

## Трехмерная геолого-геофизическая модель литосферы центральной части Карельского кратона

© И. К. Пашкевич<sup>1</sup>, Н. В. Шаров<sup>2</sup>, А. С. Савченко<sup>1</sup>, В. И. Старостенко<sup>1</sup>, 2014

<sup>1</sup>Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

Поступила 27 мая 2014 г.

*Представлено членом редколлегии М. И. Орлюком*

На основі аналізу і узагальнення всієї сукупності наявної геолого-геофізичної інформації, накопиченої за минулі 40 років, отримано комплекс геофізичних моделей земної кори, що дає сучасне уявлення про глибинну будову центральної частини Карельського кратону. Побудовані сейсмічні, 3D густинна та магнітна моделі уточнюють уявлення про шаруватість земної кори, поведінку геофізичних меж, у тому числі межі кора—мантія. Комплексна інтерпретація потенційних полів, що ґрунтується на сейсмічній моделі земної кори регіону з урахуванням петрофізичних і геологічних даних, дала змогу оцінити особливості шарувато-блокової будови регіону і структурних співвідношень густинної та магнітної неоднорідностей кори. Підкреслено особливу роль субмеридіонального шва (фрагмента Ладозько-Печенгзької зони багатозональної активізації) у тектонічному районуванні і зв'язку з ним глибинних магнітних джерел.

**Ключеві слова:** сейсмічні швидкості, густинна модель, магнітна модель, земна кора, межа поділу М, Карельський кратон.

**Введение.** Изучение глубинного строения и эволюции раннедокембрийской земной коры относится к числу приоритетных проблем современных геологических исследований. На протяжении ряда лет геолого-геофизические исследования Фенноскандинавского щита осуществляются в рамках многостороннего международного сотрудничества, охватывающего широкий комплекс работ с использованием методов сейсмологии, геоэлектрики, гравиметрических, магнитометрических и геотермических наблюдений. Комплексный анализ геологической и глубинной геофизической информации позволил обратиться к совершенствованию существующих и формированию новых моделей глубинного строения и эволюции раннедокембрийской коры щита, а также их связи с приповерхностными структурами Центральной части Карельского кратона.

Район исследований включает приграничную территорию восточной Финляндии и западной Карелии (рис. 1). Это область сочленения архейского Карельского кратона и протерозойского Центрально-Финляндского гнейсогранитного блока. Территория особенно благоприятна для изучения внутренней структуры консолидированной коры, так как здесь отсутствует искажающее влияние осадочного чехла, что создает хорошие возможности для

непосредственного исследования и сопоставления геологических и глубинных геофизических данных.

Геолого-геофизические работы, проведенные за последние четыре десятилетия на приграничной территории, были весьма разнообразны как по масштабам изучения строения земной коры, так и по методам. Однако некоторые результаты этих исследований до сих пор неоднозначны и весьма противоречивы. Разрабатываемое крупнейшее Костомукшское месторождение качественных железистых кварцитов, медно-никелевые месторождения, связанные с синорогенными мафит-ультрамафитовыми интрузиями свекокарельского возраста, обнаруженные месторождения золота и кимберлитовые тела делают очевидной необходимость более детального комплексного доизучения глубинного строения этого региона.

**Задача исследований** — выявить детали глубинного строения земной коры, уточнить состав и структуру центральной части Карельского кратона на основе результатов известной геолого-геофизической информации, дополненной новейшими данными.

Основное внимание в работе уделено построению трехмерных комплексных геофизических моделей изучаемой среды в районе

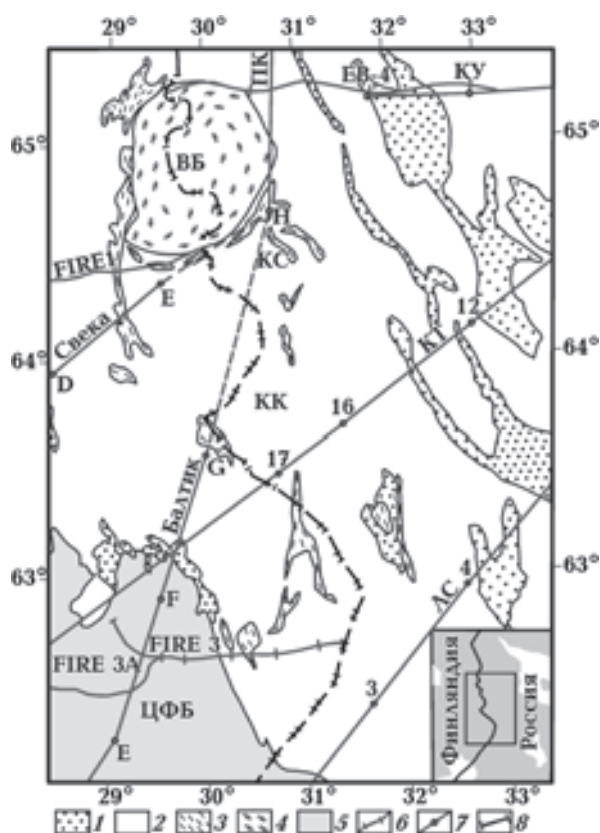


Рис. 1. Схема геологического строения и сейсмической изученности центральной части Карельского кратона: 1 — протерозойские кристаллические вулканогенно-осадочные толщи, 2 — архейские гранитогнейсовые кристаллические образования, 3 — позднеархейские зеленокаменные пояса, 4 — раннеархейские гранулитовые кристаллические образования Вокнаволоцкого блока, 5 — свекофенские гранитогнейсовые образования, 6 — фрагменты сейсмических профилей ОГТ (ЕВ-4; FIRE 1 (Вартиус—Ийсалми); FIRE 3 (Менке—Оутукумпу); FIRE 3А (Виниярви—Леппявирта)), 7 — фрагменты сейсмических профилей ГСЗ с пунктами взрыва (ПК (Печенга—Костомукша); КУ (Кемь—Ухта); КТ (Кемь—Тулос); Свека; Балтик; ЛС (Лахденпохья—Сегозеро)), 8 — государственная граница. КК — Карельский кратон, ВВ — Вокнаволоцкий блок, ЦФБ — Центрально-Финляндский протерозойский гнейсо-гранитный блок, КС — Костомукшская зеленокаменная структура. На врезке показан район исследований.

(62,0—65,5° с.ш., 28,3—34,0° в.д.), где ранее выполнялось двумерное моделирование в центральной части Фенноскандии [Литосфера..., 1987; Чекунов и др., 1993; Шаров, 1993, 2013; Mitrofanov et al., 1998; Глазнев, 2003; Yliniemi et al., 2004; Kukkonen, Lahtinen, 2006; Silvennoinen, Kozlovskaya, 2007; Korja, Heikkinen, 2008; Шаров, Митрофанов, 2014].

В статье изложены методические особенности и итоговые результаты применения разработанных методов комплексной интерпретации сейсмических, петрофизических, гравиметрических и магнитометрических данных при построении модели земной коры центральной части Балтийского щита. Дается геологическая трактовка построенной комплексной геофизической модели строения коры изучаемого района.

Блоковая сейсмическая модель земной коры региона, построенная на основе семи сейсмических разрезов для исследуемого региона (см. рис. 1), представлена в аксонометрической проекции в работе [Шаров..., 2013, рис. 10], где обсуждается важная проблема связей между скоростной характеристикой земной коры, ее мощностью и особенностями геологического строения главных структурных элементов архейского Карельского кратона и более молодой Свекофеннской провинции.

На всех профилях Карельского кратона глубина до границы М варьирует в пределах 40—45 км. Внутри коры обнаружены области скопления субгоризонтальных отражающих элементов в малом интервале глубин, которые можно рассматривать как некие разделяющие зоны между скоростными этапами. Обобщенная модель региона представлена тремя скоростными этапами и высокоскоростной частью разреза ( $V_p=7,20\div 7,40$  км/с) в основании коры, так называемой коромантийной смесью, представленной повсеместно.

Совсем иной характер глубинного строения земной коры обнаруживается при переходе к Свекофеннской провинции. Наиболее полная информация получена в области Ладожско-Ботнической зоны, которая пересечена тремя профилями: Свека, Балтик, Приладожский. Скоростные разрезы дают представление о подобию структуры верхней и средней частей коры на всех профилях. Значения скорости распространения продольных волн несколько превышают таковые для Карельского кратона. Наиболее глубокая область прогиба подошвы коры (55—60 км) располагается в районе профилей Свека и Балтик.

Имеющихся данных вдоль упомянутых выше профилей ГСЗ недостаточно для представления о строении верхов мантии. В целом можно отметить обратную зависимость между сложностью сейсмической расчлененности земной коры и возрастом ее структурной организации.

**Трехмерная плотностная модель земной коры. Исходные материалы.** При создании трехмерной плотностной модели земной коры Центральной части Карельского кратона были использованы:

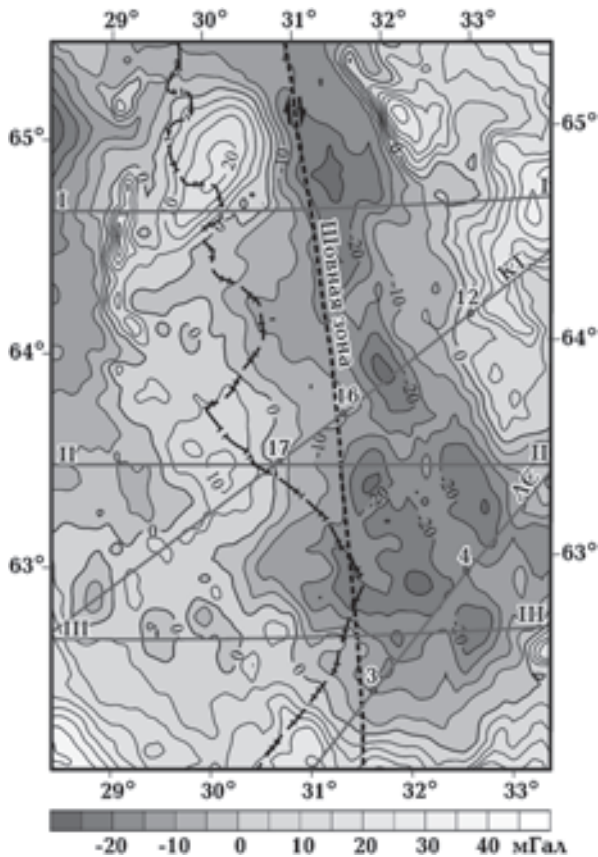


Рис. 2. Гравитационное поле (аномалии Буге) центральной части Карельского крагона и положение профилей ГСЗ (КТ — Кемь—Тулос, АС — Лахденпохья—Сегозеро) с пунктами взрыва и интерпретационных профилей I—I, II—II, III—III. Условные обозначения см. на рис. 1.



Рис. 3. Схема глубины залегания раздела М, км: 1 — проекции на поверхность М среднеинжекоровых источников магнитных аномалий, цифры — значения намагниченности, А/м. Цифры в кружках — глубинные источники магнитных аномалий (I — Толвоярвинская, II — Восточно-Финская, III — Ребольская, IV — Костомукшская, V — Вокнаволоцкая). Другие условные обозначения см. на рис. 2.

- данные сейсмометрии (см. рис. 1) по профилям ОГТ: ЕВ-4; FIRE 1 (Вартиус — Ийсалми), FIRE 3 (Менке — Оутокумпу), FIRE 3А (Виниярви — Лешпявирта) и профилям ГСЗ: ПК (Печенга — Костомукша), КУ (Кемь — Ухта), КТ (Кемь — Тулос), Свека, Балтик, АС (Лахденпохья — Сегозеро);
- карта гравитационного поля в цифровом виде по сети 2,5×2,5 км (аномалии Буге,  $\rho=2,67 \text{ г/см}^3$ ) [Korhonen et al., 2002a] (рис. 2);
- схема глубины залегания раздела М [Шаров, 2013], представленная на рис. 3;
- геологическая карта восточной части Фенноскандинавского щита [Koistinen et al., 2001];
- петроплотностная карта восточной части Фенноскандинавского щита [Петроплотностная..., 1977].

**Методика построения трехмерной плотностной модели** включает в себя: программ-

ный комплекс для моделирования, а также структуру и параметризацию модели, которые описаны в публикациях [Старостенко и др., 1975; Красовский, 1981; Красовский и др., 1998; Куприенко и др., 2007]. Расчеты проведены относительно значения плотности верхней мантии  $3,40 \text{ г/см}^3$  с учетом «нормы» расчетного поля ( $-980 \text{ мГал}$ ) по аналогии с Украинским щитом. Для генерализованного учета влияния неоднородностей окружающих структур площадь моделирования расширена на 300 км во всех направлениях.

