

Н.Н. Пиманова, В.А. Спиридонов, Н.В. Шаров, С.В. Мицын

ТРЕХМЕРНОЕ ПЛОТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА В ГИС INTEGRО

Построение 3D-модели распределения плотности в земной коре и мантии проводилось для территории, расположенной в юго-восточной части Фенноскандинавского щита. Структурно-геологическая позиция района работ определяется его приуроченностью на северо-востоке к Карельскому кратону, на юго-западе – к Свекофеннской складчатой области. На изучаемой площади с юго-

востока на северо-запад протягивается Ладожско-Ботническая (Раахе-Ладожская) зона разломов, расположенная на границе вышеперечисленных геоблоков (рис. 1).

Исходные данные. При проведении работ использовались:

- карта гравитационной съемки по сети 1 × 1 км (аномалии Буге, $\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$),

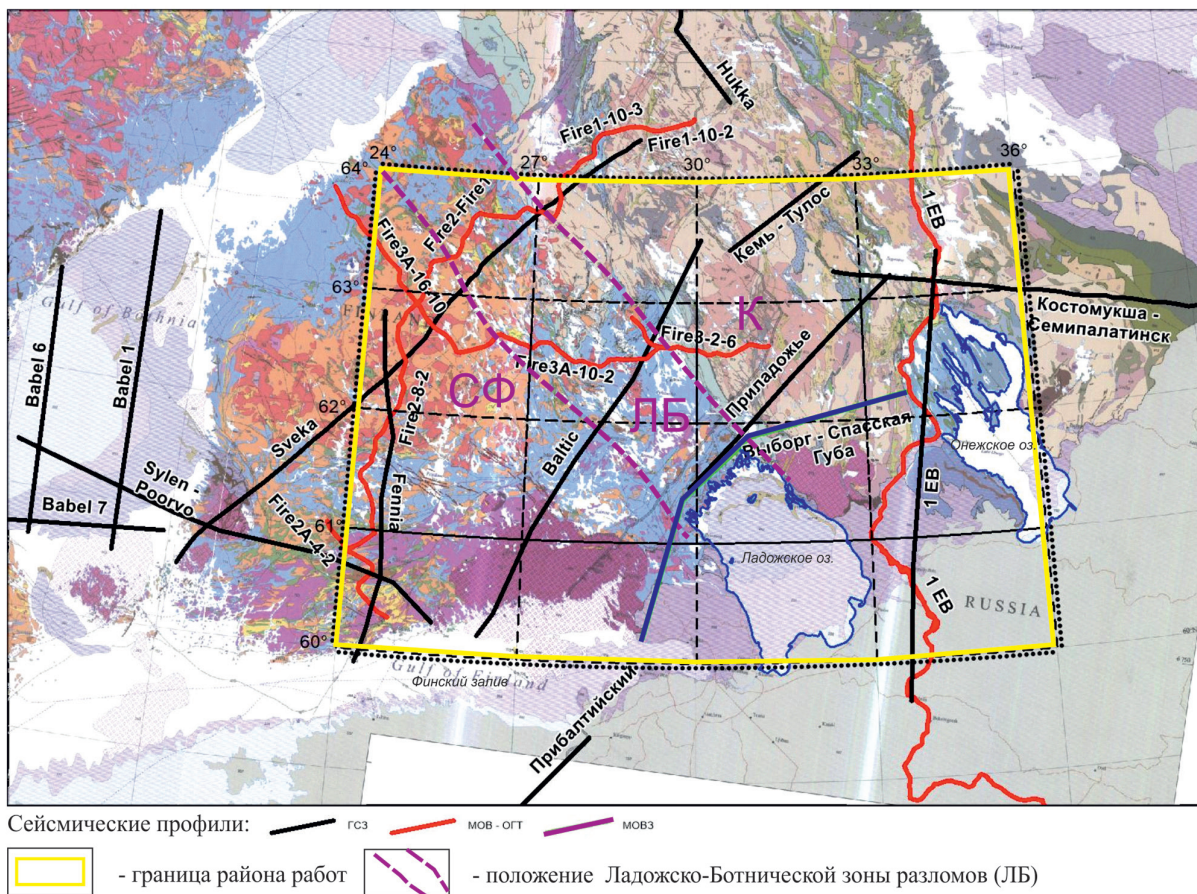


Рис. 1. Район работ и его изученность сейсмическими профилями на фоне геологической карты (GSF). Основные тектонические структуры: К – Карельский блок, СФ – Свекофеннская складчатая область, ЛБ – Ладожско-Ботническая зона разломов

Fig. 1. The DSS profile over the working area on the background of the geological map (GSF). The main tectonic structure: К – Karelian craton, СФ – Svecofennian orogen, ЛБ – Ladoga-Bothnia fault zones

- сейсмические данные по профилям ГСЗ Печенга-Костомукша, Кемь-Тулос, Свека, Фения, Балтик, Лахденпохья-Сегозеро и по профилям ОГТ: EB-1, FIRE 3, FIRE 3A, Выборг-Спасская Губа.

Для интерпретации полученных результатов использовались геологическая (GSF) и петроплотностная карты (рис. 2) [3].

Обработка и анализ данных проводились в программном комплексе ГИС INTEGRО (ФГБУ «ВНИГНИ», отделение «Геоинформатики» «ВНИИ-Геосистем»), который содержит все процедуры, необходимые для расчета плотностных и магнитных моделей и их 2D- и 3D-визуализации.

Методика построения 3D плотностной модели включала несколько этапов:

- выбор модели среды;
- построение геометрического каркаса модели;

- расчет гравитационного эффекта от рельефа глубинных границ и исключение его из наблюдаемого поля;
- расчет 3D-распределения эффективной плотности для редуцированного поля;
- построение 3D-распределения плотности суммированием 3D-распределения плотности с учетом рельефа глубинных границ и 3D-распределения эффективной плотности для редуцированного поля.

Глубинное строение юго-восточной части Фенноскандинавского щита изучено сейсмическими (ГСЗ, ОГТ) и сейсмологическими методами (МОВЗ) (рис. 1). В основу построения геометрии трехмерной плотностной модели консолидированной коры региона была выбрана пятислойная скоростная модель земной коры [1]. Данная модель имеет следующие характеристики: верхний слой (от 0 км до границы К1)

