

Напряжённое состояние Фенноскандии. Сравнение данных тектонофизики и математического моделирования

Мягков Д.С.^{}, Бондарь И.В.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, dsm@ifz.ru; bond@ifz.ru

Аннотация. В работе рассматривается вопрос об особенностях напряжённо-деформированного состояния коры Фенноскандии. Первая часть исследования посвящена изучению вопроса о строении доминирующего поля напряжений и его происхождении, показано, что несмотря на обилие локальных структур с собственными полями напряжения, в целом доминирует единое региональное поле напряжений с северо-западными ориентациями оси максимального сжатия. Следующая часть посвящена численному моделированию формирования подобного напряжённого состояния. Моделирование ведётся по двумерным профилям восточной Фенноскандии, основные результаты представлены для профиля SVEKA. Созданные численные геодинамические модели нагружались различным образом, показано, что как общее нагружение в условиях северо-западного сжатия, так и генерация остаточных гравитационных напряжений за счёт денудации создают соответствующее природным данным напряжённое состояние коры.

Ключевые слова: Разломы, геодинамика, математическое моделирование, Фенноскандия, тектонофизика.

The tense state of Fennoscandia. Comparison of tectonophysics and mathematical modeling data

Myagkov D.S.^{}, Bondar I.V.

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, dsm@ifz.ru; bond@ifz.ru

Abstract. The article considers the issue of the features of the stress-strain state of the crust of Fennoscandia. The first part of the study is devoted to the study of the structure of the dominant stress field and its origin, it is shown that despite the abundance of local structures with their own stress fields, in general, a single regional stress field with northwestern orientations of the axis of maximum compression dominates. The next part is devoted to numerical modeling of the formation of such a stress state. Modeling is carried out on two-dimensional profiles of eastern Fennoscandia, the main results are presented for the SVEKA profile. The created numerical geodynamic models were loaded in various ways, it is shown that, as a general loading under conditions of northwestern compression, the generation of residual gravitational stresses due to denudation creates a stress state of the crust corresponding to natural data.

Key words: Faults, geodynamics, mathematical modeling, Fennoscandia, tectonophysics.

Введение

Поле напряжения в пределах Фенноскандии является многофакторным, образуется посредством нескольких источников. Срединно-Атлантический хребет оказывает наибольшее влияние на поле напряжения, которое прослеживается на всей территории Фенноскандинавского щита, в различных тектонических структурах и породах. В западной Фенноскандии это влияние более явное, на что указывает решения фокальных механизмов большого количества землетрясений (Lindhölm et al., 2000; Olaiz et al., 2009). В Восточной Фенноскандии рядом исследователей (Бабак и др., 1981; Сим и др., 2011) выявлено северо-западное сжатие, но проявлено оно здесь не так четко, зачастую более выражено северо-восточное сжатие (Бондарь, Маринин, 2021). Общая картина ориентации псевдоглавных осей дана в работе (Heidbach et al., 2018).

Гляциоизостазия – поднятие кристаллического щита после таяния ледника и, соответственно, активизация разломов – второй источник напряжений. Гляциоизостазия влияет на распределение напряжений, однако в целом на Фенноскандию не наблюдается четкой радиальной картины в ориентировки напряжений (Olesen et al., 2013), что объясняется низким вкладом этого источника в региональное поле напряжений. При этом большинство слабых землетрясений расположено в Ботническом заливе, где наблюдается максимум современного поднятия и интенсивное поднятие

