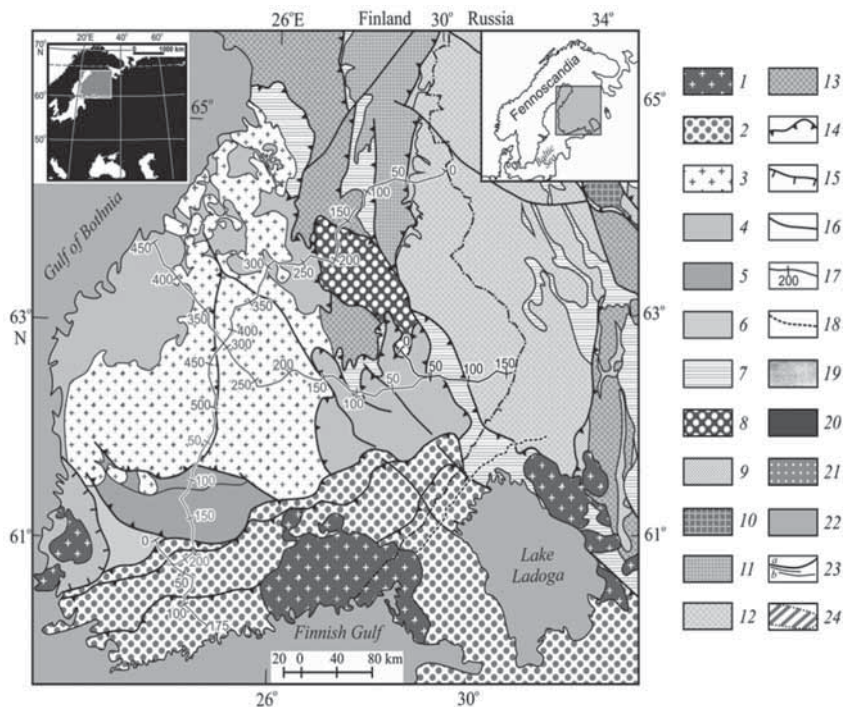


Рис. 1. Геологическая карта юго-востока Фенноскандинавского щита (осадочный чехол удален)

1–7 – палеопротерозой: 1 – граниты-рапакиви, 2 – Южно-Финляндский гранулитогнейсовый пояс, 3 – Центрально-Финляндский гранитоидный комплекс, 4–7 – вулканогенно-осадочные пояса: 4 – Похьянмаа, Саво, Саимаа, 5 – Пирканмаа-Тампере, 6 – Хамеенлинна, 7 – Ладога-Ботнический (пассивная окраина Карельского кратона); 9–14 – архей: 9 – зеленокаменные пояса (Суомуссалми-Кухмо-Типасъярви и др.), 10–14 – микроконтиненты (гранит-зеленокаменные области): 10 – Рануа, Иисалми и Водлозерский, 11 – Киаанта, 12 – Кухмо-Сегозерский, 13 – Ковдозерский. 14–16 – тектонические границы: 14 – надвижки и взбросо-надвижки,

15 – сбросы, 16 – сбросо-сдвиги. 17 – сейсмопрофили проекта FIRE (выделены цветными линиями): FIRE-1 – фиолетовый, FIRE-2a – оранжевый, FIRE-2 – красный, FIRE-3a – зеленый, FIRE-3 – черный; 18 – профиль МТЗ «Выборг-Суоярви». 19–24 – дополнительные обозначения на геологических разрезах: 19 – сейсмический образ, предположительно, кора аккреционного комплекса; 20 – зона рефлексивити в нижней коре, предположительно образованной при участии андер- и интерплейтинга мантийных мафитовых магм; 21 – акустически однородная область, предположительно, область интенсивной метаморфической переработки; 22 – мантия, 23 – тектонические границы (а) и границы структурных доменов (б), 24 – области повышенной электропроводности.