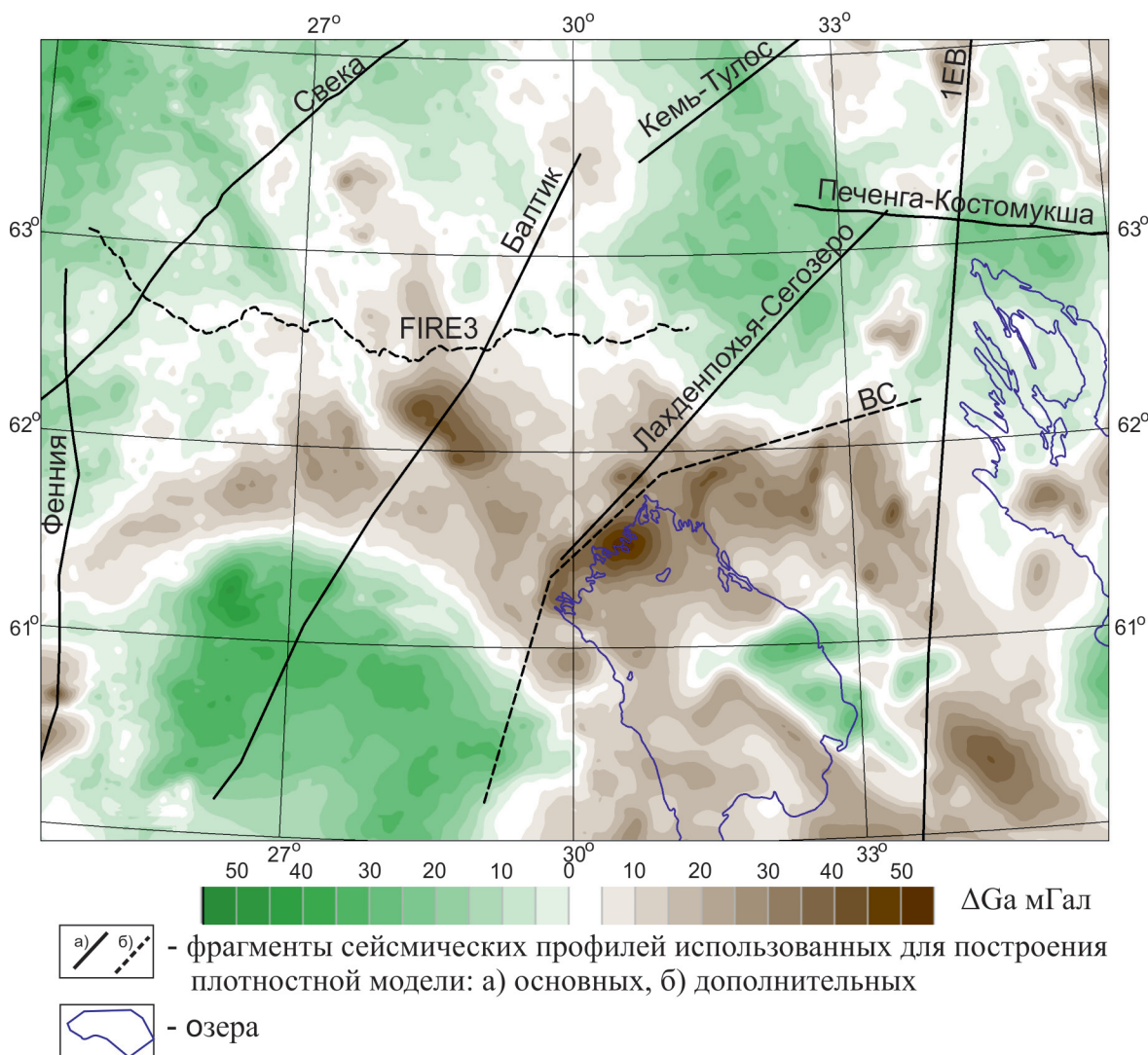


Рис. 2. Гравитационное поле (аномалии Буге, $\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$) юго-восточной части Фенноскандинавского щита

Fig. 2. Gravitational field (anomalies буге, $\sigma = 2,67 \text{ g/cm}^3$) of the South-Eastern part of the Fennoscandian shield

имеет $V_p = 5,90-6,20$ км/с, средний (от границы К1 до границы К2) характеризуется $V_p = 6,30-6,50$ км/с); нижний (от границы К2 до границы Мохо) выделяется по $V_p = 6,60-6,80$ км/с). По данным сейсморазведки вдоль ряда профилей ГСЗ в низах земной коры выявлены области высоких скоростей. Этот слой, выделяемый фрагментарно в нижней коре на границе с поверхностью Мохо, интерпретируется геологами как коромантийная смесь. Он задавался нами в модели как четвертый высокоскоростной слой от поверхности К3 до Мохо (с параметрами $V_p = 7,00-7,30$ км/с. Пятый слой – это мантия, характеризующаяся $V_p = 8,00-8,20$ км/с.

Для построения геометрии границ в 3D плотностной модели нами использовались данные сейсмических исследований. Основу для построения составили данные по профилям: Балтик, Свека, Фения, Лахденпохья-Сегозеро, 1-ЕВ, Печенга-Костомукша, Кемь-Тулос [1], на разрезах которых закартированы соответствующие границы и дано распределение скорости. На отдельных участках площади фрагментарно привлекались разрезы с результатами интерпретации сейсмических разрезов профилей FIRE 3, 3А и Выборг-Спаская губа. Сеть профилей редкая, но достаточная для оценки регионального изменения глубины залегания границ основных разделов земной коры.

Построение глубинных поверхностей осуществлялось с применением многоуровневой интерполяции В-сплайнами. При этом для построения карты глубины залегания поверхности Мохо на первом этапе были проанализированы карты рельефа Мохо ряда авторов [4, 5, 6]. Анализ показал, что ни одна из них не покрывает всю территорию исследований. Поэтому на основе карт глубины залегания поверхности Мохо Шарова Н.В. [4] и Luosto U. [5] была построена сводная карта. Глубины залегания Мохо на сводной карте были скорректированы к данным по сейсмическим профилям. Эта операция была вызвана тем, что при построении мелкомасштабных карт неизбежно происходит осреднение данных в пределах отдельных участков сейсмических профилей, что привело на нашей территории к различию глубин залегания Мохо на разрезах ГСЗ и сводной карте до 8 км. Уточненная карта рельефа поверхности Мохо использовалась в дальнейшем для работы.

Наблюдаемое гравитационное поле вызывается суммарным эффектом от рельефа глубинных поверхностей и от плотностных неоднородностей в слоях земной коры. Для редуцирования наблюдаемого гравитационного поля за эффект рельефа глубинных поверхностей (К1, К2, К3, Мохо) (рис. 3а) была построена пятислойная 3D-модель, в которой

границами слоев служили поверхности К1, К2, К3, Мохо, а распределение плотности было задано постоянным по латерали и градиентным в слоях на глубину (рис. 3б). Модель построена до глубины 80 км по сети $1 \text{ км} \times 1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$ и имеет следующие характеристики: верхний слой (от 0 км до границы К1), $\sigma = 2,70-2,75 \text{ г/см}^3$; средний (от границы К1 до границы К2), $\sigma = 2,75-2,90 \text{ г/см}^3$; нижний (от границы К2 до границы К3 или границы Мохо), $\sigma = 2,90-3,00 \text{ г/см}^3$, четвертый высокоскоростной слой (от поверхности К3 до Мохо), $\sigma = 3,00-3/20 \text{ г/см}^3$. Пятый слой (ниже поверхности Мохо до 80 км), $\sigma = 3,30-3,45 \text{ г/см}^3$. В верхнем слое модели в области Выборгского гранитного массива была задана линза глубиной до 4 км с плотностью на дневной поверхности $2,6 \text{ г/см}^3$.

Для построенной 3D плотностной модели (рис. 3б) была решена прямая задача и рассчитан гравитационный эффект (рис. 4), который затем был вычтен из наблюдаемого поля, что позволило получить остаточное поле, генерируемое только плотностными неоднородностями земной коры.

Далее для полученного остаточного гравитационного поля была решена обратная задача и определено 3D-распределение эффективной плотности в земной коре. Используемый метод для построения распределения эффективной плотности [2] основывается на задании функции, определяющей распределение плотностей по глубинам. В оригинальной работе используется функция Гаусса второго порядка вида $f(r, x) = e^{-r/z}$, при этом ГИС INTEGR0 позволяет использовать расширенную параметризацию вида: $f_{\alpha, \beta}(r, x) = f(r, z\alpha) |z|^{-\beta}$. Меняя параметры α – «множитель по глубине» и β – «экспонента при z », можно получать различные эквивалентные распределения эффективных плотностей и выбирать наиболее подходящие исходя из априорной информации.