Расчеты гравитационного эффекта консолидированной коры проводились с помощью «Автоматизированной системы GMT-Auto» [Старостенко, Легостаева, 1998; Савченко и др., 2008], которая включает в себя программы для ввода в компьютер информации, представленной на бумажных носителях, и программу для решения прямой задачи гравиразведки. Ввод информации в компьютер осуществлялся по

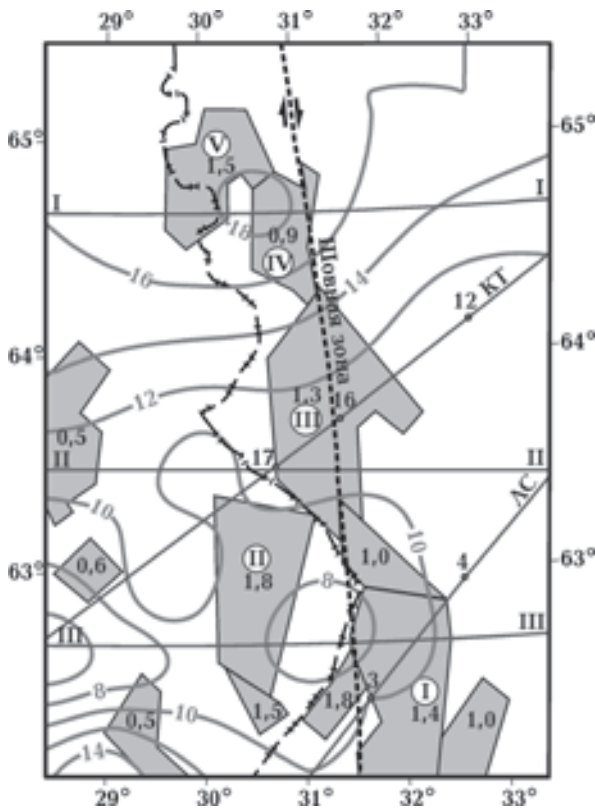


Рис. 4. Схема глубины залегания границы  $K_1$  (км) и положение верхних кромок источников региональных магнитных аномалий (РМА). Другие условные обозначения см. на рис. 2, 3.

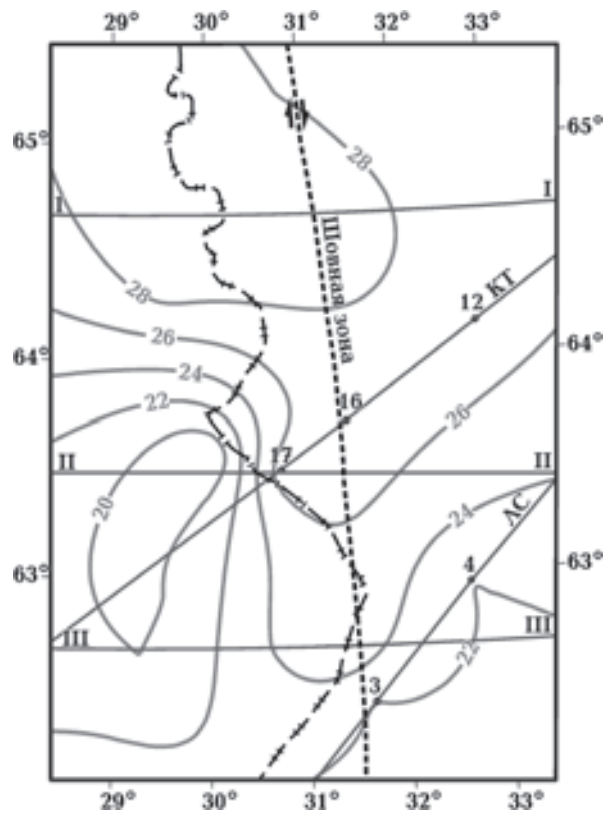


Рис. 5. Схема глубины залегания границы  $K_2$ , км. Другие условные обозначения см. на рис. 2, 3.

программам Geophys0 для карт, содержащих информацию в изолиниях [Старостенко и др., 2004], и SpasеMap для ввода карт с изображением тел (областей) с различными значениями плотностей [Старостенко и др., 2011].

Формирование цифровой модели выходной информации о среде и расчет гравитационного эффекта проводились по сети 5×5 км.

**Структура и параметризация модели.** При построении трехмерной плотностной модели консолидированной коры региона в качестве исходной информации выбрана ранее полученная четырехслойная скоростная модель земной коры [Шаров, 2013]. Данная модель имеет следующие характеристики: верхний слой (верхний этаж) ( $V_p=5,90\div 6,20$  км/с,  $\rho=2,60\div 2,75$  г/см<sup>3</sup>); средний ( $V_p=6,30\div 6,50$  км/с,  $\rho=2,75\div 2,90$  г/см<sup>3</sup>); нижний ( $V_p=6,60\div 6,80$  км/с,  $\rho=2,90\div 3,00$  г/см<sup>3</sup>); четвертый высокоскоростной слой ( $V_p=7,00\div 7,30$  км/с,  $\rho=3,00\div 3,20$  г/см<sup>3</sup>); мантия ( $V_p=8,00\div 8,20$  км/с,  $\rho=3,40$  г/см<sup>3</sup>). В процессе подбора при моделировании была введена дополнительная граница на глубине 5 км.

В результате получена пятислойная модель:  
1 слой — от 0 до 5 км;

- 2 слой — от 5 км до границы  $K_1$ ;
- 3 слой — от границы  $K_1$  до  $K_2$ ;
- 4 слой — от границы  $K_2$  до  $K_3$ ;
- 5 слой — от границы  $K_3$  до раздела М.

Схемы глубин залегания границ раздела слоев модели ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ) построены по площади с использованием всей имеющейся сейсмической информации вдоль профилей ГСЗ [Шаров, 2013] и представлены на рис. 4—6. По данным сейсмометрии вдоль профилей ГСЗ в низах земной коры выявлены области высоких скоростей. Это так называемая коромантийная смесь, ее распределение по площади представлено на рис. 7.

Для составления первого варианта расчетной модели контуры блоков и тел для верхней части коры в слое 0—5 км (рис. 8) определялись в соответствии с морфологией структур докембрийского фундамента [Koistinen et al., 2001] и с учетом наблюдаемого поля силы тяжести. При плотностной параметризации использовалась также петроплотностная характеристика пород [Петроплотностная..., 1977]. Границы блоков и значение их плотности глубже 5 км корректировались по полученному разностному полю

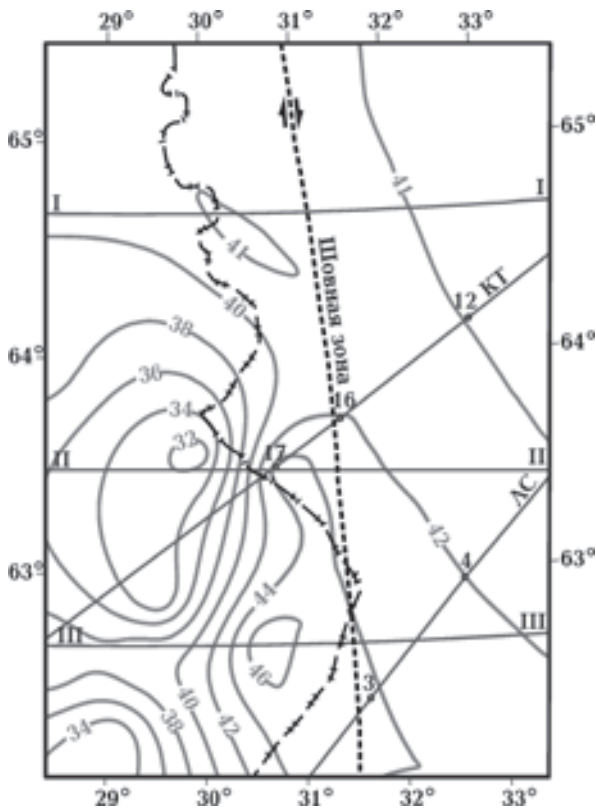


Рис. 6. Схема глубины залегания границы  $K_3$ , км. Другие условные обозначения см. на рис. 2, 3.

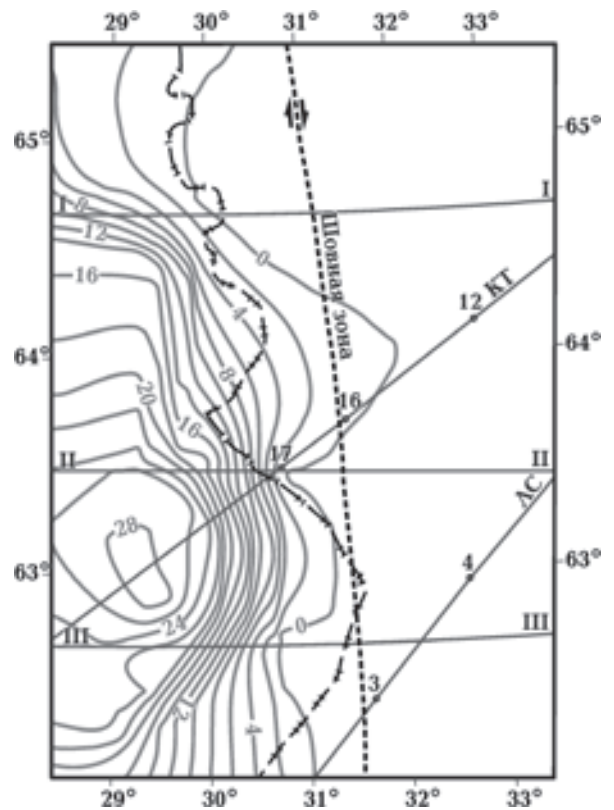


Рис. 7. Мощность коромантийной смеси и ее мощность, км. Другие условные обозначения см. на рис. 2, 3.

между наблюдаемым и рассчитанным гравитационным эффектом коры. Уточнение значений плотности внутри расчетных слоев в процессе моделирования выполнялось в соответствии с возможными изменениями их состава. В восточной части региона исследований в слое 5 км —  $K_1$ , как правило, отмечается инверсия плотности с уменьшением ее до  $2,60 \text{ г/см}^3$ . Аналогичная картина получена для зеленокаменных структур Среднеприднепровского мегаблока Украинского щита [Куприенко и др., 2007].

**В результате трехмерного плотностного моделирования** были получены следующие схемы распределения плотности: в слое 0—5 км (см. рис. 8), на глубине 5 км (рис. 9), на границе  $K_1$  (рис. 10), на уровне поверхности  $K_1$  в третьем слое ( $K_1$ — $K_2$ ) (рис. 11). Распределение плотности на границе  $K_1$  во втором и третьем слоях представлено разными схемами, что связано со скачкообразным изменением плотности в отдельных телах модели.

**Первый слой (0—5 км)** в плотностной модели представлен блоками с постоянной средней плотностью в каждом (см. рис. 8). Значение плотности по петрофизическим данным [Петроплотностная..., 1977] варьирует от 2,59 до

$2,94 \text{ г/см}^3$ . Земная кора до границы  $K_1$  разделена шовной зоной на восточную и западную части, которые различаются распределением плотности по площади и по глубине. Шовная зона проявляется в этом слое субмеридиональной переходной областью с плотностью  $2,66 \text{ г/см}^3$ , за исключением южной части, где присутствует два тела с плотностью  $2,62$  и  $2,80 \text{ г/см}^3$ . Западная часть участка состоит из крупных блоков с плотностью от  $2,67$  до  $2,80 \text{ г/см}^3$  и зеленокаменного пояса Кухмо, который характеризуется повышенными значениями ( $2,82$ — $2,94 \text{ г/см}^3$ ) по сравнению с окружающими структурами. Отметим, что тело с обобщенной плотностью  $2,80 \text{ г/см}^3$  включает в себя известный Вокнаволоцкий блок, выделяющийся в наблюдаемом гравитационном поле положительной аномалией интенсивностью от 14 до 26 мГал, которая сменяется по периферии дугообразной зоной слаболожительных аномалий, постепенно переходящих в отрицательные. Детальная плотностная модель блока была получена ранее. Восточная часть участка исследований представлена большим количеством разных по размеру тел, плотность в которых изменяется от  $2,59$  до  $2,78 \text{ г/см}^3$ .

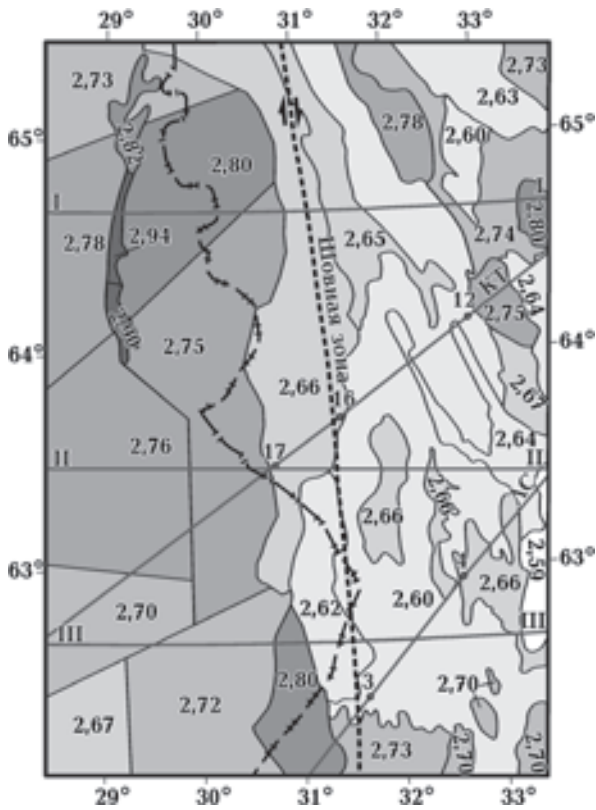


Рис. 8. Схема распределения средней плотности в слое от 0 до 5 км,  $г/см^3$ . Другие условные обозначения см. на рис. 2.