Fig. 1. Geological map of the southeastern Fennoscandian shield (sedimentary cover removed)

1–7 – Paleoproterozoic: 1 – rapakivi-granite, 2 – South Finland granulite-gneiss belt, 3 – Central-Finland Granitoid Complex, 4–7 – volcanic-sedimentary belts: 4 – Pohjanmaa, Savo, Saimaa, 5 – Pirkanmaa-Tampere, 6 – Hämeenlinna, 7 – Ladoga-Bothnian (passive margin of the Karelia craton); 9–14 – Archaean: 9 – greenstone belts (Suomussalmi-Kuhmo-Tipasajärvi, etc.), 10–14 – microcontinents (granite-greenstone terranes): 10 – Ranua, Iisalmi and Vodlozero, 11 – Kianta, 12 – Kuhmo-Segozero, 13 – Kovdozero. 14–16 – tectonic boundaries: 14 – thrusts, 15 – normal faults, 16 – strike-slip faults. 17 – seismic profiles of the FIRE project (highlighted in color): FIRE-1 – purple, FIRE-2a – orange, FIRE-2 – red, FIRE-3a – green, FIRE-3 – black; 18 – MTZ profile “Vyborg-Suoyärvi”. 19–24 – additional symbols on geological cross-sections: 19 – seismic image, suggested crust of accretion complex; 20 – low-crustal reflectivity zone, suggested to be formed with the participation of the under- and interplating of mantle mafic magmas; 21 – an acoustically homogeneous region, presumably a region of intense metamorphic reworking; 22 – mantle, 23 – tectonic boundaries (a) and boundaries of structural domains (b), 24 – areas of increased electrical conductivity.

Объемная модель глубинного строения поздне-палеопротерозойского Свекофеннского аккреционного орогена базируется на скоординированных данных геологического картирования, сейсморазведки в отраженных волнах по профилям FIRE-1-2a-2 и FIRE-3-3a [3], включает и использует сечения 3-мерной плотностной модели коры, результаты магнитотеллурических исследований по профилю Выборг–Суоярви в Северном Приладожье и ранее проведенных магнитотеллурических исследований в Южной Финляндии (рис. 1–4). Дополнительная информация о составе пород Свекофеннского аккреционного орогена и пассивной окраины Карельского кратона, в том числе, в глубинных сечениях, была заимствована из ранее опубликованных магнитотеллурических материалов (геоэлектрических разрезов) [5]. Повышенная электропроводность связана с графитсодержащими породами, часто с примесью сульфидов. Скрытокристаллический и/или неполнокристаллический графит присутствует в осадочных породах низкой и умеренной степени метаморфизма, крупно-среднечешуйчатый графит характерен для гранулитов.