В результате был построен ряд эквивалентных 3D-распределений эффективных плотностей. Выбор конкретной композиции основывался на сравнении полученного распределения с сейсмическими моделями по профилям ГСЗ, имеющимся на площади. На рис. 5 приведены сечения по профилю ГСЗ «Балтик» 3D-распределений эффективной плотности при задании различных сочетаний величины параметров «множитель по глубине» и «экспонента при z ». Как видно из рисунка, одни варианты предполагают расположение плотностных неоднородностей в нижней части коры и в верхней мантии (рис. 5а), другие, наоборот, концентрируют практически все неоднородности в верхней части разреза. Нами за основу был выбран вариант расчета с параметрами «множитель по глубине» и «экспонента при z » равными соответственно 3 и -1 . В этом варианте расчета сейсмические границы хорошо согласуются

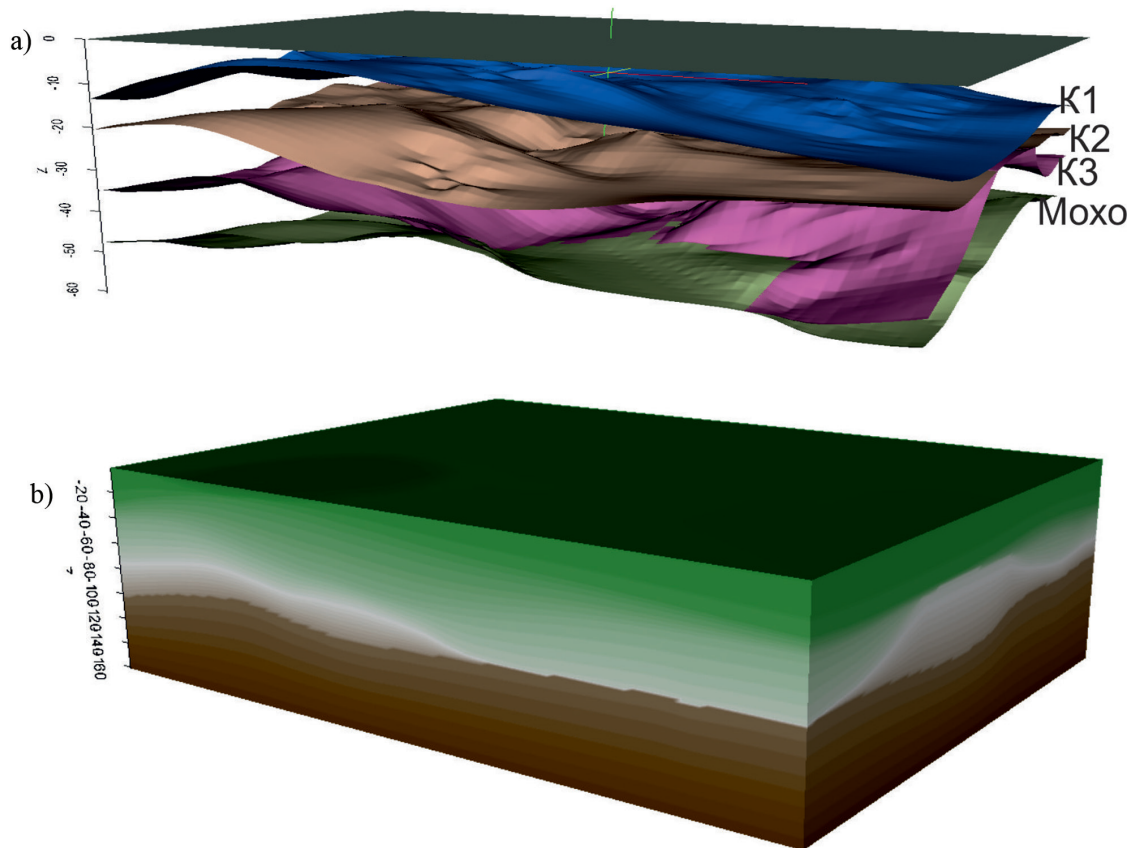


Рис. 3. Пространственное представление глубинных поверхностей K1, K2, K3 и Мохо (a) и 3D-модель распределения плотности, учитывающая рельеф глубинных границ и градиентное изменение плотности с глубиной в слоях земной коры (b)

Fig. 3. Spatial representation of depth surfaces K1, K2, K3 and Moho (a) and 3D density model, taking into account the relief of deep boundaries and gradient density change with depth in the layers of the earth's crust

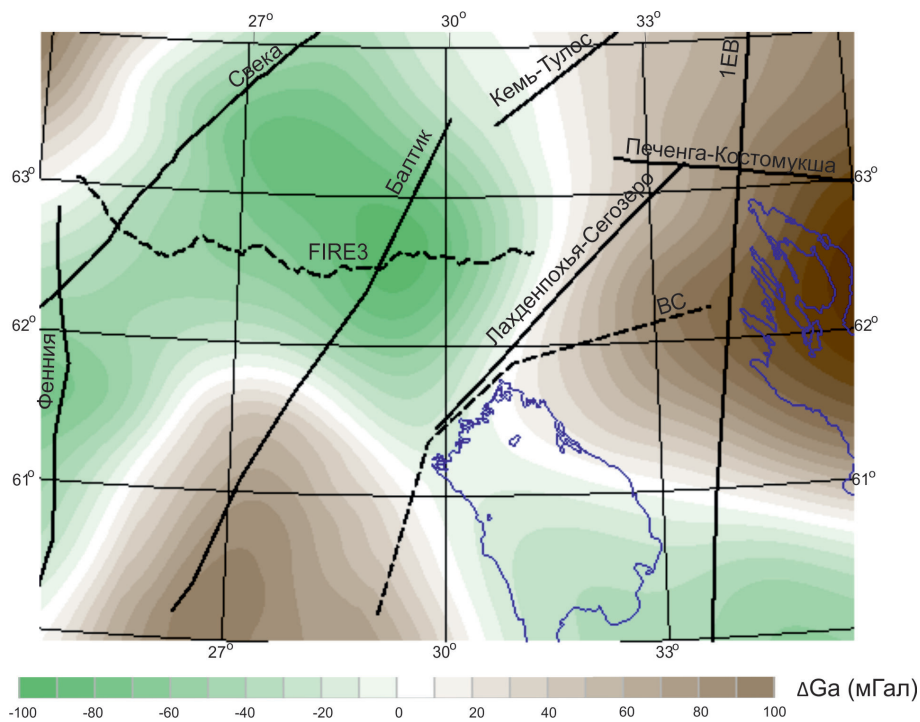


Рис. 4. Расчетное гравитационное поле от 3D-модели распределения плотности, учитывающей рельеф глубинных границ

Fig. 4. The calculated gravity field for the 3D model of density distribution, taking into account the relief of deep boundaries

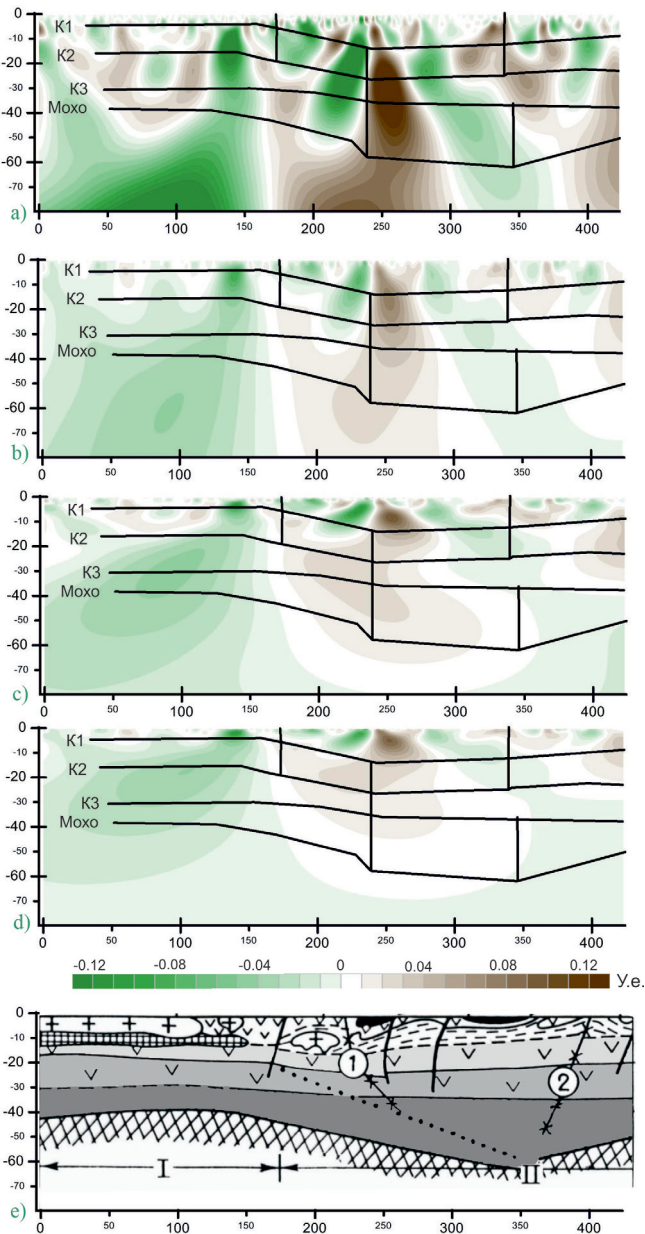


Рис. 5. Сечения по профилю ГСЗ «Балтик» 3D-распределений эффективной плотности при задании различных сочетаний величины параметров «множитель по глубине» и «экспонента при z»:
 а) – 1,0; б) – 1,3; в) – 3,1; д) – 3,3;
 е) – геологическая интерпретация сейсмических данных