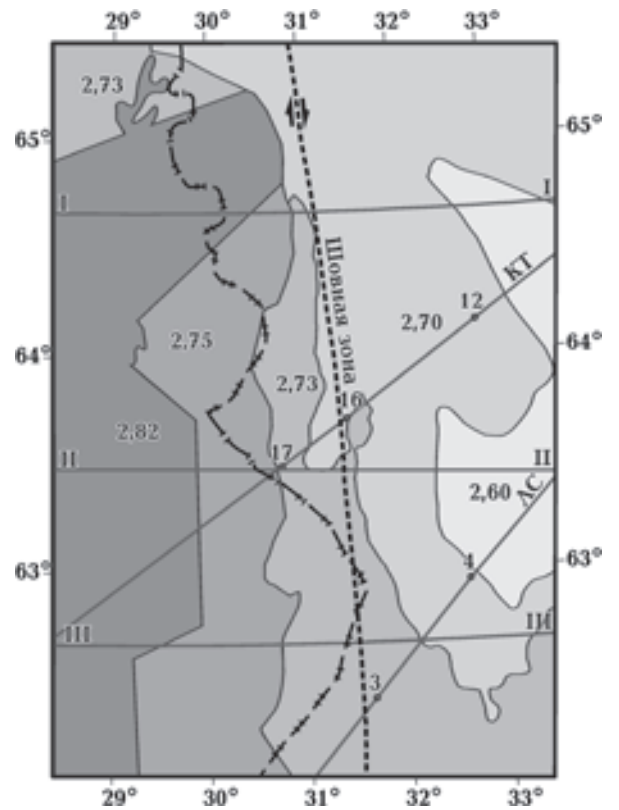


Рис. 10. Схема распределения плотности на границе  $K_1$ ,  $г/см^3$ . Другие условные обозначения см. на рис. 2.

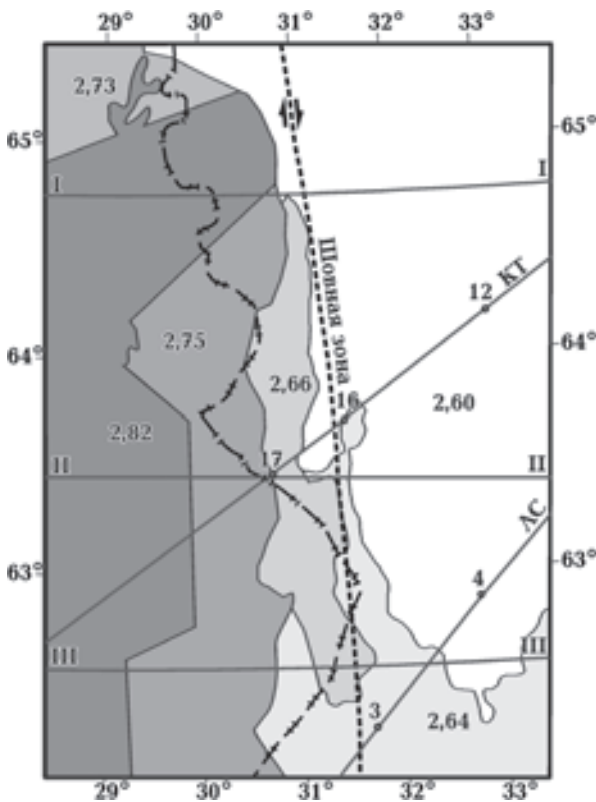


Рис. 9. Схема распределения плотности на глубине 5 км,  $г/см^3$ . Другие условные обозначения см. на рис. 2.

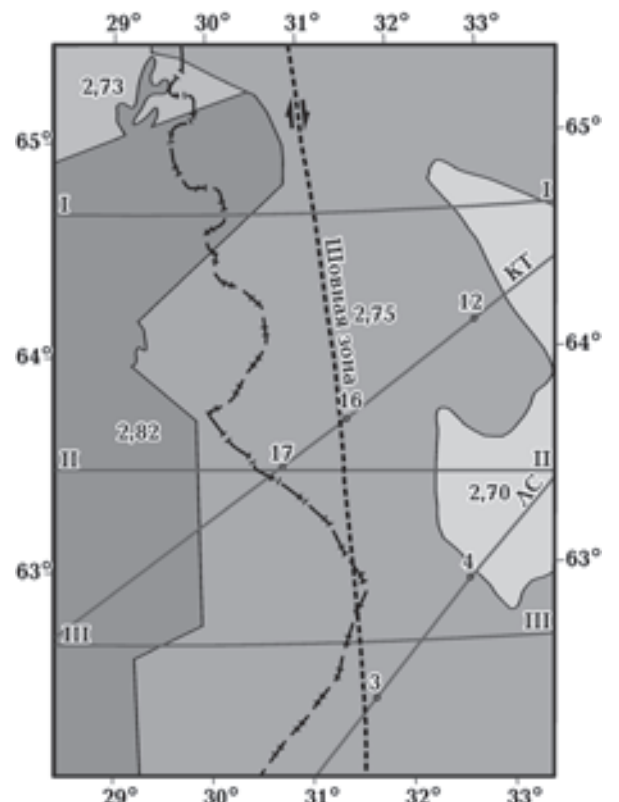


Рис. 11. Схема распределения плотности на границе  $K_1-K_2$ ,  $г/см^3$ . Другие условные обозначения см. на рис. 2.

На глубине 5 км (см. рис. 9) вся восточная часть разуплотнена до  $2,60 \text{ г/см}^3$ . В западной части тела укрупняются, сохраняя основной структурный план, а плотность в них возрастает до  $2,75\text{--}2,82 \text{ г/см}^3$ . Субмеридиональная переходная область сужается с сохранением плотности ( $\rho=2,66 \text{ г/см}^3$ ).

Распределение плотности на границе  $K_1$  и во втором слое (см. рис. 10) западной части не изменяется в структурном плане и по величине плотности. В меридиональной переходной области плотность от кровли к подошве слоя нарастает градиентно от  $2,66$  до  $2,73 \text{ г/см}^3$ . В восточной части участка плотность увеличивается до  $2,70 \text{ г/см}^3$  за исключением небольшой

территории на востоке, где она остается постоянной ( $2,60 \text{ г/см}^3$ ) во всем слое.

На уровне поверхности  $K_1$  в слое  $K_1\text{--}K_2$  (см. рис. 11) можно отметить отсутствие меридиональной переходной области. На большей части территории плотность равна  $2,75 \text{ г/см}^3$ , увеличиваясь на западе до  $2,82 \text{ г/см}^3$ . Тело в северо-западной части участка с плотностью  $2,73 \text{ г/см}^3$  прослеживается с поверхности фундамента до границы  $K_1$ .

Оценка распределения плотности в модели с глубиной далее происходит в соответствии с принятой четырехслойной моделью земной коры, распределение плотности в которой приведено выше.

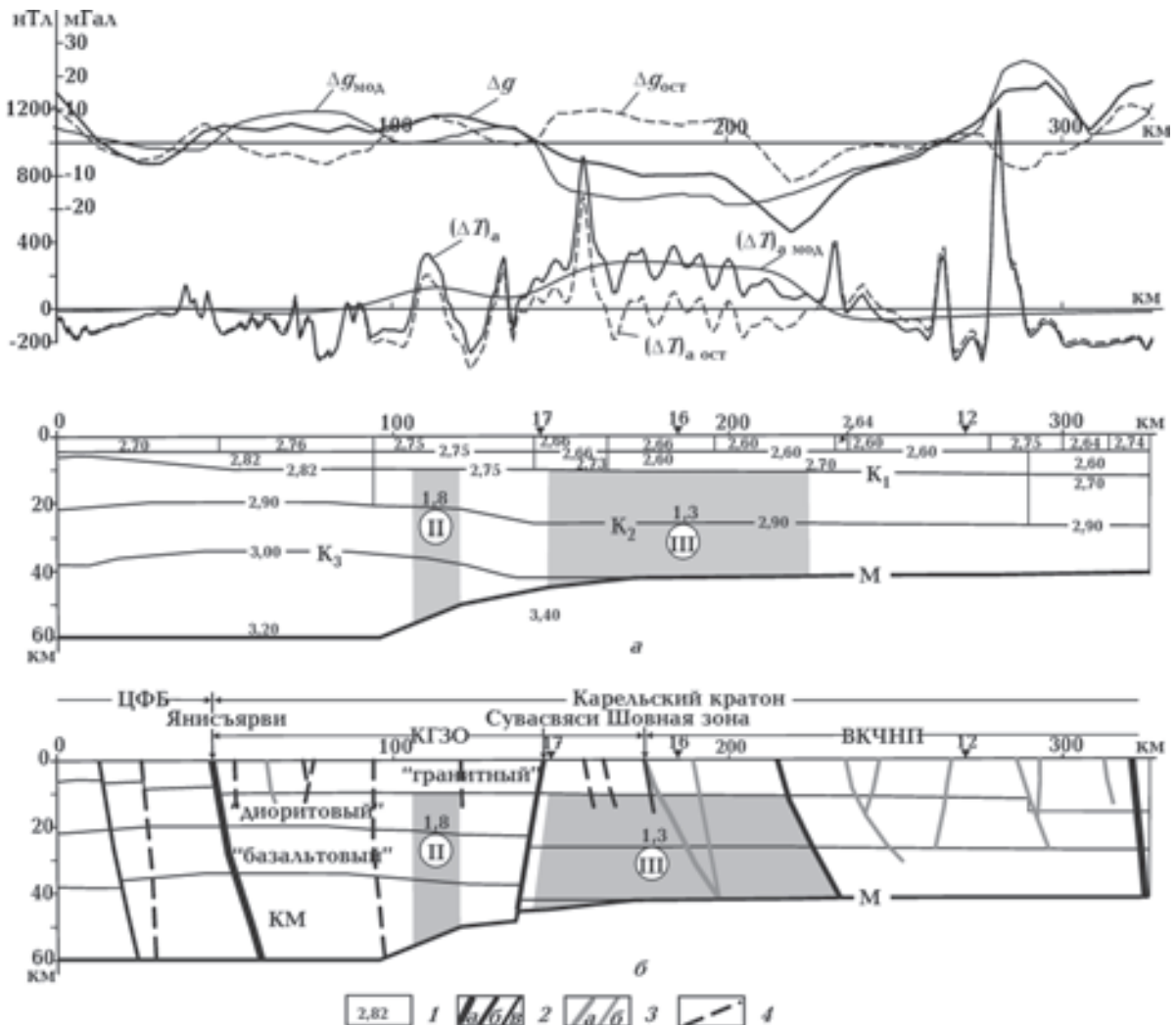


Рис. 12. Плотностная и магнитная модели (а) и их структурная интерпретация (б) по профилю ГСЗ Кемь—Тулос: 1 — значения плотности,  $\text{г/см}^3$ , 2 — система разломов (а—I, б—II, в—III рангов северо-западного простирания), 3 — система разломов меридионального шва (а—II, б—III рангов), 4 — разломы других направлений, в том числе дугообразные. КГЗО — Карельская гранит-зеленокаменная область, ВКЧНП — Восточно-Карельский чешуйчато-надвиговый пояс, KM — коромангийная смесь, M — граница раздела Мохоровичича. Положение профиля и другие условные обозначения см. на рис. 3, 4.