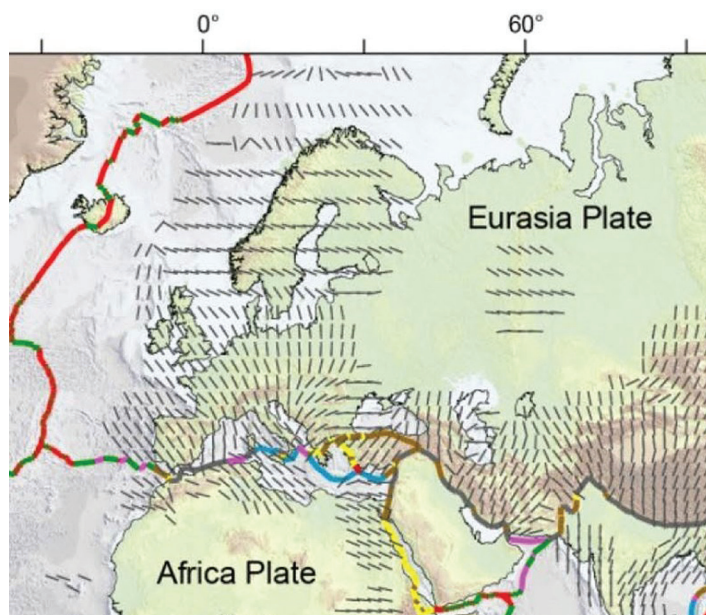


Рис. 1. Ориентации псевдоглавных осей максимального сжатия Фенноскандии из работы (Heidbach et al., 2018).

Fig. 1. Orientations of pseudoprincipal axes of maximum compression in Fennoscandia from (Heidbach et al., 2018).

предотвращает накопление больших напряжений, так как их разрядка происходит раньше. А на юге Фенноскандии тектонические движения слабые, медленные, что приводит к длительному накоплению напряжений и соответственно высокомагнитудным землетрясениям (Wahlström R., 1993).

Третий источник напряжения, четко зафиксированный в основном на западе Фенноскандии, представляет собой последствия эрозионной деятельности в одной части щита и мощное осадконакопление в другой (Olesen et al., 2013).

Остальные источники приурочены к локальным геологическим структурам и не влияют на общее поле напряжения, а, наоборот, генерируют свое внутреннее поле. Так, например, в пределах Печенгской структуры выделено три толщи с различным напряженным состоянием и механизмом деформации (Николаев, 1992). Верхняя часть данной структуры, испытывающая деформацию поперечного изгиба, имеет субвертикальную ориентировку оси сжатия и растяжение, вытянутое в меридиональном направлении. Средняя часть испытывает деформацию продольного расплющивания с субвертикальной ориентировкой оси растяжения и равномерным сжатием в горизонтальном направлении с выдавливанием деформируемого материала вверх. Нижняя часть характеризуется субгоризонтальной ориентировкой как оси сжатия, так и относительного растяжения. Такая ориентировка свидетельствует о проскальзывании отложений печенгской серии и верхней части архейских образований относительно подстилающих пород. В пределах Хибинского массива наблюдается несколько полей напряжений (Бондарь, Маринин, 2022), которые накладываются друг на друга на фоне генерируемых самим массивом напряжений при активном развитии (Жиров и др., 2018).

При этом в разных районах Фенноскандии фиксируются высокие горизонтальные напряжения сжатия в коренных породах приповерхностных частей земной коры. Величина таких напряжений достигает 70 МПа, что отвечает уровню литостатического давления для глубин более 1300 м (Myrvang, 1993; Ребецкий и др., 2017)].

Создание численной модели. Методика расчёта

Область исследования представлена на рисунке 2. В неё входит Восточная Фенноскандия, в основном рассматривается область Свекофеннского блока, разделяющегося на несколько протерозойских поясов, Ладожско-Ботнической зоны и Карельского архейского мегаблока в восточной части. Для изучения коры рассматриваемого региона методами численного моделирования были выбраны профили, по которым имеются данные глубинной электроразведки, на рисунке 2 данные профили выделены чёрным цветом – профиль SVEKA и профиль 2–6 Рыбачий-Ковдор-Видлица. Основные результаты в данной работе будут представлены именно для профиля SVEKA.