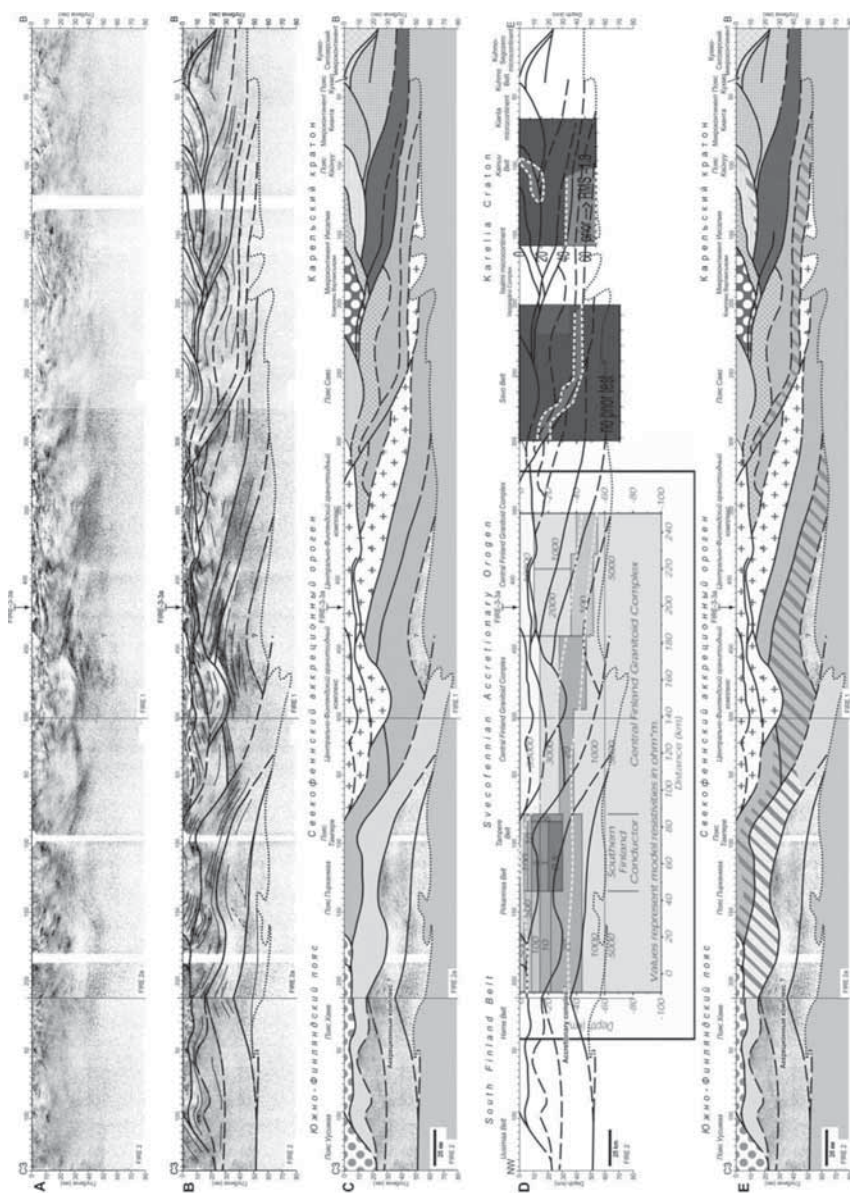


Рис. 2. Земная кора и коро-мантийная граница по профилю FIRE-2-2a-1

А – мигрированный сейсмический разрез по [3]; В – мигрированный сейсмический разрез с выделенными геологическими границами (см. условные обозначения к рис. 1); С – сейсмогеологическая модель; D – структурный «скелет» сейсмогеологической модели с вынесенными данными о распределения кажущегося сопротивления: слева – результаты МТ зондирований в южной части профиля SVEKA, практически совпадающего по положению с сейсмопрофилем (значения сопротивлений блоков модели даны в Ом·м) (по [2]), в центре и в восточной части профиля – модели электросопротивления, спроецированные с близ расположенных профилей (красным цветом показаны коровые проводники) (по [6]); Е – интерпретационный геологический разрез с нанесенными зонами повышенной электропроводности.

Fig. 2. Earth crust and crust-mantle boundary along FIRE-2-2a-1 profile

A – migrated seismic section after [3]; B – migrated seismic section with geological boundaries (see Fig. 1 for legend); C – seismic-geological model; D – the structural skeleton of the seismic-geological model with data on the distribution of apparent electrical resistance: on the left – the results of MT soundings in the southern part of the SVEKA profile, practically coinciding in position with the seismic profile (the impedance values of the model blocks are given in Ωm) (after [2]), in the central and in eastern parts of the profile – electric resistivity models projected from close-lying profiles (red color shows the crustal conductors) (after [6]); E – interpretational geological section with zones of increased electrical conductivity.

Проводящие горизонты на профиле SVEKA [2] и на серии электроразведочных профилей [6] с учетом геологического строения были спроектированы на линию профиля FIRE-2-2a-1 и проинтерпретированы как слои графит-содержащих метаосадков в разрезе аккреционного комплекса (в частности, в поясе Тампере) и в основании разреза пояса Кайнуу. В дальнейшем, по аномалиям электропроводности были выделены породы аналогичного состава в «слепых» телах аккреционного комплекса в сечении профилем FIRE-2-2a-1.

Подробная характеристика магнитотеллурических исследований по профилю Выборг–Суоярви представлена в докладе Е. Ю. Соколовой с соавторами.

Для аккреционного комплекса характерна наклонная тектоническая расчлененность: тектонические пластины мощностью порядка 15 км, образованные вулканогенно-осадочными ассоциациями, включающими электропроводящие графитоносные осадки, и гранитодами, монотонно-последовательно погружаются в восточном направлении. При достижении уровня нижней коры тектонические пластины аккреционного комплекса утрачивают четкие очертания и на картине сейсмических отражений замещаются однообразной акустически полупрозрачной средой, в которой лишь фрагментарно прослеживаются границы отдельных пластин. Коро-мантийная граница имеет