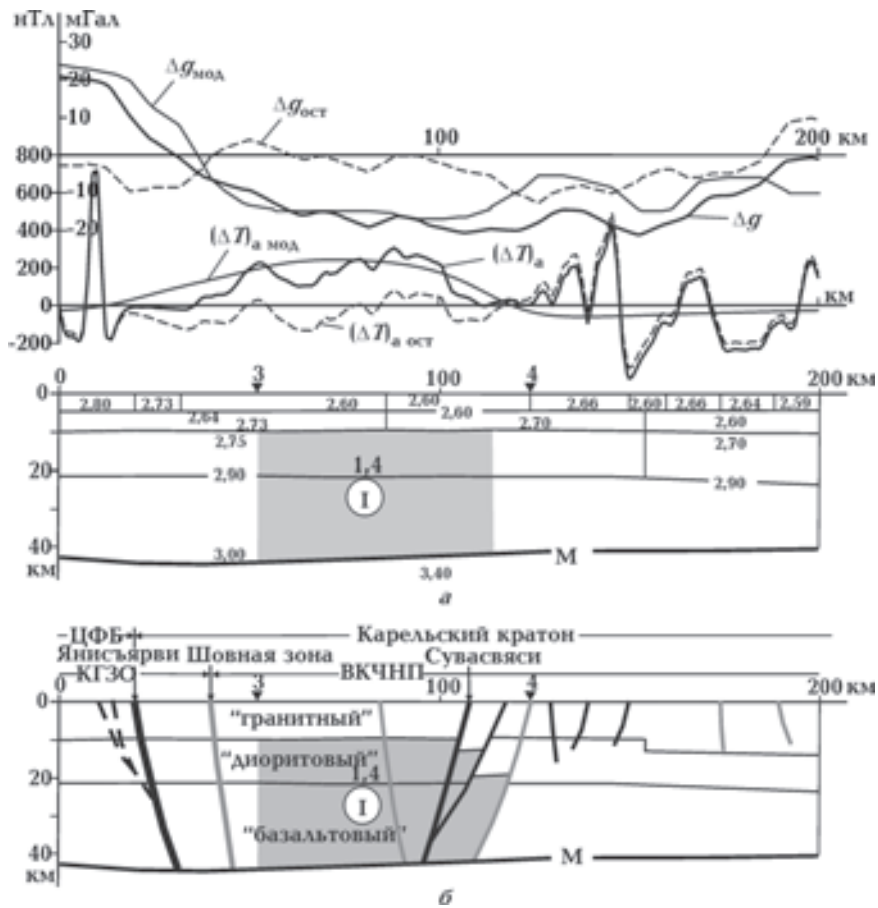


Рис. 13. Плотностная и магнитная модели (а) и их структурная интерпретация (б) по профилю ГСЗ Лахденпохья—Сегозеро. Положение профиля и другие условные обозначения см. на рис. 3, 4, 12.

Результаты моделирования представлены также плотностными моделями вдоль профилей ГСЗ Кемь — Тулос и Лахденпохья — Сегозеро (рис. 12, 13), а также вдоль интерпретационных профилей I—I, II—II, III—III (рис. 14—16), которые пересекают характерные структуры участка. На этих рисунках приведено распределение плотности во всем разрезе земной коры, согласно предложенному делению на слои, а также магнитные неоднородности и их возможная структурная интерпретация (см. рис. 12—16).

По полученному в процессе моделирования распределению плотности условно выделены «гранитный» ( $\rho < 2,75 \text{ г/см}^3$ ), «диоритовый» ( $\rho = 2,75 \div 2,90 \text{ г/см}^3$ ), «базальтовый» ( $\rho = 2,90 \div 3,00 \text{ г/см}^3$ ) слои и коромангитная смесь ( $\rho > 3,00 \text{ г/см}^3$ ). Распределение плотности в западной части участка исследований свидетельствует о практическом отсутствии «гранитного» слоя (см. рис. 14, 15). Наиболее ярко выражена упомянутая выше инверсия плотности в слое от 5 км

до границы  $K_1$ , обнаруженная на профилях ГСЗ (КТ, ЛС) и на интерпретационном профиле I—I (см. рис. 12—14). В некоторых блоках отмечается постоянная плотность в слое 0 км — граница  $K_1$ . Это видно на рисунках 8, 9, 12, 14, 15.

На рис. 17 представлено разностное (между исходным и модельным) поле Δg. Наличие аномалий интенсивностью  $-10 \text{ мГал}$  может быть объяснено недоучетом верхней части коры со сложнодифференцированным строением докембрийского фундамента, сложенного телами мощностью часто менее 2 км, заданными в слое 0—5 км обобщенными телами. Так, на северо-западе такая аномалия объясняется плагиогранитным составом Лабуковской дугобразной зоны Вокнаволоковского блока. Наличие этих аномалий также может указывать на необходимость дальнейшей корректировки более глубоких горизонтов земной коры, что, однако, приводит к увеличению мощности «гранитного» слоя (см. рис. 13—15) и противоречит исходному делению коры на слои.



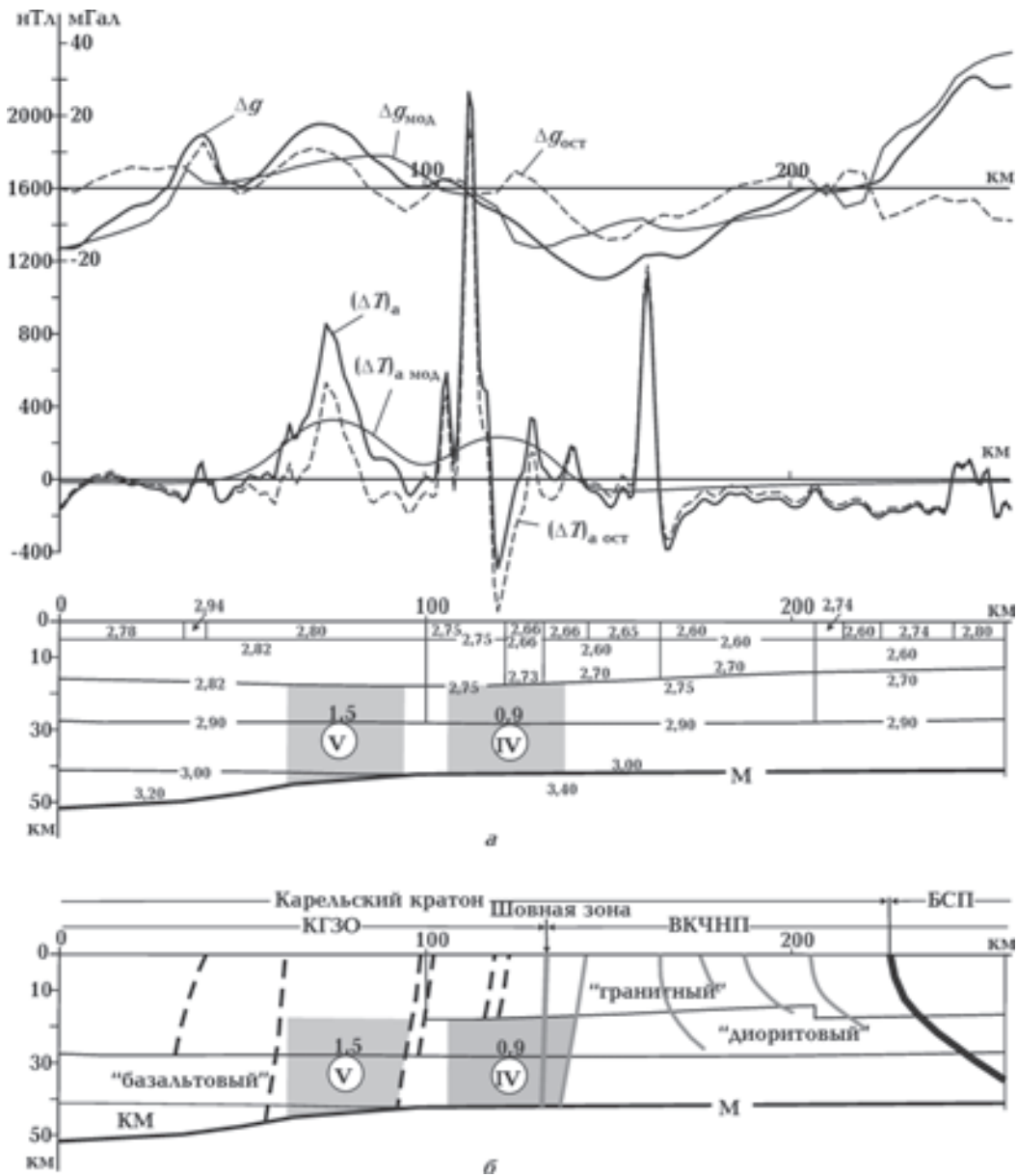


Рис. 14. Плотностная и магнитная модели (а) и их структурная интерпретация (б) по интерпретационному профилю I—I. Положение профиля и другие условные обозначения см. на рис. 3, 4, 12.

**Трехмерная магнитная модель средней и нижней частей земной коры. Общие положения и методические основы.** Многолетняя практика исследования аномального магнитного поля показала наличие в его составе региональной компоненты, что позволяет использовать его для изучения глубинного строения земной коры. К настоящему времени имеется большое количество публикаций, касающихся методики получения региональных магнитных аномалий (РМА), их математической интерпретации и истолкования природы источников [Крутиховская, 1986; Глубинное..., 2004 и др.].

Большинство магнитных моделей земной

коры изучаемого региона построено в двумерном варианте. Нам известен лишь один опыт построения трехмерной магнитной модели коры как части комплексной геофизической модели литосферы Фенноскандии в мелком масштабе с расчетом намагниченности по сетке  $0,5^\circ$  по широте,  $1^\circ$  по долготе и 4 км по глубине. Показано, что намагниченность нижней коры не превосходит 3—5 А/м [Глазнев, 2003].

В настоящее время есть достаточно полные данные для построения более детальной трехмерной магнитной модели земной коры: сводная карта аномального магнитного поля  $(\Delta T)_a$  в цифровом виде [Korhonen et al., 20026] с вы-

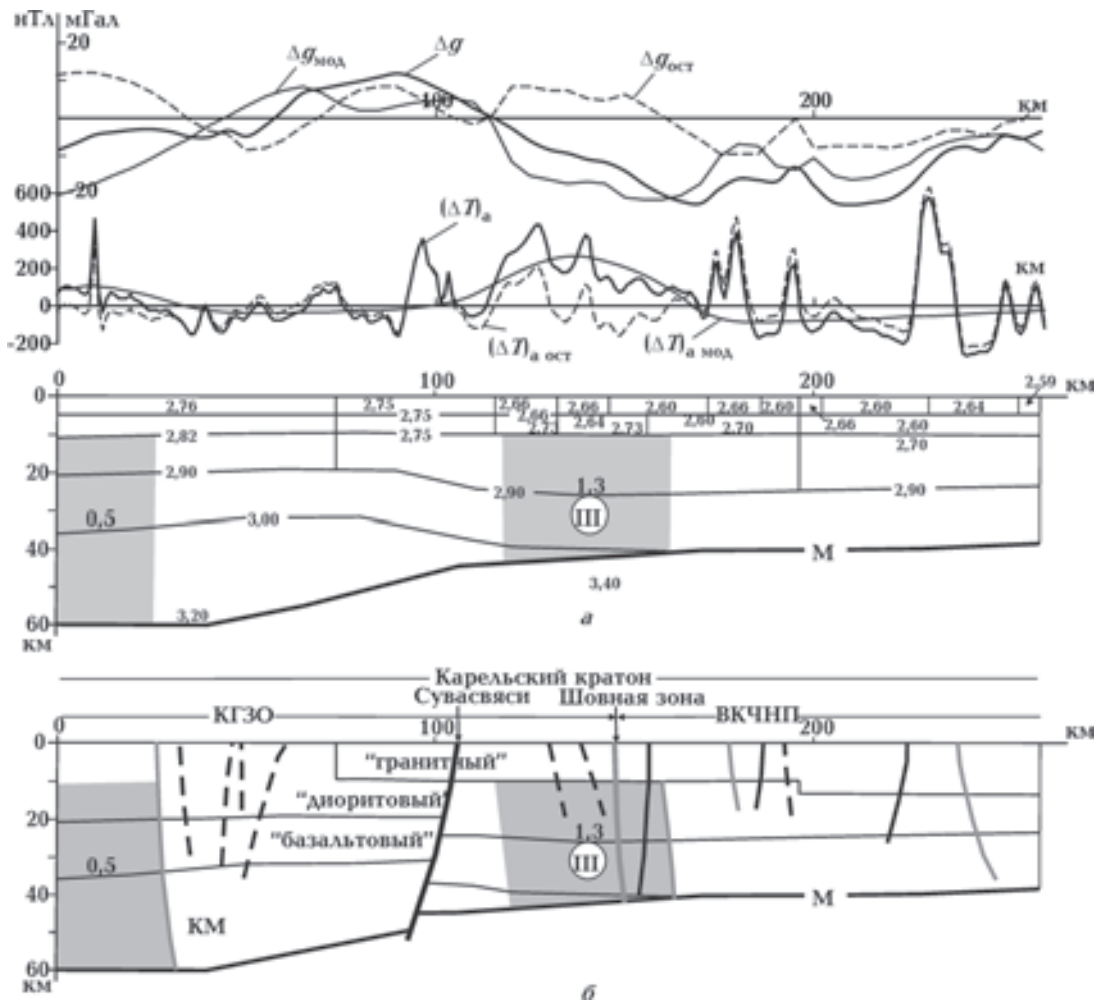


Рис. 15. Плотностная и магнитная модели (а) и их структурная интерпретация (б) по интерпретационному профилю II—II. Положение профиля и другие условные обозначения см. на рис. 3, 4, 12.