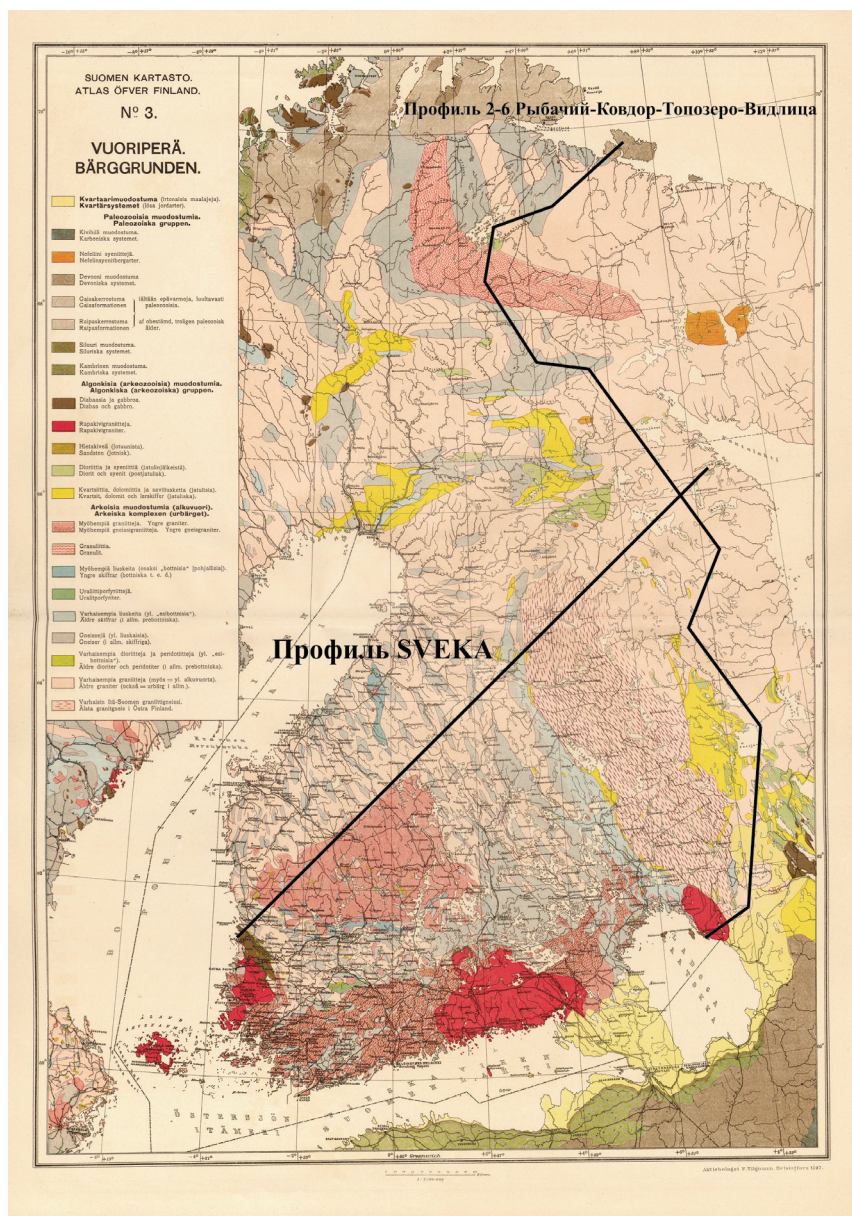


Рис. 2. Расположение изучаемых профилей на геологической карте Восточной Фенноскандии.

Fig. 2. Location of the studied profiles on the geological map of Eastern Fennoscandia.

Для создания численной модели использовались данные сейсморазведки, преимущественно 3D скоростные модели земной коры Фенноскандии Глазнева (Glaznev et al., 1983) и Шарова (Sharov & Mitrofanov, 2014). Также для более корректного задания распределения упругопрочностных параметров использовались данные теплового поля и геоэлектрических разрезов (Korya, Lahti, Pedersen, 2006; Zhamaletdinov, Petrishchev, 2015). На рисунке 3 приведён геоэлектрический разрез по профилю SVEKA из работы (Korya, Lahti, Pedersen, 2006). Хорошо прослеживается явная латеральная неоднородность литосферы профиля, наиболее отличны породы холодного и прочного высокоомного архейский Карельский блок и низкоомные трещиноватые породы Центрально-Финляндского гранитоидного пояса.

Сама численная модель строилась в программной среде фортран и представляет собой массив данных со значениями плотностей, значений упругих модулей (или скоростей p - и s - волн) и значений коэффициента угла внутреннего трения и когезии. Плотности и скорости упругих волн в основном соответствуют данным Глазнева. Методика численного моделирования представлена в работе (Стефанов, 2005). Применяется конечно-разностная численная схема, моделирование ведётся

ся в двумерной постановке, механически тела модели являются упруго-пластическими, используется неассоциированный закон пластического течения, именно – модель Друкера-Прагера-Николаевского (Николаевский, 1972; Друкер, Прагер, 1975), адаптированная для применения в геомеханике. Сама модель реализована на однородной сетке 500×500 м размером 900×70 км (252000 ячеек). Более подробно о методе численного расчёта можно прочесть в (Ребецкий и др., 2018).