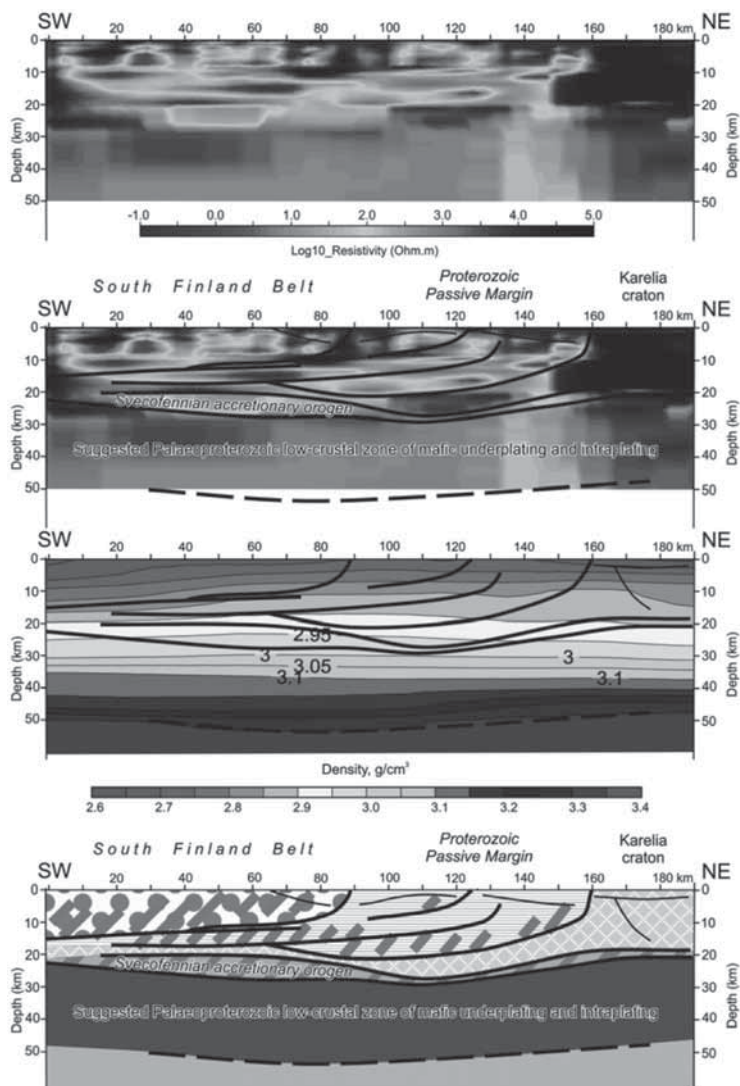


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по линии Выборг–Суоярви

Fig. 3. Geoelectric section along the line of Vyborg–Suojärvi

А – глубинный разрез кажущегося электрического сопротивления, В – тот же разрез с нанесенными тектоническими границами, выделенными с учетом плотностной модели и данных о геологическом строении, С – сечение объемной плотностной модели [1], D – интерпретационный геологический разрез, условные обозначения см. на рис. 1.

A – depth section of the apparent electrical resistance, B – the same section with the tectonic boundaries taking into account the density model and data on the geological structure, C – cross-section of the 3D density model [1], D – interpretational geological section, see fig. 1 for legend.

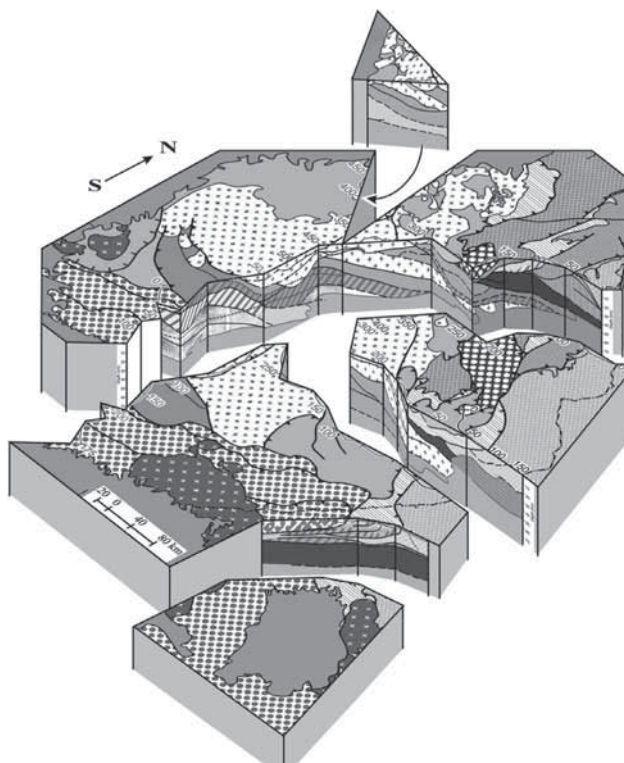


Рис. 4. Трехмерная модель (блок-диаграмма) глубинного строения Свекофеннского аккреционного орогена и сопредельных тектонических структур – Карельского крона и Южно-Финляндского гранулитогнейсового пояса

Условные обозначения см. на рис. 1.