Fig. 5. Cross sections of 3D distributions of effective density on the DSS «Baltic» profile when specifying different combinations of the parameters «depth factor» and «exponent at z»:
 a) – 1,0; b) – 1,3; c) – 3,1; d) – 3,3;
 e) – geological interpretation of seismic data

с распределением плотностных неоднородностей. При этом наиболее контрастные неоднородности расположены в верхней коре до поверхности K1 с учетом резкого погружения этой границы на север. В нижней же части земной коры и верхней мантии в этом варианте картируются крупные блоки различающиеся своей плотностью, что согласуется с сейсмическими и общегеологическими данными о распределении скоростей и составе пород в нижних частях земной коры.

Суммирование 3D-модели с градиентным распределением плотности в слоях на глубину и 3D-распределения эффективной плотности позволило получить в результате 3D-модель распределения плотности в земной коре. Решение прямой задачи гравirazведки от нее показало адекватность полученной модели наблюдаемому полю.

Результат решения прямой задачи от 3D плотностной модели, учитывающей рельеф глубинных границ (рис. 4), показал обратную корреляцию полученного гравитационного эффекта с наблюдаемым гравитационным полем. Повышенный уровень наблюдаемого гравитационного поля в центральной части площади соответствует отрицательной аномалии расчетного поля и приурочен к области наибольшей мощности земной коры, а пониженный уровень наблюдаемого гравитационного поля совмещается с положительными аномалиями расчетного поля, приуроченными к областям с поднятием поверхности Мохо. Исходя из такого соотношения расчетного и наблюдаемого полей, можно сделать вывод о возможном повышении плотности земной коры в областях с увеличенной ее мощностью и разуплотнении в областях ее уменьшения.

В результате трехмерного плотностного моделирования были получены схемы распределения плотности на глубине 5 км и на границах K1, K2, K3, Мохо (рис. 6-10), а также разрезы с распределением плотности вдоль сейсмических профилей (рис. 11-14).

Анализ распределения плотности в построенной 3D-модели на глубине 5 км (рис. 6) показывает, что каждая из тектонических структур, границы которых вынесены на схему, имеет особенности в величине плотности, размере и направлении простирания аномалообразующих тел. При этом, с одной стороны, целый ряд тел, выделяемых на петроплотностной карте [3], прослеживаются до рассматриваемой глубины. С другой стороны, если на поверхности закартированы отдельные тела, то на глубине 5 км в целом ряде случаев они сливаются или переходят во фрагменты протяженных зон. Плотность пород на глубине 5 км варьирует в широком диапазоне – от 2,6 до 2,9 г/см³.

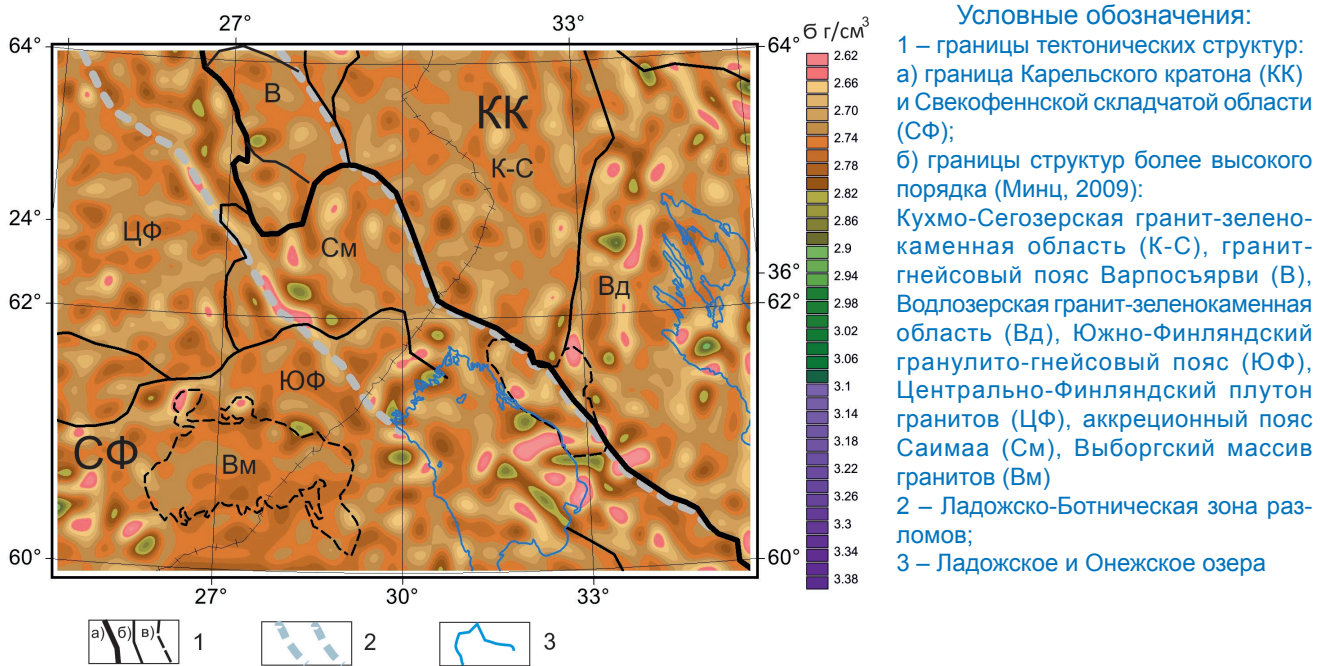


Рис. 6. Горизонтальное сечение 3D-распределения плотности на уровне 5 км

Fig. 6. The horizontal section of the 3D density distribution at 5 km

Legend: 1 – boundaries of tectonic structures: a) the boundary of the Karelian craton (KK) and Svecofennian folded area (СФ), b) the boundaries of structures of a higher order (Mintz, 2009): Kuhmo-Segozero granite-Greenstone domain (К-С), granite-gneiss belt, Varpaisjarvi (В), Vodlozersky granite-Greenstone domain (Вд), South Finland granulite-gneiss belt (ЮФ), the Central Finland granite Pluton (ЦФ), accretional belt Saimaa (СМ); Vyborg granite massif (ВМ) 2 – the Ladoga-Bothnia zone of faults, 3 – lakes Ladoga and Onega