Для расчёта границы модели рассматривались как закреплённые по нормали и скользящие. Активные граничные условия задавались в соответствии с рассматриваемым геодинамическим механизмом, ответственным за формирование тектонических напряжений коры Фенноскандии. В качестве таких механизмов рассматривались давление со стороны срединно-океанического хребта, а также денудационный механизм, описанный в работе (Ребецкий и др., 2017). Показано, что при сильной денудации (первые сотни м – км) породы, переходя из закритического состояния в упругое, разгружаясь генерируют аномальные напряжения горизонтального сжатия, по уровню достигающие первых десятков МПа и способных объяснить наблюдаемые коровые напряжения Восточной Фенноскандии. При этом гляциоизостазия, как таковая, в рамках текущей работы не рассматривается.

Результаты моделирования. Выводы

Полученные данные о формировании напряжённого состояния коры вдоль профиля SVEKA позволили воспроизвести наблюдаемое по сейсмическим и тектонофизическим данным напряжённое состояние. На рисунке 4 представлена общая схема модели (её основные структурные части, внутри которых также задавалось неоднородное распределение упруго-прочностных параметров) и структура напряжённого состояния на разных этапах моделирования (в виде отношения вертикальных и горизонтальных напряжений). На первом этапе моделирования нагружение осуществлялось гравитационными силами. Поле напряжений неоднородно как по глубине, так и по горизонтальному направлению, но наибольшее влияние оказало наличие мощного прогиба Мохо в центральной части профиля, в результате чего в области Ладожско-Ботнической зоны (см. рис. 3) гравитационные напряжения минимальны. Структура напряжённого состояния (см. рис. 4 b) зависит от принадлежности к основным частям модели, но для коры везде наблюдается обстановка вертикального сжатия (отношение вертикальных и нормальных напряжений больше 1), а для мантии – гидростатическое напряжённое состояние. В случае дополнительной нагрузки модели, связанной с денудацией, возникают аномальные напряжения горизонтального сжатия в Верхней коре. Так как модель неоднородна по латерали и денудация, вследствие ненулевого рельефа также задавалась неравномерно, области преобладания горизонтального сжатия над вертикальным (синим цветом на рис. 3 c) наблюдаются в модели локально. Максимального уровня (около 15 МПа)

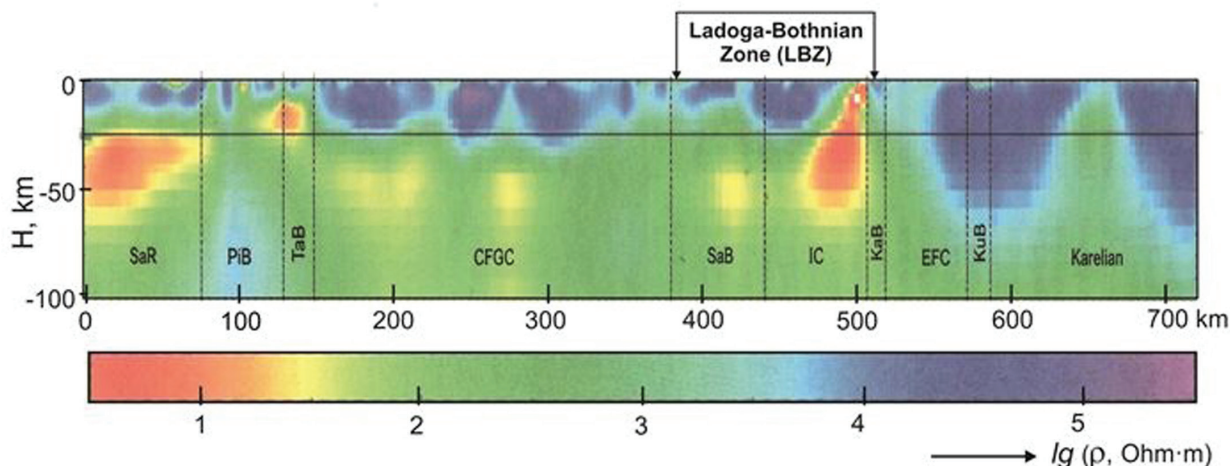


Рис. 3. Кажущиеся сопротивления вдоль профиля SVEKA. (Корья и др., 2006).