боркой значений поля по сети 1×1 км (рис. 18); данные распределения температур в разрезе коры [Шаров, 2013]; геологическая и петромагнитная карты кристаллического основания масштаба 1:1 000 000 [Петромагнитная..., 1978; Koistinen et al., 2001], охватывающие приграничную территорию Карелии и восточной Финляндии. В более ранних работах при составлении магнитной модели коры российской части региона были использованы карта аномального магнитного поля, не увязанная с полем территории Финляндии, и результаты наземной магнитной съемки по интерпретационным профилям. Интенсивность аномалий по используемым нами данным и интенсивность полученных ранее РМА оказалась примерно на 100 нТл ниже. Не исключено, что это связано с разным уровнем полей относимости разных государств. Как следствие,

уменьшились и расчетные значения намагниченности глубинных источников.

Обобщение сейсмических данных о глубинном строении земной коры центральной части Карельского кратона с делением коры на три слоя и коромантийную смесь позволяет оценить интервалы глубин залегания верхних и нижних кромок источников РМА [Шаров, 2013]. Интервалы плотности в предлагаемом послойном делении земной коры соответствуют следующему среднему составу слоев: «гранитному», «диоритовому», «базальтовому» и базит-ультрабазитовому. Как показал опыт интерпретации РМА Балтийского, Украинского и Алданского щитов [Билибина и др., 1986; Крутиховская, 1986; Пашкевич и др., 1992 и др.], источники локальных магнитных аномалий относятся к условному «гранитному» слою. Глубины до их нижних кромок не превышают 10 км, чему

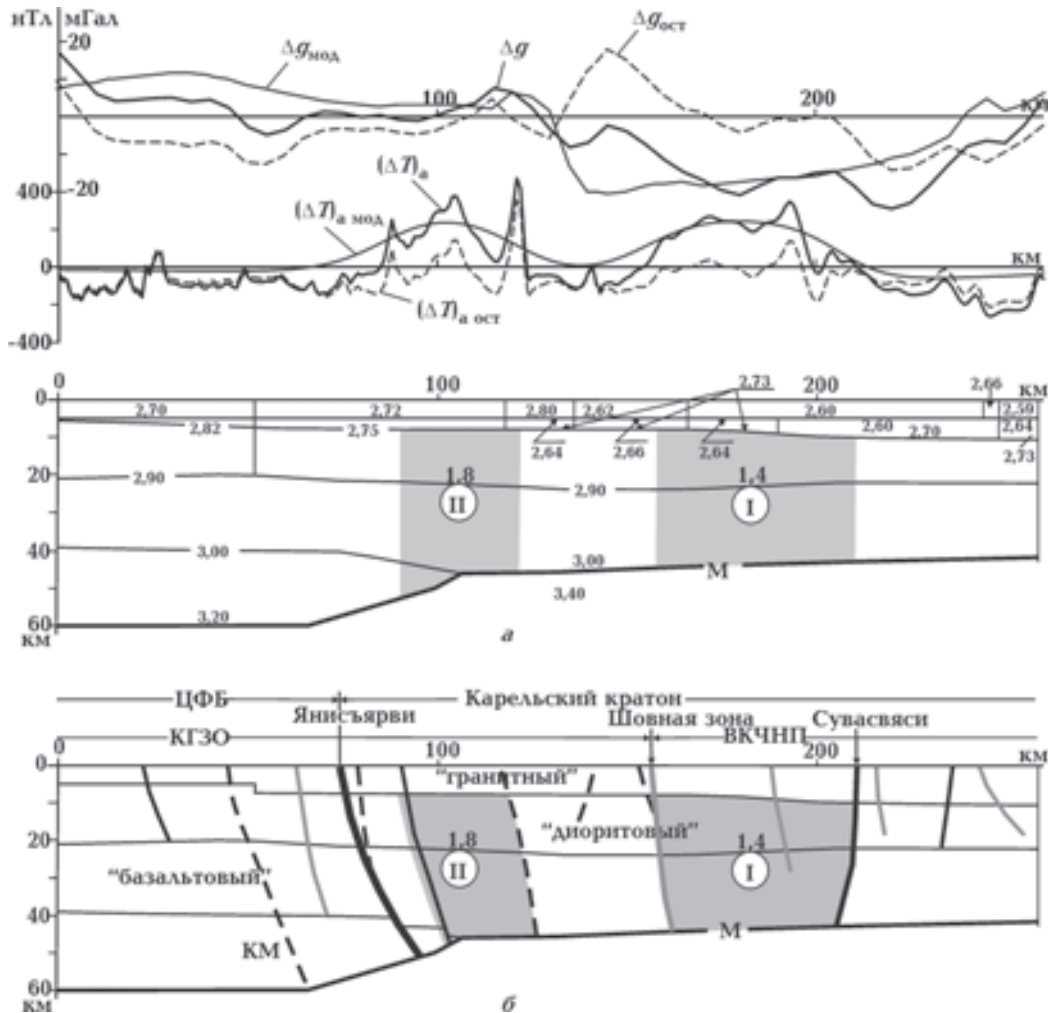


Рис. 16. Плотностная и магнитная модели (а) и их структурная интерпретация (б) по интерпретационному профилю III—III. Положение профиля и другие условные обозначения см. на рис. 3, 4, 12.

не противоречат оценки максимальных глубин распространения уникального Костомукшского железорудного месторождения (до 4,5—5,0 км) и синклинали в целом (6,5 км) [Горьковец и др., 2012]. Глубины до верхних кромок источников региональных аномалий соответствуют кровле «диоритового» слоя, нижние кромки при благоприятном температурном режиме располагаются на поверхности раздела М (см. рис. 3). При наличии в разрезе коромантийной смеси их положение дискуссионно и предполагает некоторые изменения интенсивности намагниченности. Скорее всего, утолщение земной коры и появление в разрезе коромантийной смеси связано с магматической базификацией коры и преобладанием в ней пород основного состава повышенной намагниченности. Таким образом, в описанной модели источники РМА относятся к средней и нижней частям коры.

Опыт разделения магнитного поля на со-

ставляющие показал, что оптимальным методом получения региональной компоненты аномального магнитного поля является геологическое редуцирование. Однако при сложном геологическом строении с интенсивно дифференцированными магнитными параметрами пород верхней части коры построение трехмерной модели «гранитного» слоя представляет собой специальную и весьма трудоемкую задачу, выполнение которой не предусматривалось программой работ. Формальные методы разделения поля, в связи с его сложным характером, требуют тщательного выбора параметров трансформаций, иногда переменных по площади. Учитывая эти обстоятельства, нами предлагается построение магнитной модели глубинной части коры следующим образом.

- Оценка геометрии проекций верхних граней источников РМА по исходному полю на основе уже имеющихся двумерных

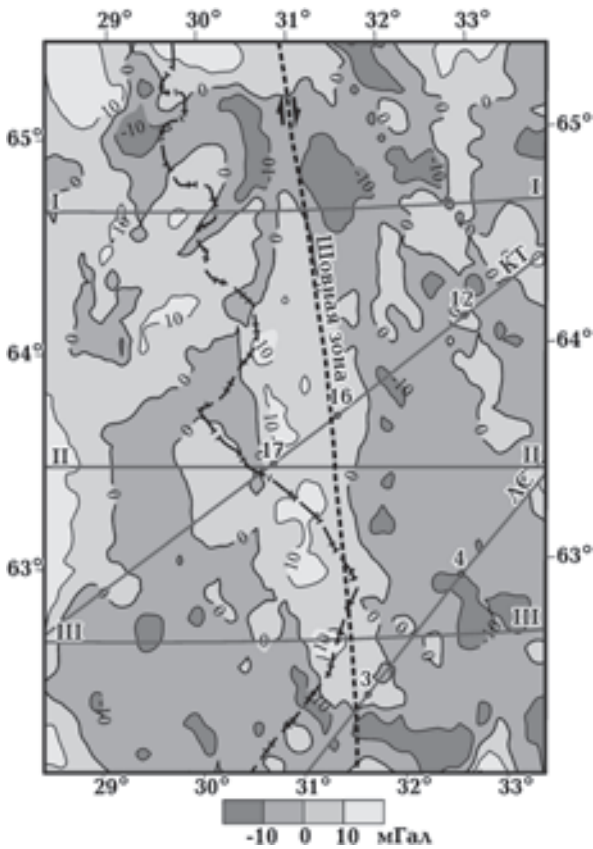


Рис. 17. Разностное поле  $\Delta g$ , мГал. Другие условные обозначения см. на рис. 2.

магнитных моделей по отдельным «опорным» профилям [Глубинное..., 2004].

- Отнесение верхних и нижних кромок источников к подошве «гранитного» слоя и разделу М соответственно, поскольку положение изотермической поверхности температуры Кюри магнетита оценивается на глубинах больших, чем глубины залегания раздела М.
- Последовательное приближение расчетного эффекта глубинных источников РМА к такому полю, при котором разностное поле между исходным и модельным содержит только локальные аномалии, соответствующие геологическим телам, обнажающимся на докембрийском фундаменте, и не содержит длинноволновую составляющую.
- Решение прямой задачи магниторазведки для оценки эффекта глубинных источников по программе [Старостенко и др., 2009], предназначенной, в частности, для расчета  $(\Delta T)_a$  в трехмерном варианте и в предположении однородной намагниченности источников, суммарный вектор ко-

торой направлен по вектору современного поля, а боковые грани имеют вертикальное падение.

Полученное таким образом модельное магнитное поле представляет его региональную компоненту и содержит установленные ранее Толвоярвинскую, Ребольскую и Костомукшскую РМА, а также Восточно-Финляндскую и Вокнаволоцкую РМА в приграничной зоне Финляндии и три слабоинтенсивные положительные РМА в краевой юго-западной части района (рис. 19).

**3D магнитная модель средней и нижней частей коры.** На рис. 4 показаны рельеф кровли средней коры, соответствующий глубинам до верхних кромок источников РМА, и положение проекций на земную поверхность верхних граней глубинных источников. В предположении, что боковые грани источников вертикальны, на рис. 3 приведены проекции нижних граней на поверхность рельефа раздела М, принятую за нижнее ограничение магнитоактивного слоя. Положение источников и окончательный результат расчета их эффекта, рассматриваемого как региональная компонента аномального магнитного поля, приведены на рис. 19.

Сопоставление разностного поля между исходным и модельным (региональным) с геологической и петромагнитной картами докембрийского фундамента региона [Петромагнитная..., 1978; Koistinen et al., 2001] показало, что оно полностью отражает вещественную и структурную неоднородности верхней части коры и таким образом является локальной компонентой аномального магнитного поля (рис. 21). Оцененная намагниченность глубинных магнитных источников изменяется от 0,5 до 1,8 А/м.

Необходимо отметить, что при выбранной модели источников оценка их намагниченности зависит от принятого положения нижних кромок возмущающих тел. При глубине их залегания меньшей, чем глубина до раздела М, средняя намагниченность, соответственно, должна быть несколько выше. Это видно из предшествующих работ [Крутиховская и др., 1986; Глубинное..., 2004], когда предельная глубина до нижних кромок была принята равной 30 км.

В первую очередь это касается источников, расположенных в юго-западной части площади, с намагниченностью 0,5 А/м. Именно здесь имеет наибольшую мощность коромантийная смесь (см. рис. 7).

**О возможной природе источников РМА.** За время изучения региональных магнитных аномалий докембрийских щитов и платформ

произошла своеобразная эволюция взглядов на возможную их природу. Прежде всего РМА связывались с суммарным эффектом источников верхней части коры. По мере детального изучения петромагнитных параметров пород кристаллического фундамента это позволило достоверно оценить вклад последних в аномальное магнитное поле и обоснованно сделать заключение о существовании глубинных магнитных источников. Первоначально источники РМА интерпретировались как глубинные массивы пород основного состава, но по мере накопления данных о составе и строении земной коры, в том числе и по результатам изучения глубинных ксенолитов, типах ведущих ферромагнетиков, характере метаморфизма,  $P$ - $T$ - $f_{O_2}$  режиме литосферы и о тектонических обстановках, благоприятных для формирования магнитных образований, природа источников связывалась с ядрами древнейшей консолидации коры, переработанными ядрами, шовными многократно активизированными и флюидоподводящими зонами, чарнокит-гранулитовыми поясами, проторифтогенными структурами и др. В зависимости от принятых концепций изменялись и модели источников, прежде всего, предельная глубина залегания их нижних кромок, тип намагниченности и характер изменения ее с глубиной. Основательный анализ данной проблемы был изложен в работах [Крутиховская, 1986, Крутиховская и др., 1986] и обобщен в последующих публикациях.

Что касается тектонотипов РМА, то подавляющее большинство их источников приурочено к шовным зонам [Петромагнитная..., 1993; Орлюк, Пашкевич, 2012]. При поддвиго-надвиговом характере перемещения, часто приводящему к типичному для этих зон «сдваиванию» мощности коры, нижние кромки источников могут находиться в поднадвиговой зоне ниже глубин возможного существования ферромагнетиков в ненарушенном разрезе (~ 30 км в коре щитов). Природу всех РМА исследуемого региона, за исключением Вокнаволоксской, можно считать связанной с зоной многократной тектономагматической активизации Печенгско-Ладожского пояса, а образование ферромагнитных минералов-носителей магнетизма — вторичным. Источник Вокнаволоксской РМА расположен в узле пересечения северо-восточных и широтных нарушений, а корреляция РМА с гравитационной аномалией может указывать, как справедливо считают многие исследователи, на массив ультраосновных—щелочных пород, не выходящий на поверхность.