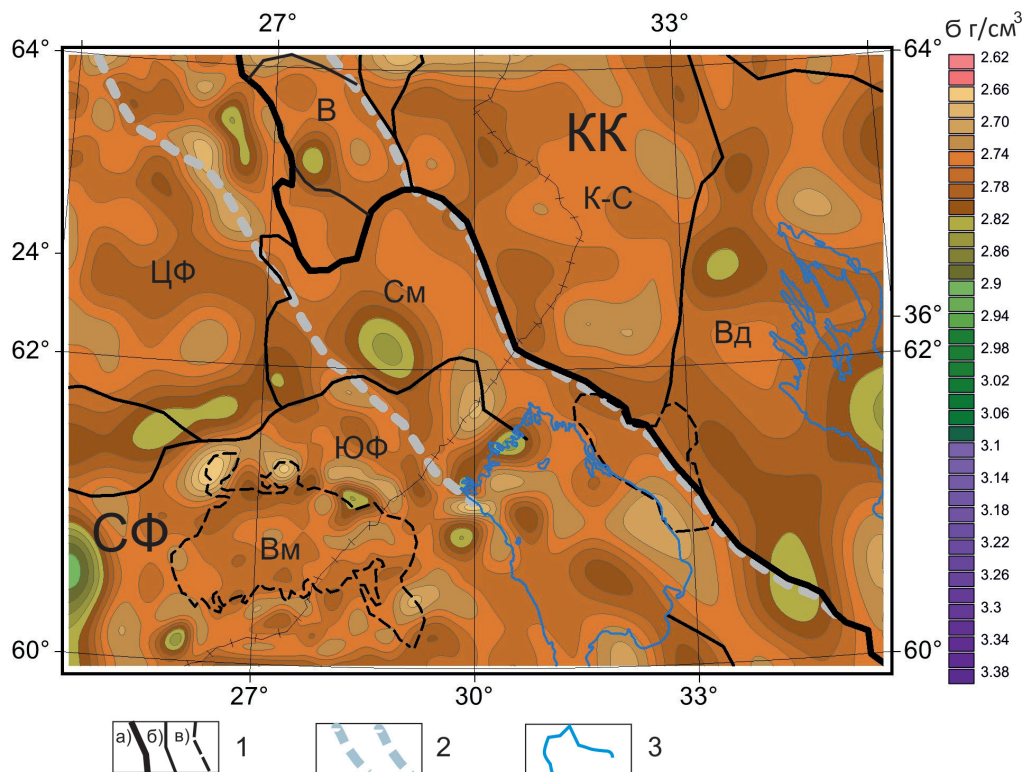


Рис. 7. Схема распределения плотности на поверхности K1. Условные обозначения см. на рис. 6

Fig. 7. Scheme of density distribution on the surface K1. Legend in Fig. 6

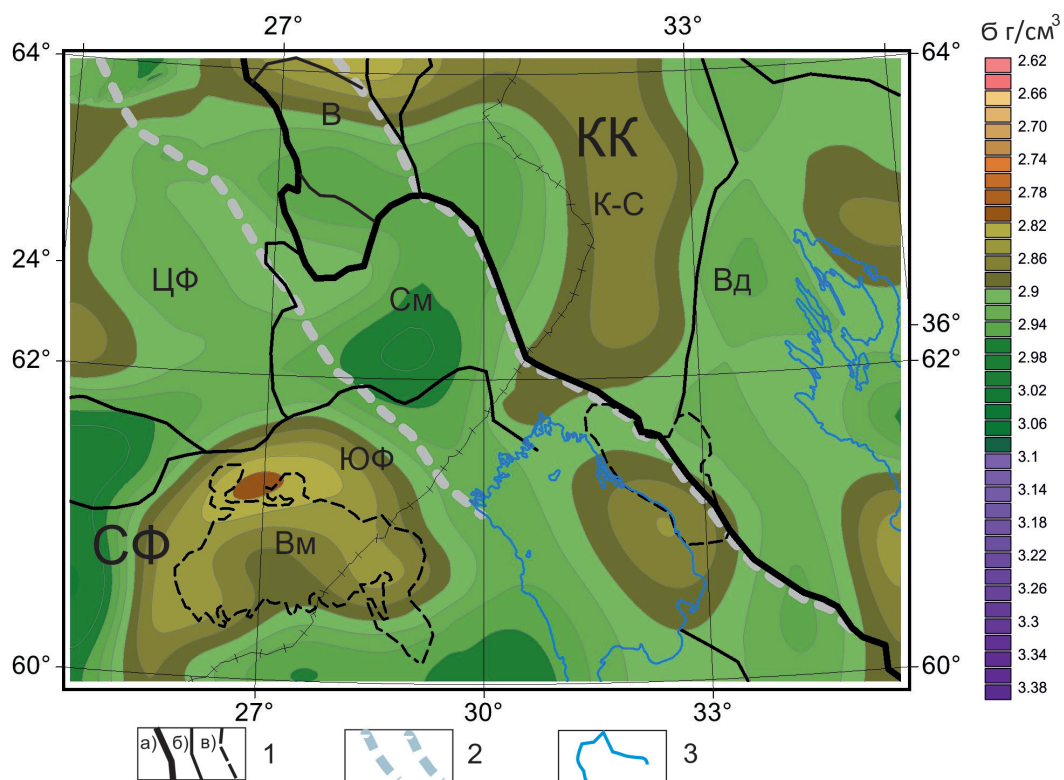


Рис. 8. Схема распределения плотности на поверхности К2. Условные обозначения см. на рис. 6

Fig. 8. Scheme of density distribution on the surface of K2. Legend in Fig. 6

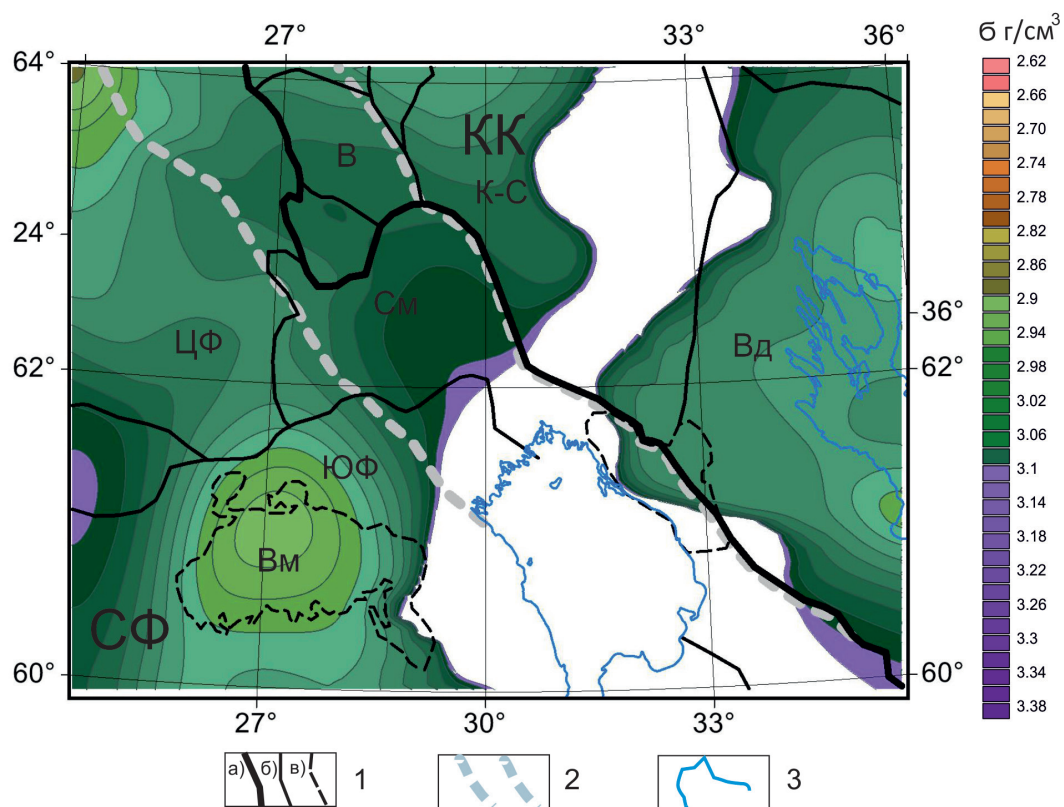


Рис. 9. Схема распределения плотности на поверхности К3. Условные обозначения см. на рис. 6