Fig. 3. Apparent resistance along the SVEKA profile. (Korya et al., 2006).

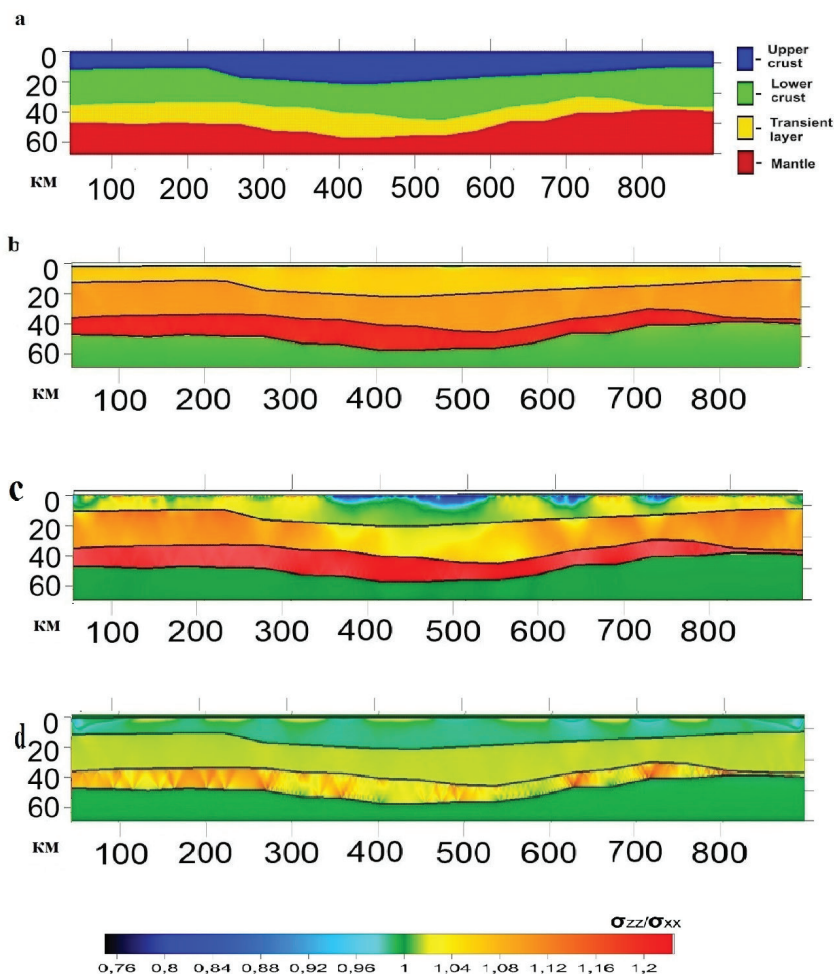


Рис.4. Общая схема модели (а) и отношение вертикальных и горизонтальных напряжений на разных этапах моделирования. b – гравитационная нагрузка, с – денудационная, d – тектоническая.

Fig. 4. The general scheme of the model (a) and the ratio of vertical and horizontal stresses at different stages of modeling. b – gravity load, c – denudation, d – tectonic.

они достигают в Ладожско-Ботнической зоне и западнее. Совершенно иной результат получен при нагружении модели «тектоническими» напряжениями (согласно региональному полю напряжений). В силу ЮЗ-СВ простирания профиля SVEKA нагружение сравнительно равномерно распределено по профилю, результаты представлены на рисунке 4 d. Хотя кора в целом ближе к обстановке горизонтального сжатия, чем в предыдущем случае, горизонтальные напряжения преобладают только в Верхней коре, причём и её напряжённое состояние близко к гидростатическому. Это соответствует наклонному положению оси максимального сжатия, хотя её проекция и будет совпадать по направлению в псевдоглавной ось.

Рассмотренные в работе модели показывают, что воспроизвести наблюдаемое по природным данным поле напряжений в модели можно различным образом. Модель с денудационным нагружением показала большее соответствие природным данным, но окончательную верификацию можно будет провести при получении новых тектонофизических данных о распределении напряжений в коре Восточной Фенноскандии по глубинным уровням.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФ № 22-17-00208.