Каждый из приведенных вариантов объяснения природы РМА в условиях древних щитов нуждается в петрологических и термодинамических реконструкциях, что является далеко неоднозначной задачей.

**Структурная интерпретация плотностной и магнитной неоднородностей коры.** Полученная магнитная модель проанализирована с точки зрения структурного положения глубинных магнитных источников и соотношения их с плотностными. С этой целью привлечены приведенные в работе [Глубинное..., 2004] схемы тектонического районирования восточной части Фенноскандинавского щита на разных глубинных срезах на основе интерпретации потенциальных полей [Глубинное ..., 2004, рис. 4.3—4.5]. При построении серии карт авторами использована площадная фильтрация гравитационного и магнитного полей, осредненных с различными радиусами. На территории наших исследований авторами этой работы подтверждены известные шовные мобильно-проницаемые зоны, разграничивающие геоблоки первого (Свекофеннский, Карельский и Лапландско-Беломорский) и второго порядка. В пределах Карельского блока по гравитационному и магнитному полям, осредненным с радиусом 50 км, кроме шовных зон первого ранга в центре Центрально-Карельского поднятия выделена структура второго ранга, близкого к меридиональному простиранию. Эту зону можно проследить и в гравитационном поле, осредненном с радиусом 100 км, приведенном в данной работе, по смене «структурного» плана изолиний. Она отчетливо картируется как зона и в наблюдаемом поле  $\Delta g$  (см. рис. 2), и в смене мощностей слоев земной коры (см. рис. 3, 5, 6), и в наблюдаемом магнитном поле (см. рис. 18).

Для более подробного анализа связи глубинных магнитных источников с разломной тектоникой были обобщены данные о разрывных нарушениях, обозначенных на геологических картах, и дополнены прослеженными нами по магнитному и гравитационному полям с учетом данных ГСЗ вдоль профилей. Полученная схема разломов в сочетании с глубинными магнитными источниками приведена на рис. 21.

В пределах изучаемой территории можно выделить несколько систем разломов. Прежде всего, это разломы северо-западного простирания первого, второго и третьего рангов, составляющие систему, связанную с межгеоблоковой мобильно-проницаемой зоной Янисъярви, ограничивающей с северо-востока

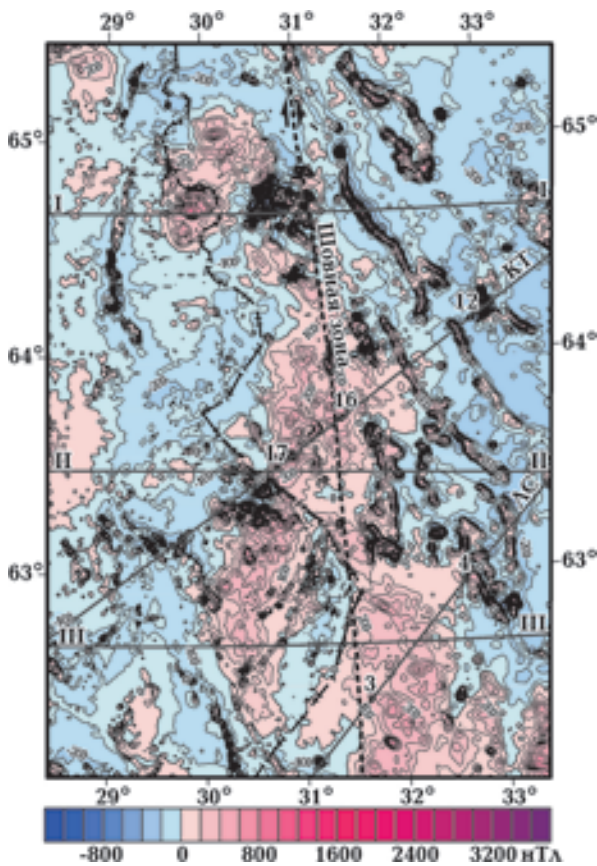


Рис. 18. Аномальное магнитное поле ( $\Delta T_a$ ) центральной части Карельского кратона (изолинии в нТл). Другие условные обозначения см. на рис. 2.

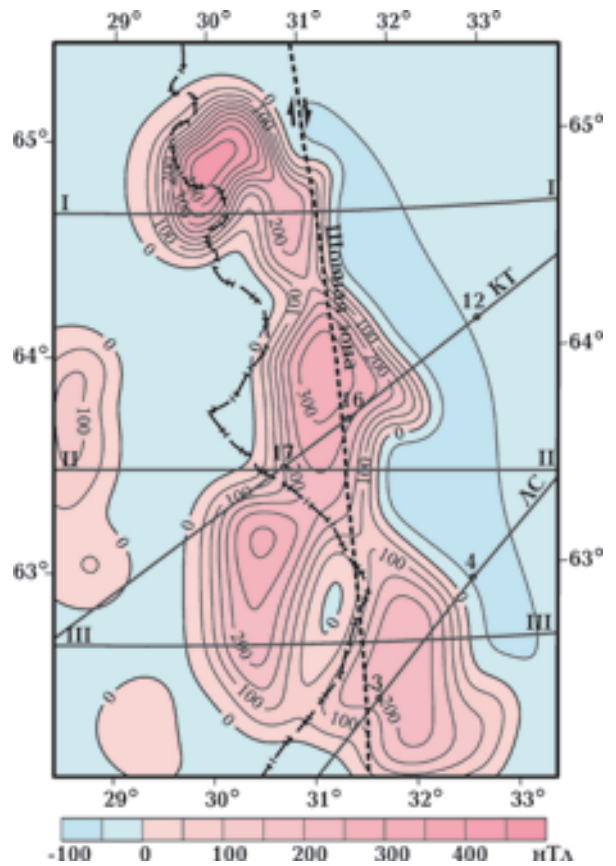


Рис. 19. Расчетный эффект источников РМА, нТл. Другие условные обозначения см. на рис. 2.

Свекофеннский геоблок. Второй системой разломов служат субмеридиональные нарушения, связанные с разломом, упомянутым выше, который можно назвать шовной зоной 31-го градуса в.д. Классификация этой структуры как шовной зоны подтверждается также результатами гравитационного моделирования. Интерпретация сейсмотомографических данных, выполненная в работе [Цветкова и др., 2010], показала, что вдоль меридиональной зоны 30—31° происходит увеличение мощности сейсмической литосферы с запада на восток с соответствующим изменением скорости. Смена распределения скоростей по этой зоне зафиксирована и на более глубоких горизонтах мантии.

Как указывалось выше, эта структура отнесена авторами [Глубинное..., 2004] к разломам второго порядка. В этой же работе отмечено, что восточная часть Карельской зеленокаменной области пересечена серией палеопротерозойских осадочно-вулканогенных поясов северо-северо-западного простирания, залегающих под острым углом к субмеридиональ-

ному простиранию неоархейских зеленокаменных поясов. Заметим здесь, что разломы, сопровождающие эти палеопротерозойские зеленокаменные пояса, в плане представляют типичную картину сколовых нарушений, предположительно связанных с оперением правостороннего сдвига вдоль субмеридионального шва. Эти оперяющие разломы по сейсмическим данным имеют северо-восточное падение и закономерно подворачиваются при приближении к северо-западным разломам системы Янисъярви — Сувасвяси.

К западу от субмеридионального шва тип разломов существенно отличается от описанных. В качестве характерных можно отметить дугообразные разломы Карельского кратона, в том числе разломы, конформные с Вокнаволоцким блоком, с известным зеленокаменным поясом Кухмо и согласные с Лабукской [Koistinen et al.; 2001] плагиогранитной дугообразной зоной этого блока. Они как бы «просвечивают» под системой разломов северо-западного простирания и имеют общую субмеридиональную направленность, согласную с простиранием шва. Здесь

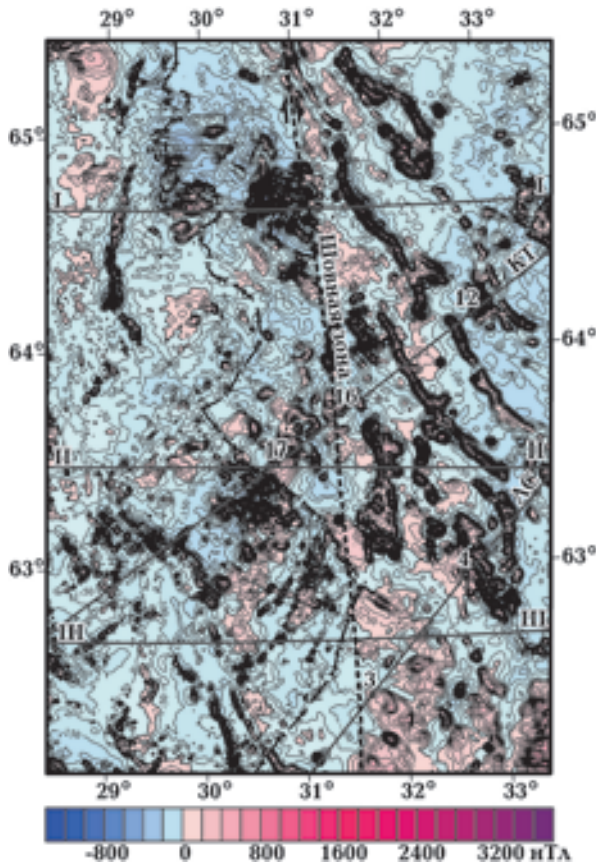


Рис. 20. Разностное поле ( $\Delta T_a$ ), нТл. Другие условные обозначения см. на рис. 2.

также достаточно широко развиты широтные «сквозные» разломы, однако, как правило, не выходящие в восточную часть площади.

Обращаясь теперь к источникам РМА, можно отметить явно выраженную связь их геометрии с описанными системами разломов. При этом наиболее интенсивно намагниченные глубинные тела (источники Восточно-Финляндской, Толвоярвинской, Ребольской и Костомукшской РМА) образуют своеобразный пояс субмеридионального направления вдоль субмеридионального шва. Ранее такая связь уже отмечалась в работах по типизации глубинных источников РМА [Крутиховская и др., 1986; Магнитная..., 1990, Глубинное..., 2004 и др.]. Этот пояс РМА Карелии, названный Печенгско-Ладожским, рассматривается как долгоживущая шовная структура, заложенная вдоль глубинной зоны мантийных разломов и развивавшаяся как многократно активизированная зона. В пользу природы глубинных источников этой зоны, связанной с многократно наложенными вторичными процессами активизации, свидетельствует отсутствие корреля-

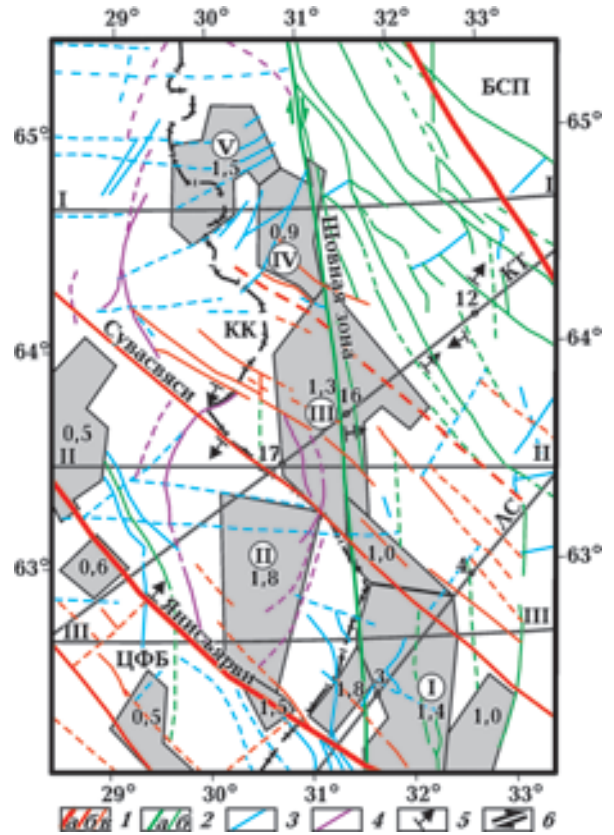


Рис. 21. Трехмерная магнитная модель средней и нижней коры центральной части Карельского кратона: 1 — система разломов северо-западного простирания ( $a$  — I,  $b$  — II,  $v$  — III рангов); 2 — система разломов меридионального шва ( $a$  — II,  $b$  — III рангов); 3 — разломы других направлений; 4 — дугообразные разломы; 5 — направления падения разломов; 6 — направления горизонтальных перемещений. БСП — Беломорский складчатый пояс. Разрывные нарушения (сплошные линии — разломы, выделенные по геологическим данным, пунктирные — по магнитному и гравитационному полям). Другие условные обозначения см. на рис. 2, 3.