Fig. 9. Scheme of density distribution on the surface of K3. Legend in Fig. 6

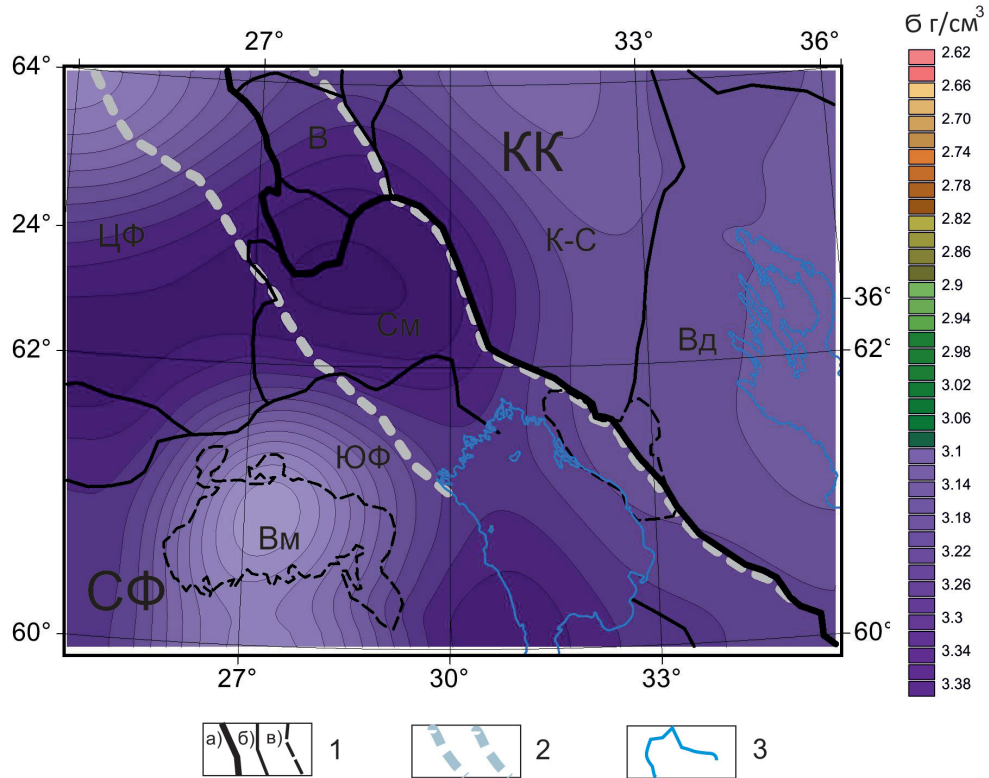


Рис. 10. Схема распределения плотности на поверхности Мохо. Условные обозначения см. на рис. 6

Fig. 10. Scheme of density distribution on the surface of Moho. Legend in Fig. 6

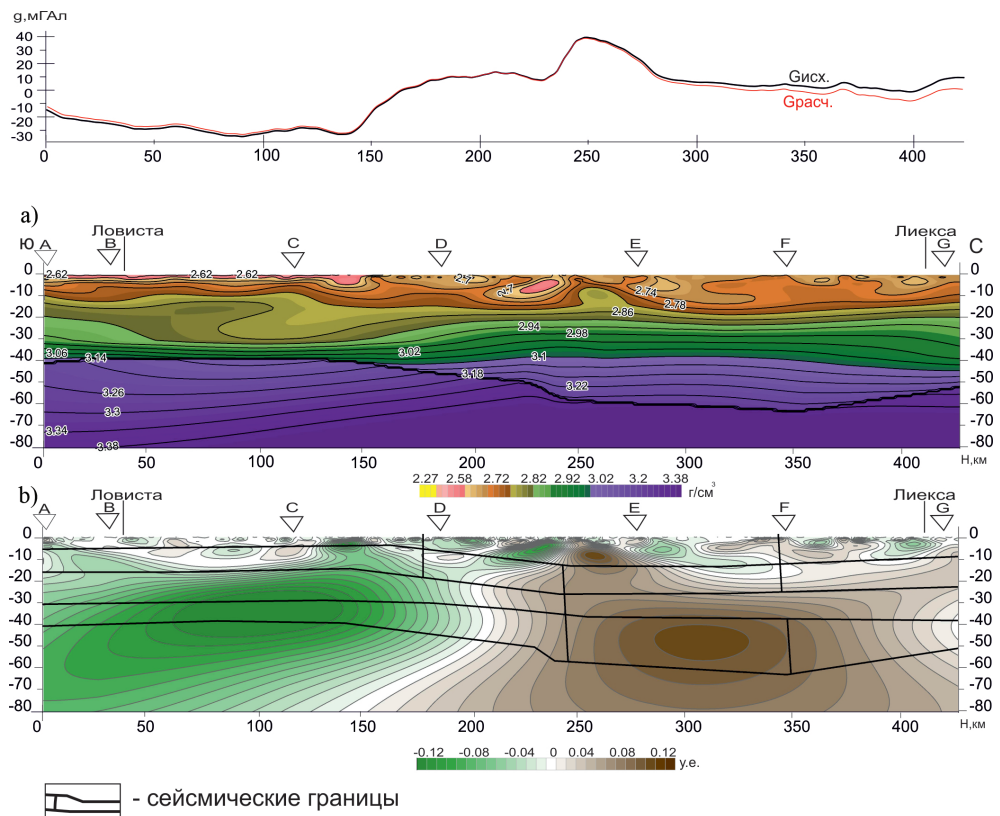


Рис. 11. Модель распределения плотности (а), эффективной плотности (б) в разрезе земной коры по сейсмическому профилю Балтик

Fig. 11. Model of density distribution (a), effective density (b) in the cross-section of the earth's crust on the seismic profile «Baltic»

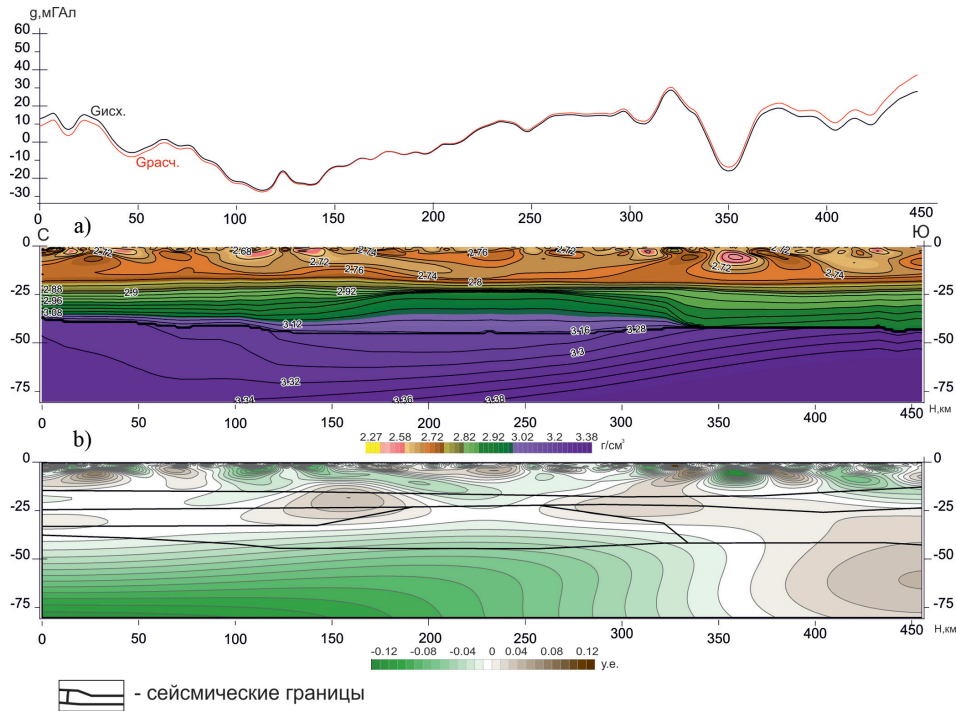


Рис. 12. Модель распределения плотности (а), эффективной плотности (б) в разрезе земной коры по сейсмическому профилю 1-ЕВ

Fig. 12. Model of density distribution (a), effective density (b) in the cross-section of the earth's crust on the seismic profile 1-EB