Fig. 4. A 3D model of the deep structure of the Svecofennian accretionary orogen and adjacent tectonic structures, the Karelian craton and the South Finland granulite-gneiss belt
See Fig. 1 for legend

диффузный характер: переход от коры к мантии фиксируется постепенным исчезновением смутно прорисованных границ тектонических пластин и постепенным переходом акустически гомогенизированной и полупрозрачной нижней коры в прозрачную мантию. Под воздействием эндогенного теплового потока аккреционный комплекс подвергался высокотемпературному метаморфизму и парциальному плавлению. «Размывание» контактов пород, которые в исходном состоянии создавали контрасты акустической жесткости, связано с плавлением и смешением парциальных расплавов. Объемная модель использована в качестве отправной точки для развития эволюционной модели Свекофеннского аккреционного орогена и определения его места в истории палеопротерозойского Лавро-Русского внутриконтинентального орогена, охватившего преобладающую часть территории Лавроскандии – палеоконтинента, объединявшего Северо-Американский и Восточно-Европейский кратоны [4]. Модель включает три этапа развития Лавро-Русского орогена (~2.5, 2.2–2.1 и 1.95–1.87 млрд лет). Главная особенность палеопротерозойской эволюции Свекофеннского аккреционного орогена и Лавроскандии в целом состояла в причинной связи с развитием суперплума, одним из элементов которого явилась инициализация событий тектоно-плитного типа. В осевой зоне внутриконтинентального орогена возник Свекофеннский–Пре-Лабрадорский океан, при закрытии которого вдоль обрамляющих континентальных окраин были сформированы аккреционные орогены.

Благодарности

Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку проектов №№ 15-05-01214, 16-05-00543, 16-05-00975. Работа поддержана ФАНО России (проект 0135-2016-0014)

Acknowledgments

The authors are grateful to the Russian Foundation for Basic Research for supporting projects No. 15-05-01214, 16-05-00543, 16-05-00975. The work was supported by FASO of Russia (project 0135-2016-0014)

Список литературы

1. Glaznev V. N. Complex geological–geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and crust–mantle boundary / V. N. Glaznev, M. V. Mints, O. M. Muravina, A. B. Raevsky, L. G. Osipenko // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015. V. 6, N. 2. P. 133–170. doi:10.5800/GT-2015-6-2-0176

2. Korja T. Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield / T. Korja, M. Engels, A. A. Zhamaletdinov, A. A. Kovtun, N. A. Palshin, M. Yu. Smirnov, A. D. Tokarev, V. E. Asming, L. L. Vanyan, I. L. Vardaniants, the BEAR Working Group // *Earth Planets Space*. 2002. V. 54. P. 535–558.
3. Kukkonen I. T. Finnish Reflection Experiment FIRE 2001–2005 / I. T. Kukkonen, R. Lahtinen (Eds.) // *Geological Survey of Finland Special Paper*. Helsinki. 2006. V. 43. 247 p.
4. Mints M. V. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure / M. V. Mints, K. A. Dokukina, A. N. Konilov, I. B. Philippova, V. L. Zlobin, P. S. Babayants, E. A. Belousova, Yu. I. Blokh, M. M. Bogina, W. A. Bush, P. A. Dokukin, T. V. Kaulina, L. M. Natapov, V. B. Piip, V. M. Stupak, A. K. Suleimanov, A. A. Trusov, K. V. Van, N. G. Zamozhniaya // *The Geological Society of America Special Paper*. 2015. V. 510. 433 p.
5. Sokolova E. Yu. Results of synchronous magnetotelluric and magnetovariational sounding of Ladoga conductivity anomaly / E. Yu. Sokolova, N. S. Golubtsova, A. A. Kovtun, V. A. Kulikov, I. N. Lozovsky, P. Yu. Pushkarev, I. I. Rokityansky, Ya. V. Taran, A. G. Yakovlev // *Geophysics*. 2016. N 1. P. 48–61 (in Russian).
6. Vaittinen, K. High-resolution magnetotelluric studies of the Archaean–Proterozoic border zone in the Fennoscandian Shield, Finland / K. Vaittinen, T. Korja, P. Kaikkonen, I. Lahti, M. Yu. Smirnov // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 188. P. 908–924.