Литература

1. Бабак В.И., Сим Л.А., Касаткин Ф.Г. Вариации тектонического поля напряжений восточной части Балтийского щита // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1981. Т. 56. Вып. 1. С. 150.

2. Бондарь И.В., Маринин А.В. Следы поля напряжений северо-восточного сжатия на Кольском п-ове (центральная часть Мурманской области) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. С. 64–68. DOI: 10.31241/FNS.2021.18.011.
3. Бондарь И.В., Маринин А.В. Особенности новейшей тектоники южной части Хибинского массива по тектонофизическим данным // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. Т. 19. С. 11–14.
4. Жиров Д.В., Маринин А.В., Жирова А.М., Сим Л.А. Неотектоника южной части Хибинского массива: результаты комплексной интерпретации противоречивых явлений // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН 2018. Апатиты. 2018. С. 140–143 с.
5. Николаев П.Н. Методика тектоно-динамического анализа. М.: Недра. 1992. 295 с.
6. Николаевский В.Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности // Механика твёрдых деформируемых тел. Т. 6. Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ АН СССР 1972. С. 5–81.
7. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 3. С. 54–73.
8. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Козырев А.А. О возможном механизме генерации избыточного горизонтального сжатия рудных узлов Кольского п-ова (Хибины Ловозеро, Ковдор) // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 4. С. 263–280.
9. Сим Л.А., Жиров Д.В., Маринин А.В. Реконструкция напряженно-деформированного состояния восточной части Балтийского щита // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 3. С. 219–243. doi:10.5800/GT2011230044.
10. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупко-пластичных материалов // Физ. мезомех. 2005. Т. 8. № 3. С. 129–142.
11. Glaznev V.N. Complex geophysical models of a lithosphere of the Fennoscandian. 2003. Apatity: «K&M». 252 p.
12. Heidbach O., Ziegler M.O. Smoothed Global Stress Maps Based on the World Stress Maps Database Release 2016. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/WSM.2018.002>.
13. Lindholm C.D., Bungum H., Hicks E., Villagran M. Crustal stress and tectonics in Norwegian regions determined from earthquake focal mechanisms // Geological Society, London, Special Publications. V. 167. Is. 1. P. 429–439. Doi.org/10.1144/gsl.sp.2000.167.01.17.
14. Myrvang A.M. Rock Stress and Rock Stress Problems in Norway // Comprehensive rock engineering. 1993. V. 3. P. 461–471. Doi:10.1016/B978-0-08-042066-0.50025-2.
15. Korja T., Lahti I. and Pedersen L. The core conductive structure along the SVEKA profile in the central part of the Baltic Shield // The structure and dynamics of Eastern Europe. Release 2. Moscow. Geocards Geos 2006. P. 113–121.
16. Olaiz J., Muñoz-Martín A., De Vicente G., Vegas R., Cloetingh S. European continuous active tectonic strain-stress map // Tectonophysics. 2009. V. 474. Is. 1–2. P. 33–40. Doi.org/10.1016/j.tecto.2008.06.023.
17. Olesen O., Bungum H., Dehls J., Lindholm C., Pascal C., Roberts D. Neotectonics, seismicity and contemporary stress field in Norway – mechanisms and implications // Quaternary Geology of Norway, Geological Survey of Norway, Special Publication. 2013 a. V. 13. P. 145–174.
18. Sharov N.V. and Mitrofanov F.P. High-speed heterogeneity of the lithosphere of the Fennoscandian (Baltic) shield / Skorostnye neodnorodnosti litosfery Fennoskandinavskogo Shchita. Reports of the Academy of Sciences. 2014. V. 454 (2). P. 221–224. (in Russian).
19. Wahlström R. Fennoscandian seismicity and its relation to the isostatic rebound // Global and Planetary Change. 1993. V. 8. P. 107–112.
20. Zhamaletdinov A.A. & Petrishchev M.S. Three_Dimensional Model of lithosphere Electrical Conductivity of the Fennoscandian Shield Based on the Results of the BEAR and FENICS Experiments. ISSN 1028_334X, Doklady Earth Sciences. 2015. V. 463. Part 1. P. 751–756. © Pleiades Publishing, Ltd. 2015. Original Russian Text © A.A. Zhamaletdinov, M.S. Petrishchev, published in Doklady Akademii Nauk. 2015. V. 463. No. 3. P. 333–338.