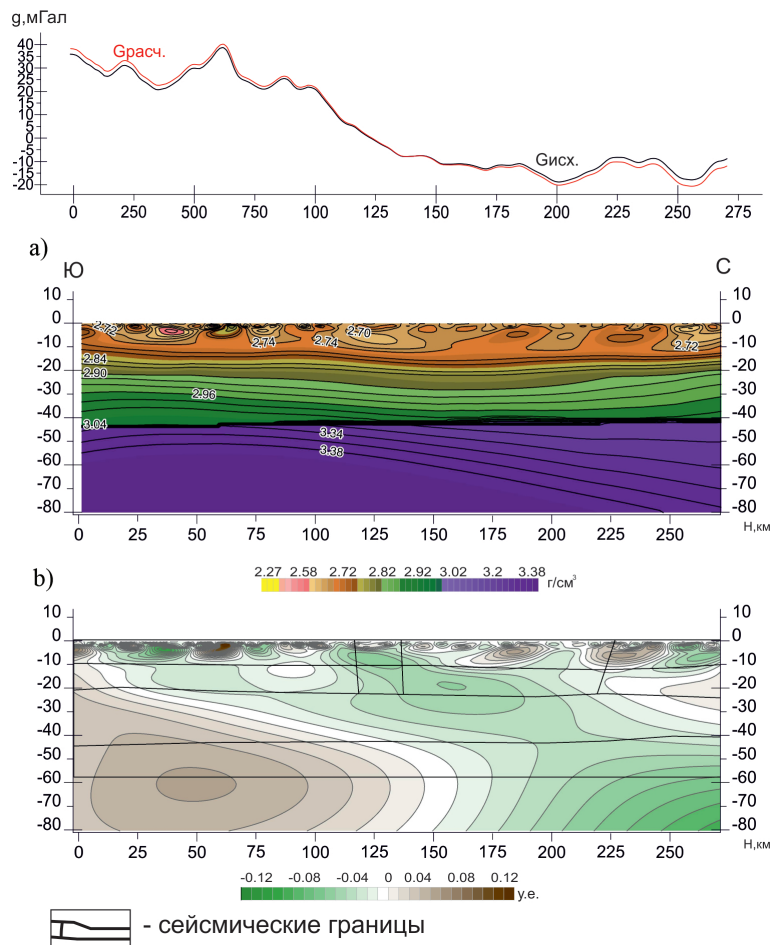


Рис. 13. Модель распределения плотности (а), эффективной плотности (б) в разрезе земной коры по сейсмическому профилю Лахденпохья-Сегозеро

Fig. 13. Model of density distribution (a), effective density (b) in the cross-section of the earth's crust according to seismic profile Lahdenpohja-Segozero

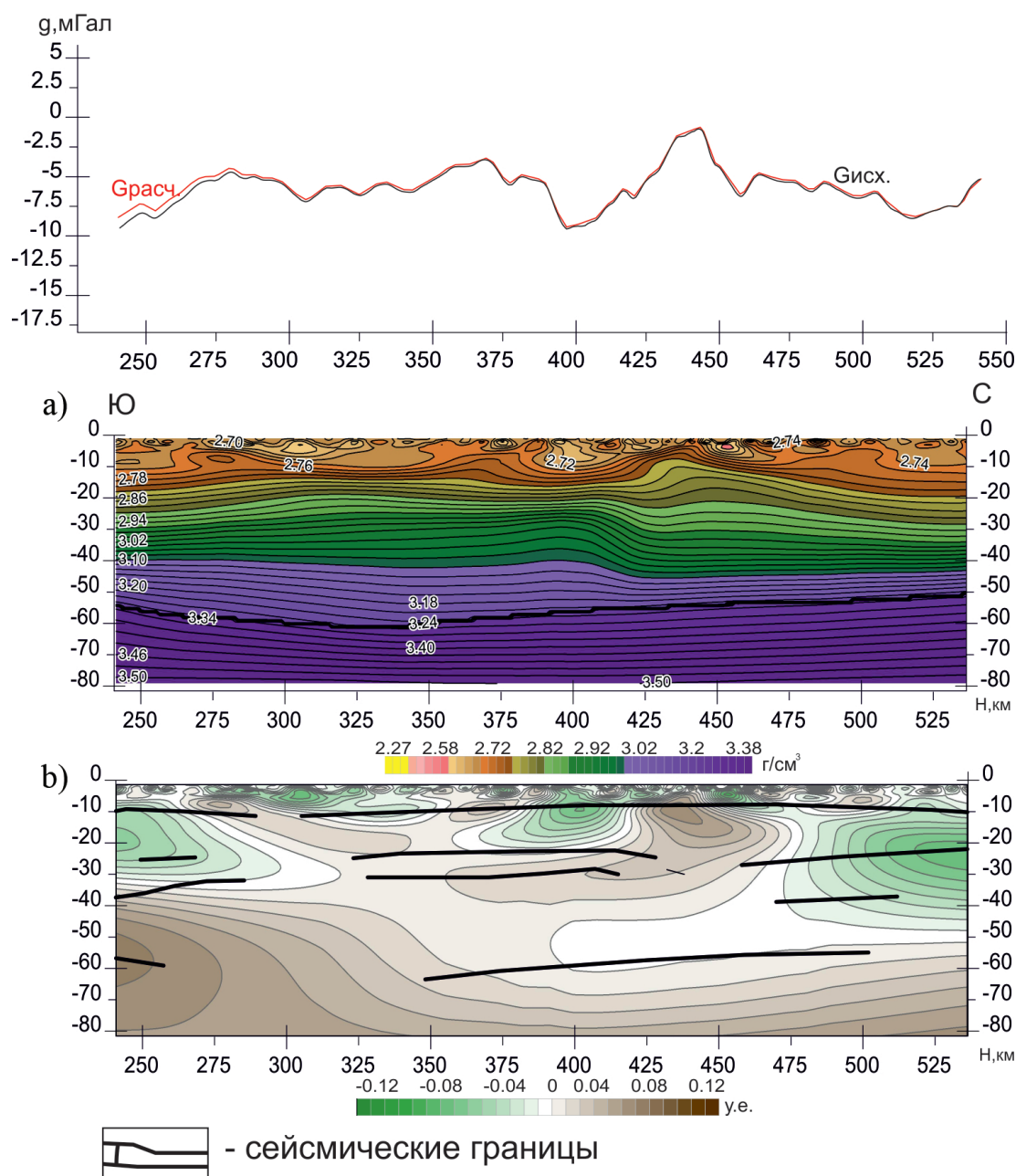


Рис. 14. Модель распределения плотности (а), эффективной плотности (б) в разрезе земной коры по сейсмическому профилю Свека

Fig. 14. Model of density distribution (a), effective density (b) in the cross-section of the earth's crust on the seismic profile SWEKA

В упомянутые выше зоны объединяются как тела повышенной плотности, так и пониженной. В целом ряде случаев такие зоны приурочены к границам тектонических структур. Так, юго-западная граница Ладожско-Бонической зоны отмечается линейной зоной разуплотненных тел на всю длину простира- ния. На границе между Кухмо-Сегозерской гранит-зеленокаменной областью и Водлозерской гранит-зеленокаменной областью картируется линейная

субмеридиональная зона с телами, имеющими плот- ность до 2,84 г/см³.

На этой глубине в Кухмо-Сегозерской гранит-зеленокаменной области Карельского кратона выделяются два блока, отличающиеся контрастно- стью и направлением простираения плотностных неоднородностей. Западный блок характеризуется более однородным распределением плотности, а восточный по своему строению очень похож на

граничащую с ним западную часть Водлозерской гранит-зеленокаменной области, отличаясь от нее несколько меньшей контрастностью плотностных объектов.

Под Выборгским гранитным массивом на глубине 5 км картируются более плотные, чем граниты, породы среднего состава (2,74-2,78 г/см³). Это может указывать на мощность выходящих на поверхность гранитов менее 5 км.