ции РМА с гравитационными аномалиями и результатами плотностного моделирования. На рис. 8—10 четко зафиксирована область пониженной плотности меридионального простирания в гранитном слое непосредственно к западу от Печенгско-Ладожского пояса, которая может объясняться раздробленностью пород и их метасоматическими преобразованиями. Не отмечается связи РМА с гравитационными аномалиями и за пределами описанного пояса. Исключение составляет Вокнаволоцкая аномалия, примыкающая к нему на северо-западе, относящаяся к центральной части одноименного блока и коррелирующая с максимумом гравитационного поля.

На рис. 12—16 приведены результаты плотностного и магнитного моделирования по про-

филям ГСЗ и интерпретационным профилям, секущим меридиональный пояс источников РМА. На этих рисунках показаны распределение плотности и намагниченности в разрезе земной коры, полученные в результате моделирования. Они сопровождаются графиками наблюдаемых, модельных и остаточных гравитационного и магнитного полей. В нижней части рисунков дана структурная интерпретация полученных магнитных и гравитационных моделей, предложенная нами на основании анализа разломной тектоники с использованием сейсмотомографических разрезов [Шаров, 2013]. В результате гравитационного моделирования в некоторых блоках получены мощности «гранитного» и «диоритового» слоев, отличные от таковых по данным ГСЗ. Так, «гранитный» слой при принятой его плотностной параметризации отсутствует в районе Вокнаволоцкого блока и к югу от него (рис. 8—10, 14, 15). Напротив, в восточной части площади его мощность на 4 км больше, чем на сейсмических разрезах (см. рис. 13, 15), что согласуется с более дифференцированной скоростной моделью сейсмотомографического разреза по профилю Лахденпохья—Сегозеро. Геометрия глубинных магнитных источников, в частности наклон боковых граней, откорректирована с учетом данных о направлении падения основных разломов по данным ГСЗ и сейсмотомографическим разрезам. Такая корректировка углов наклона боковых граней не приводит к существенным изменениям в расчетных эффектах от источников РМА, поэтому вполне допустима. Возможно, что по крупным разломам северо-западного простирания происходят вертикальные смещения отдельных слоев, что отражено, например, на рис. 15. Верхние кромки магнитных источников, в соответствии с отмеченными различиями в разделении коры на слои по плотностному моделированию и данными сейсмотомографии, также могут находиться на меньших глубинах. Это относится к источнику Вокнаволоцкой РМА, верхняя кромка которого в связи с отсутствием «гранитного» слоя может залегать на глубине 1—2 км. Тогда его средняя намагниченность при принятой глубине до нижней кромки должна быть менее 1,5 А/м. Более сложное строение может иметь и верхняя кромка Ребольской РМА. К западу от шовной зоны в районе известной Лехтинской структуры согласно сейсмотомографическому разрезу по профилю Кемь—Тулос она должна подниматься до глубины порядка 2 км (см. рис. 13). В морфоло-

гию глубинных источников эти возможные изменения не вносились, поскольку построенные нами модели базировались на данных ГСЗ о глубинном строении земной коры. Как видно из изложенного, последние, по всей видимости, нуждаются в детализации.

Основной закономерностью распределения по площади глубинных магнитных источников является приуроченность их к зонам сочленения блоков разных рангов, к многократно активизированным шовным зонам, также установленным во многих тектонических регионах.

**Обсуждение результатов.** Из рассмотрения взаимосвязей сейсмической и плотностной неоднородностей коры можно сделать вывод о том, что главный вклад в формирование земной коры региона вносит нижний слой. Наращивание коры снизу происходит с одновременным уменьшением в ее составе доли верхнего и среднего этажей.

Весьма показательным, что на Балтийском щите максимальная мощность «базальтовой» подушки в основании коры находится между Карельским кратоном и раннепротерозойской Свекофеннской областью [Шаров, Митрофанов, 2014]. Можно предположить существование в целом обратной зависимости между сложностью геофизической расслоенности земной коры и древностью ее структурной организации. Более молодые в структурном отношении (активизированные) части земной коры обладают более сложной расслоенностью, чем области древней консолидации. Наблюдаемые геофизические границы отражают современную структуру земной коры. Однако этим не отрицается наличие реликтовых сейсмических границ в литосфере, при условии, что новейшие процессы не были очень активными. Границы могут сохраняться в случаях совмещения новообразованных структур с древними. Повидимому, структуры литосферы Фенноскандинавского щита, претерпевшие интенсивную переработку в протерозое с активным обменом мантийного и корового вещества, должны быть подвергнуты особо тщательным металлогеническим исследованиям. С этими структурами связаны многие твердые полезные ископаемые.

Акцентируя внимание на ведущей роли разрастания «базальтового» слоя в создании коры повышенной мощности, авторы не представляют этот процесс в виде однонаправленной базификации коры. Более того, следует особо подчеркнуть, что геофизические данные не могут служить надежным индикатором химизма нижней коры вследствие конвергентности фи-



зических свойств горных пород при высоких термодинамических параметрах.

Можно констатировать, что строение земной коры региона относится к мозаично-блоковому типу. В ней выделены отдельные этажи с различными геофизическими параметрами, что фиксируется изменениями скорости и плотности. Магнитная неоднородность коры связывается главным образом с крупными зонами активизации, какой в регионе является меридиональная Ладожско-Ботническая зона.

Поверхность Мохоровичича имеет сложное строение. В современном рельефе границы М и в неоднородностях нижней части земной коры находят отражение лишь наиболее крупные структурные элементы — границы основных геотектонических провинций, или геоблоков, реже тектонических зон меньших масштабов.

Дальнейшая детализация полученных зависимостей и привлечение дополнительных геолого-геофизических материалов могут послужить не только основой для решения теоретических вопросов геологии и сейсмологии, но и помочь в решении проблем связи между глубинной структурой литосферы, строением верхних горизонтов земной коры и ее металлогенезом.

**Заключение.** В результате комплексной интерпретации современных сейсмических, гравиметрических, магнитометрических, петрофизических и геологических данных впервые для приграничной территории восточной Финляндии и западной Карелии построены согласованные трехмерные модели строения земной коры на всю ее мощность. Представленные 3D модели являются очередным шагом в познании структурных особенностей территории и металлогенезических закономерностей. На основе полученных моделей сделаны следующие выводы.

- Опираясь на двумерные сейсмические разрезы при построении трехмерной плотностной модели земной коры, получена пятислойная модель, которая позволила уточнить данные ГСЗ о расслоенности коры и распространить эти сведения на весь район исследований.
- Установлено отличие в распределении плотности земной коры по площади и глубине в восточной и западной частях региона, разделенных шовной зоной  $31^\circ$  в.д. Восточная часть представлена менее плотным разрезом коры, чем западная. Шовная зона прослеживается в верхнем и среднем слоях и сопровождается с запада зоной пониженной плотности. Восточная и западная

части исследуемой территории различаются также структурным планом разломной тектоники, подтверждающим наличие крупного правого сдвига по шовной зоне.

- Впервые построена трехмерная магнитная модель средней и нижней частей земной коры, охватывающая приграничную территорию Карелии и восточной Финляндии. Создание модели базировалось на сводной карте аномального магнитного поля, петромагнитной и геологической картах, данных ГСЗ и распределении температур в разрезе коры. Наиболее интенсивно намагниченные глубинные тела (источники Восточно-Финляндской, Толвоярвинской, Ребольской и Костомукшской РМА) трассируются вдоль шовной зоны, представляющей фрагмент долгоживущей Ладожско-Печенгской шовной структуры с многократной тектономагматической активизацией на протяжении постархейской истории развития щита.
- В целом отмечается отсутствие корреляции плотностной и магнитной неоднородностей коры. Это говорит о связи образования глубинных магнитных источников с активизацией шовной зоны и формированием в ней вторичных ферромагнетиков. Исключение составляет Вокнаволоцкий блок, характеризующийся отсутствием «гранитного» слоя и корреляцией гравитационной и магнитной аномалий. Глубинный источник Вокнаволоцкой РМА намагниченностью  $1,5$  А/м может связываться с массивом ультраосновных — щелочных пород, не выходящим на поверхность.
- Сводные плотностные и магнитные модели вдоль профилей ГСЗ, отработанных наиболее детально, показывают, что земная кора является мозаично-блоковой неоднородной средой. В верхней части локально развиты как волноводы с пониженной, так и высокоскоростные блоки с увеличенной плотностью. Построенные геофизические модели, учитывающие последние результаты гравитационных, магнитных и сейсмических исследований, позволят наряду с решением теоретических вопросов геологии и геофизики поставить и чисто практические задачи — исследовать связи металлогенеза верхних горизонтов земной коры с ее глубинной структурой.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность М. И. Орлюку за полезные замечания, учтенные в окончательной версии статьи.

## Список литературы

- Билибина Т. В., Крутиховская З. А., Титов В. К. Региональные магнитные аномалии и тектоника Алданского щита. *Сов. геология*. 1986. № 6. С. 106—115.
- Глазнев В. Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: ЗАО «КаЭМ», 2003. 252 с.
- Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления. Под ред. Н. В. Шарова. Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, 2004. 353 с.
- Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Максимович Л. А. Костомукша — комплексный рудный объект Республики Карелия. *Горный журнал*. 2012. № 9/1. С. 19—23.
- Красовский С. С. Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле. Киев: Наук. думка, 1981. 261 с.
- Красовский С. С., Куприенко П. Я., Красовский А. С. Объемное гравитационное моделирование глубинных структур литосферы Украины. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Тр. междунар. конф. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та*, 1998. С. 80—92.
- Крутиховская З. А. Глубинные магнитные неоднородности — миф или действительность? *Геофиз. журн.* 1986. Т. 8. № 5. С. 3—22.
- Крутиховская З. А., Негруца В. З., Елисеева С. В. Историко-геологические предпосылки возникновения региональных магнитных аномалий восточной части Балтийского щита. *Геофиз. журн.* 1986. Т. 8. № 5. С. 67—78.
- Куприенко П. Я., Макаренко И. Б., Старостенко В. И., Легостаева О. В. Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 5. С. 3—27.
- Литосфера Центральной и Восточной Европы: Геотраверсы I, II, V. Гл. ред. А. В. Чекунов. Киев: Наук. думка, 1987. 168 с.
- Магнитная модель литосферы Европы. Отв. ред. Г. И. Каратаев. Киев: Наук. думка, 1990. 168 с.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Глубинные источники региональных магнитных аномалий: тектонотипы и связь с транскоровыми разломами. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 224—234.
- Пашкевич И. К., Орлюк М. И., Елисеева С. В., Мозговая А. П. Сравнительная характеристика глубинных магнитных неоднородностей Балтийского и Украинского щитов. В кн.: *Глубинное строение и геодинамика кристаллических щитов Европейской части СССР. Сб. научн. трудов*. Апатиты: КарНЦ РАН, 1992. С. 19—29.
- Петромагнитная карта геологических формаций Восточной части Балтийского щита. 1:1 000 000. Под ред. Н. Б. Дортман. Москва: Аэрогеология, 1978. 7 л.
- Петромагнитная модель литосферы. Отв. ред. Д. М. Печерский. Киев: Наук. думка, 1993. 175 с.
- Петроплотностная карта геологических формаций Восточной части Балтийского щита. 1:1 000 000. Под ред. Н. Б. Дортман, М. Ш. Магид. Москва: Аэрогеология, 1978. 7 л.
- Савченко А. С., Старостенко В. И., Легостаева О. В., Макаренко И. Б. Практическое использование автоматизированного комплекса при интерпретации данных потенциальных полей методом подбора. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 35-й сессии Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского 29 января — 3 февраля 2008 г.* Ухта: УГТУ, 2008. С. 271—274.
- Старостенко В. И., Дядюра В. А., Загорько А. Н. Об интерпретации гравитационного поля методом подбора. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1975. № 4. С. 78—86.
- Старостенко В. И., Легостаева О. В. Прямая задача гравиметрии для неоднородной произвольно усеченной вертикальной прямоугольной призмы. *Физика Земли*. 1998. № 12. С. 31—44.
- Старостенко В. И., Легостаева О. В., Макаренко И. Б., Павлюк Е. В., Шарыпанов В. М. Об автоматизированном вводе в компьютер изображений геолого-геофизических карт с разрывами первого рода и визуализации в интерактивном режиме трехмерных геофизических моделей и их полей. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 1. С. 3—13.
- Старостенко В. И., Шарыпанов В. М., Савченко А. С., Легостаева О. В., Макаренко И. Б., Куприенко П. Я. Об автоматизированной интерактивной обработке графических изображений геологических и геофизических объектов. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 1. С. 54—62.
- Старостенко В. И., Шуман В. Н., Иващенко И. Н., Легостаева О. В., Савченко А. С., Скрипник О. Я. Магнитные поля трехмерных анизотропных тел: теория и практика вычислений. *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 20—35.
- Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Сейсмоотомография Восточно-Евро-