Отличительной особенностью распределения плотности на кровле средней коры (поверхность К1) является приуроченность к границам тектонических структур линейных зон повышенной плотности (рис. 7). Одна такая зона наблюдается вдоль юго-западного края Карельского кратона на границе со Svecofennской складчатой областью. Линейная зона субмеридионального направления повышенной плотности (до 2,8 г/см³) картируется в западной части Водлозерской гранит-зеленокаменной области на границе с Кухмо-Сегозерской гранит-зеленокаменной областью. Еще более плотные породы (до 2,84 г/см³) выполняют линейную зону субширотного простирания на юге Центрально-Финляндского массива на границе с Южно-Финляндским гранулито-гнейсовым поясом.

В Кухмо-Сегозерской гранит-зеленокаменной области Карельского кратона два блока, выделяющиеся особенностями плотностных тел, описанные выше при анализе распределения плотности на глубине 5 км, находят свое продолжение и в средней коре, резко отличаясь здесь по величине плотности. Восточный блок характеризуется плотностью 2,72-2,76 г/см³, в то время как в западном плотность достигает 2,78-2,82 г/см³.

В пределах Ладожско-Ботнической зоны к северо-западу от ее оси выделяется практически на всем протяжении область пониженной плотности (2,72-2,74 г/см³) по сравнению с областью, расположенной к юго-западу от оси зоны, насыщенной плотными телами (до 2,80-2,84 г/см³).

Анализ распределения областей с повышенной и пониженной плотностью на кровле нижней коры (К2) и высокоскоростного горизонта (К3) показал их похожее положение (рис. 8, 9). Наибольшее разуплотнение в нижней коре картируется на юго-западе в районе Выборгского массива. Плотность пород на кровле нижней коры здесь понижается до 2,8 г/см³. Породы четвертого высокоскоростного слоя в этой части площади также имеют плотность ниже 2,9 г/см³. На этом основании на этом участке породы четвертого слоя можно отнести к аналогам пород нижней коры (третьего слоя модели), только с высокой плотностью, и не относить эти области к областям распространения коромантийной смеси.

Тогда можно считать, что слой, трактуемый геологами как коромантийная смесь, в основном распространен в зоне контакта крупных тектонических структур Карельского кратона и Svecofennской складчатой области и имеет плотности выше 3,0 г/см³ в четвертом слое.

Ладожско-Ботническая зона на уровне нижней коры неоднородна по своему простиранию. Здесь в южной ее части картируется область разуплотнения с плотностью до 2,84 г/см³, в центральной части, пространственно приуроченной к аккреционному поясу Саимаа, плотность нижней коры выше 2,96 г/см³, а в северной – в среднем 2,92 г/см³.

Центрально-Финляндский массив достаточно однородный и имеет плотность 2,92 г/см³.

В Карельском кратоне в Кухмо-Сегозерской гранит-зеленокаменной области, как и в средней коре, в восточной части картируется достаточно однородный блок меридионального простирания с пониженной плотностью 2,82-2,84 г/см³, а в западной – разуплотненный. В Водлозерской гранит-зеленокаменной области на границе с Кухмо-Сегозерской гранит-зеленокаменной областью в нижней коре продолжается субмеридиональная зона повышенной плотности, закартированная в средней коре. Эту область возможно проследить южнее границы Карельского кратона, но уже со смещением на восток.

Анализ распределения плотности на поверхности Мохо (рис. 10) показал неоднородность верхней мантии: в ней картируются области повышенной и пониженной плотности. Наиболее однородна верхняя мантия в пределах Карельского кратона. Плотность ее здесь в основном 3,28-3,32 г/см³. Повышенной плотностью на всем своем протяжении характеризуется Ладожско-Ботническая зона, в которой наблюдается наибольшее погружение поверхности Мохо. Там, где земная кора менее мощная, в районе Выборгского гранитного массива на юго-западе площади, наблюдается разуплотнение. Здесь плотность пород верхней мантии понижается до 3,2 г/см³, что в целом согласуется с сейсмическими данными по профилю ГСЗ «Балтик», где в южной части под поверхностью Мохо фиксируются более низкие скорости, чем в его северной части, пересекающей Ладожско-Ботническую зону.

Результаты моделирования представлены также плотностными моделями вдоль сейсмических профилей Балтик, Лахденпохья-Сегозеро, 1-ЕВ, SWEKA, которые пересекают характерные структуры участка (рис.11-14). На этих разрезах приведено распределение плотности и эффективной плотности во всем разрезе земной коры. На разрезе эффективной плотности вынесены границы слоев

и тектонические нарушения, картируемые на сейсмических профилях.

Анализ построенной 3D-модели распределения плотности в земной коре, позволяет сделать ряд выводов о глубинном строении исследуемого района:

- Наиболее неоднородной является верхняя часть разреза до поверхности К1, причем отдельные тела повышенной или пониженной плотности, картируемые на поверхности, являются продолжением более крупных аномалообразующих тел, расположенных на глубинах до 5-10 км (профиль Лахденпохья-Сегозеро).
- К границам крупных тектонических структур в верхней и средней части земной коры приурочены протяженные линейные зоны с повышенной плотностью, которые на поверхности проявлены в ряде случаев как зеленокаменные пояса.
- Рассчитанная плотностная модель показала наличие плотностных неоднородностей как в земной коре, так и в верхней мантии.
- В областях с выступами поверхности Мохо наблюдается пониженная плотность нижней коры и верхней мантии. Под наиболее погруженными участками поверхности Мохо плотность пород нижней коры увеличена. В районе этих участков в низах нижней коры выделяется высокоскоростной слой, который имеет также и повышенную плотность (до 3,0-3,20 г/см³), и, вероятно, является коромантийной смесью (профиль Балтик, Свека, 1-ЕВ).

Ключевые слова: 3D плотностная модель, профиль ГСЗ «Балтик», глубинное строение, Фенноскандинавский щит, Карельский блок, Свекофеннская складчатая область.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минералогия) / отв. ред. В.Я. Горьковец, Н.В. Шаров. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2015. – 322 с.
2. Мицын С.В., Ососков Г.А. Экстраполяция сеточных моделей геофизических полей методом конечных разностей // Геоинформатика. – 2016. – № 3. – С. 29-34.
3. Петроплотностная карта геологических формаций восточной части Балтийского щита. 1:1 000 000 / ред. Н.Б. Дортман, М.Ш. Магид. – М. : Аэрогеология, 1978. – 7 л.
4. Шаров Н.В. Глубинные сейсмические исследования в юго-восточной части Фенноскандинавского щита // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 5. – С. 104-120.
5. Luosto U. Structure of Earth`s Crust in Fennoscandia as Revealed from Refraction and Wide-Angle Reflection Studies // Geophysica. – 1997. – 33 (1). – С. 3-16.
6. The Moho depth map of the European Plate / M. Grad, T. Tiira and ESC Working Group // Geophys. J. Int. – 2009. – V. 176, Issue 1. – С. 279-292.

REFERENCES

1. The Kostomuksha ore region (Geology, deep structure and Minerageny) / Ed. V.Ja. Gorkovets, N.V. Sharov. Petrozavodsk : KarRC RAS, 2015. 322 p.
2. Mitsyn S.V., Ososkov G.A. Extrapolation of grid models of geophysical fields by finite difference method // Geoinformatics. 2016. No. 3. P. 29-34.
3. Petrodensity map of geological formations of the Eastern part of the Baltic shield. 1:1 000 000 / Ed. N.B. Dortmund, M.Sh. Magid. Moscow : Aerogeology, 1978. 7 p.
4. Sharov N.V. Deep seismic surveys in the South-Eastern part of the Fennoscandian shield // The geophysical log. 2015. V. 37, No. 5. P. 104-120.
5. Luosto U. Structure of Earth`s Crust in Fennoscandia as Revealed from Refraction and Wide-Angle Reflection Studies. Geophysica. 1997, 33 (1), P. 3-16.
6. The Moho depth map of the European Plate / Marek Grad, Timo Tiira and ESC Working Group // Geophys. J. Int. 2009. No. 176, Issue 1. P. 279-292.