- пейской платформы: трехмерная  $P$ -скоростная модель мантии под Фенноскандией. II. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 1. С. 60—77.
- Чекунов А. В., Старостенко В. И., Красовский С. С., Кутас Р. И., Оровецкий Ю. П., Пашкевич И. К., Трипольский А. А., Елисеева С. В., Куприенко П. Я., Митрофанов Ф. П., Шаров Н. В., Загородный В. Г., Глазнев В. Н., Гарецкий Р. Г., Каратаев Г. И., Аксаментова Н. В., Гутерх А., Грабовска Т., Колбаньски А., Рыка В., Даглез Р., Цвойдзински С., Корхонен Х., Луосто У., Гаал Г., Журавлев В. А., Сагов А. С. Геотрансект ЕВРО-3 (EU-3). *Геофиз. журн.* 1993. Т. 15. № 2. С. 3—32.
- Шаров Н. В. Глубинные сейсмические исследования в центральной части Карельского кратона. *Физика Земли.* 2013. № 1. С. 36—52.
- Шаров Н. В. Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным. Апатиты: КарНЦ РАН, 1993. 144 с.
- Шаров Н. В., Митрофанов Ф. П. Скоростные неоднородности литосферы Фенноскандинавского (Балтийского) щита. *Докл. АН.* 2014. Т. 454. № 2. С. 221—224.
- Koistinen T., Stephens M. B., Bogatchev V., Nordgulen O., Wennerström M., Korhonen J., 2001. Geological Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2000 000. Geological Surveys of Finland, Norway, Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia.
- Korhonen J. V., Aaro S., All T., Elo S., Haller L. Ä, Kääriäinen J., Kulinich A., Skilbrei J. R., Solheim D., Säävuori H., Vaher R., Zhdanova L., Koistinen T., 2002a. Bouguer Anomaly Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2000 000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and Ministry of Natural Resources of Russian Federation.
- Korhonen J. V., Aaro S., All T., Nevanlinna H., Skilbrei J. R., Säävuori H., Vaher R., Zhdanova L., Koistinen T., 2002b. Magnetic Anomaly Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2000 000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and Ministry of Natural Resources of Russian Federation.
- Korja A., Heikkinen P. J., 2008. Seismic images of Paleoproterozoic microplate boundaries in the Fennoscandian Shield. *The Geological Society of America Special Paper* 440, 229—248.
- Kukkonen I. T., Lahtinen R., 2006. Finnish Reflection Experiment FIRE 2001—2005. *Geological Survey of Finland, Special Paper* 43. 247 p.
- Mitrofanov F. P., Sharov N. V., Zagorodny V. G., Glaznev V. N., 1998. Crustal Structure of the Baltic Shield Along the Pechenga—Kostomuksha—Lovisa Geotraverse. *Int. Geol. Rev.* 40(11), 990—997.
- Silvennoinen H., Kozlovskaya E., 2007. 3D structure and physical properties of the Kuhmo Greenstone Belt (eastern Finland): Constraints from gravity modeling and seismic data and implications for the tectonic setting. *J. Geodyn.* 43, 358—373.
- Yliniemi J., Kozlovskaya E., Hjelt S. E., Komminaho K., Ushakov A. and the SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group, 2004. Structure of the crust and uppermost mantle beneath southern Finland revealed by analysis of local events registered by the SVEKALAPKO seismic array. *Tectonophysics* 394, 41—67.

## Three-dimensional geological-geophysical lithosphere model of the central part of the Karelian craton

© I. K. Pashkevich, N. V. Sharov, A. S. Savchenko V. I. Starostenko, 2014

On the base of analysis and generalization of total available geological-geophysical information accumulated during forty years passed a complex of geophysical models of the earth's crust has been obtained, which gives up-to-date idea on deep structure of the central part of the Karelian craton. The plotted seismic 3D density and magnetic models define more exactly our notions on stratification of the earth's crust, the behavior of geophysical boundaries including the crust-mantle one. Complex interpretation of potential fields based on seismic model of the earth's crust of the region taking into account petro-physical and geological data, made possible to estimate special features of layered-blocky structure of the region and of structural correlation of sub-longitudinal suture (the fragment of Ladoga-Pechenga zone of multiple activation) in tectonic division and its relation to deep magnetic sources.

**Key words:** seismic velocity, density model, magnetic model, the earth's crust, M-boundary, Karelian craton.

## References

- Bilibina T. V., Krutikhovskaya Z. A., Titov V. K.*, 1986. Regional magnetic anomalies and tectonics of the Aldan Shield. *Sovetskaya geologiya* (1), 106—115 (in Russian).
- Glaznev V. N.*, 2003. Integrated geophysical models of the Fennoscandian lithosphere. Apatity: ЗАО«K&M». 252 p. (in Russian).
- Deep Structure and Seismicity of Karelia and Adjacent Territories*, 2004. Ed. N. V. Sharov Petrozavodsk: KRC RAS Publ., 353 p. (in Russian).
- Gorkovets V. Ya., Raevskaya M. B., Maksimovich L. A.*, 2012. Kostomuksha as a complex ore object of Karelian Republic. *Gorniy zhurnal* (9/1), 19—23. (in Russian).
- Krasovskiy S. S.*, 1981. Reflection of the dynamics of the continental type earth crust in a gravity field. Kiev: Naukova Dumka, 261 p. (in Russian).
- Krasovskiy S. S., Kuprienko P. Ya., Krasovskiy A. S.*, 1998. Volumetric gravity modelling of the deep lithospheric structures of Ukraine. *Theoretical and practical problems in geological interpretation of gravity, magnetic and electrical fields: Proc. Int. Conf. Voronezh: VU Publ.* P. 80—92 (in Russian).
- Krutikhovskaya Z. A.*, 1986. Deep magnetic heterogeneities — a myth or reality? *Geofizicheskij zhurnal* 8(5), 3—22 (in Russian).
- Krutikhovskaya Z. A., Negrutsa V. Z., Eliseyeva S. V.*, 1986. Historical and geological-prerequisites of the emergence of regional magnetic anomalies in the eastern Baltic Shield. *Geofizicheskij zhurnal* 8(5), 67—78 (in Russian).
- Kuprienko P. Ya., Makarenko I. B., Starostenko V. I., Legostaeva O. V.*, 2007. Three-dimensional density model of the earth crust and the upper mantle of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskij zhurnal* 29(5), 3—27 (in Russian).
- The Lithosphere of Central and Eastern Europe: Geotraverses I, II, and V*, 1987. Ed. A. V. Chekunov. Kiev: Naukova Dumka, 168 p. (in Russian).
- Magnetic model of the lithosphere of Europe*, 1990. Ed. G. I. Karataev. Kiev: Naukova Dumka, 168 p. (in Russian).
- Orliuk M. I., Pashkevich I. K.*, 2012. Deep sources of regional magnetic anomalies: tectonic types and relation with transcrustal faults. *Geofizicheskij zhurnal* 34(4), 224—234 (in Russian).
- Pashkevich I. K., Orlyuk M. I., Eliseyeva S. V., Mozgovaya A. P.*, 1992. Comparative description of the deep magnetic heterogeneities of the Baltic and Ukrainian Shields. *Deep structure and dynamics of the crystalline shields of the European USSR. Collection of Scientific Papers.* Apatity: KRC RAS Publ., P. 19—29 (in Russian).
- Petromagnetic map of the geological formations for the eastern part of the Baltic Shield*, 1978. 1:1 000 000. Ed. N. B. Dortman. Moscow: Aerografiya, 7 sh. (in Russian).
- Petromagnetic model of the lithosphere*, 1993. Ed. D. M. Pecherskiy. Kiev: Naukova Dumka, 175 p. (in Russian).
- Petrodensity map of the geological formations for the eastern part of the Baltic Shield*, 1978. Eds N. B. Dortman, M. Sh. Magid. 1:1 000 000. Moscow: Aerografiya, 7 sh. (in Russian).
- Savchenko A. S., Starostenko V. I., Legostaeva O. V., Makarenko I. B.*, 2008. Practical application of an automated complex for interpreting potential field data by the selection method. *Theoretical and practical problems in geological interpretation of gravity, magnetic and electrical fields: Proc. of the 35<sup>th</sup> session of D. G. Uspenskiy Int. Seminar 29 January — 3 February 2008.* Ukhta: USTU Publ., P. 271—274 (in Russian).
- Starostenko V. I., Dyadyura V. A., Zavorot'ko A. N.*, 1975. On interpreting a gravity field by the selection method. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (4), 78—86 (in Russian).
- Starostenko V. I., Legostaeva O. V.*, 1998. Direct gravimetric problem for a heterogeneous, arbitrarily truncated vertical rectangular prism. *Fizika Zemli* (12), 31—44 (in Russian).
- Starostenko V. I., Legostaeva O. V., Makarenko I. B., Pavlyuk E. V., Sharypanov V. M.*, 2004. On automated input of geological-geophysical map images with first-rank breaks and visualization of three-dimensional geophysical models and their fields in interactive model. *Geofizicheskij zhurnal* 26(1), 3—13 (in Russian).
- Starostenko V. I., Sharypanov V. M., Savchenko A. S., Legostaeva O. V., Makarenko I. B., Kuprienko P. Ya.*, 2011. On automated interactive processing of the graphic images of geological and geophysical objects. *Geofizicheskij zhurnal* 33(1), 54—62 (in Russian).
- Starostenko V. I., Shuman V. N., Ivashchenko I. N., Legostaeva O. V., Savchenko A. S., Skrinik O. Ya.*, 2009. Magnetic fields of three-dimensional anisotropic bodies: theory and practice of the calculations. *Fizika Zemli* (8), 20—35 (in Russian).
- Tsvetkova T. A., Shumlyanskaya L. A., Bugaenko I. V., Zaets L. N.*, 2010. Seismic-tomography of the East-

- European platform: three-dimensional P-velocity model of the mantle under Fennoscandia. II. *Geofizicheskiy zhurnal* 32(1), 60—76 (in Russian).
- Chekunov A. V., Starostenko V. I., Krasovskiy S. S., Kutas R. I., Orovetskiy Yu. P., Pashkevich I. K., Tripolskiy A. A., Eliseeva S. V., Kuprienko P. Ya., Mitrofanov F. P., Sharov N. V., Zagorodny V. G., Glaznev V. N., Garetskiy R. G., Karataev G. I., Ak-samentova N. V., Guterkh A., Grabovska T., Koblan-ski A., Ryka V., Dadlez R., Tsvoidzinsky S., Korkho-nen Kh., Luosto U., Gaal G., Zhuravlev V., Sadov A. S.*, 1993. Geotransect EURO-3 (EU-3). *Geofizicheskiy zhurnal* 15(2), 3—31 (in Russian).
- Sharov N. V.*, 2013. Deep seismic studies in the Central Karelian craton. *Fizika Zemli* (1), 36—52 (in Russian).
- Sharov N. V.*, 1993. Lithosphere of the Baltic Shield from seismic data. Apatity: KRC RAS Publ., 144 p. (in Russian).
- Sharov N. V., Mitrofanov F. N.*, 2014. Velocity Heterogeneities in the Lithosphere of the Fennoscandian (Baltic) Shield. *Doklady AN* 454(2), 221—224 (in Russian).
- Koistinen T., Stephens M. B., Bogatchev V., Nordgu-len O., Wennerström M., Korhonen J.*, 2001. Geological Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2000 000. Geological Surveys of Finland, Norway, Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia.
- Korhonen J. V., Aaro S., All T., Elo S., Haller L. Ä., Kääriäinen J., Kulinich A., Skilbrei J. R., Solheim D., Säävuori H., Vaher R., Zhdanova L., Koistinen T.*, 2002a. Bouguer Anomaly Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2000 000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and Ministry of Natural Resources of Russian Federation.
- Korhonen J. V., Aaro S., All T., Nevanlinna H., Skilbrei J. R., Säävuori H., Vaher R., Zhdanova L., Koistinen T.*, 2002b. Magnetic Anomaly Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2000 000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and Ministry of Natural Resources of Russian Federation.
- Korja A., Heikkinen P. J.*, 2008. Seismic images of Paleoproterozoic microplate boundaries in the Fennoscandian Shield. *The Geological Society of America Special Paper* 440, 229—248.
- Kukkonen I. T., Lahtinen R.*, 2006 Finnish Reflection Experiment FIRE 2001—2005. *Geological Survey of Finland, Special Paper* 43. 247 p.
- Mitrofanov F. P., Sharov N. V., Zagorodny V. G., Glaznev V. N.*, 1998. Crustal Structure of the Baltic Shield Along the Pechenga—Kostomuksha—Lovisa Geotraverse. *Int. Geol. Rev.* 40(11), 990—997.
- Silvennoinen H., Kozlovskaya E.*, 2007. 3D structure and physical properties of the Kuhmo Greenstone Belt (eastern Finland): Constraints from gravity modeling and seismic data and implications for the tectonic setting. *J. Geodyn.* 43, 358—373.
- Yliniemi J., Kozlovskaya E., Hjelt S. E., Komminaho K., Ushakov A. and the SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group*, 2004. Structure of the crust and uppermost mantle beneath southern Finland revealed by analysis of local events registered by the SVEKALAPKO seismic array. *Tectonophysics* 394, 41—67.