

УДК 550.838

МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ И СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В ЗЕМНОЙ КОРЕ ТИМАНО-ПЕЧОРСКОГО И СЕВЕРО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНОВ

© 2013 г. Н. В. Федорова, В. В. Колмогорова

*Институт геофизики УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100
E-mails: nataliavf50@mail.ru, VVKolmogorova@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.10.2012 г.

В работе приведены результаты изучения строения земной коры Тимано-Печорской плиты и Северного Урала геофизическими методами. По профилям ГСЗ построены градиентные скоростные разрезы, проведено моделирование распределения намагниченности. Выявлены особенности строения верхней части литосферы. По результатам исследования сделан вывод, что в этом регионе длинноволновые магнитные аномалии могут быть созданы нижним слоем коры, средняя глубина до которого составляет 20 км, скорость продольных волн на границе слоя достигает 6.5 км/с, а намагниченность оценивается в 3 А/м.

Ключевые слова: глубинное сейсмическое зондирование, градиентная скоростная модель, региональные магнитные аномалии, магнитная модель.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в геофизике при изучении глубинного строения происходит переход от построения двумерных разрезов вдоль профилей к созданию трехмерных моделей крупных регионов. Начальная модель основана на информации о разрезах по региональным сейсмическим профилям и геотраверсам. В пределах Уральских гор и сопредельных территорий выполнен значительный объем глубинных сейсмических исследований по профилям, суммарная протяженность которых превышает 10 тыс. км. Наблюдения были проведены в 1960–2000 гг., использовались различные методики наблюдений, аппаратура и методы интерпретации экспериментальных данных. Разрезы земной коры, построенные по этим данным, отражают разнородную информацию. В ходе выполнения проекта “Создание объемной геолого-геофизической модели верхней части литосферы Уральского региона” для этих профилей заново проведена интерпретация данных ГСЗ, гравитационного и магнитного полей [18]. В результате построения сейсмических моделей вдоль региональных профилей получено градиентное распределение скоростей упругих волн в земной коре. Сейсмические модели в дальнейшем использованы для построения трехмерных гравитационных градиентно-слоистых моделей и затем геолого-геофизических слоисто-блоковых моделей [19]. Основой для такого моделирования служат зависимости, связывающие физические параметры пород земной коры: скорость распростра-

нения сейсмических волн–плотность. Для Уральского региона получена обобщенная кусочно-линейная зависимость для вычисления плотности в земной коре и верхней мантии σ (заданной в единицах г/см³) по скорости продольных волн V (км/с):

$$\sigma(V) = \begin{cases} V - 0.05, & V < 2.35 \\ 0.113 \times V + 2.034, & 2.35 \leq V < 5 \\ 0.20 \times V + 1.6, & 5 \leq V < 7.75 \\ 0.25 \times V + 1.3, & 7.75 \leq V < 8.4 \end{cases}$$

При изучении магнитных свойств пород по приповерхностным образцам однозначная зависимость между скоростью и намагниченностью не выявлена. Хотя хорошо известно, что пределы, в которых изменяются магнитные свойства пород, возрастают при переходе от осадочных пород к кристаллическим, а для кристаллических пород – от кислых к основным и ультраосновным [26]. Наибольшее затруднение при интерпретации магнитных аномалий вызывают протяженные аномалии с поперечниками более 60 км, которые принято называть региональными.

В данной работе делается попытка с помощью двумерного моделирования по сейсмическим и магнитным данным вдоль профилей ГСЗ найти закономерность распределения намагниченности в кристаллической коре Тимано-Печорского и Северо-Уральского региона в пределах трапеции 48–62° в.д. и 60–68° с.ш., которую в дальнейшем можно использовать для трехмерного моделирования глубинного строения.

В тектоническом отношении этот регион охватывает северо-восточную часть Восточно-Европейской платформы (ВЕР), Тимано-Печорскую плиту (ТПП) и прилегающий с востока северный сегмент Уральской складчатой системы (рис. 1). В платформенной части Тимано-Печорской плиты выделяют: Ижма-Печорскую и Хорейверскую впадины, Печоро-Колвинский авлакоген и Варандей-Адзвинскую структурную зону; в области передовых прогибов – Верхнепечорскую, Большесынинскую, Косью-Роговскую, Коротайхинскую впадины, передовые складки западного склона Урала.

Поскольку в регионе расположены важнейшие районы нефте-газодобычи (Ижма-Печорский, Печоро-Колвинский, Ухта-Ижмский, Северо-Предуральский, Хорейвер-Морейюрский), здесь пробурено большое количество глубоких скважин, благодаря чему хорошо изучен осадочный чехол и составлена подробная карта поверхности фундамента. Фундамент сложен верхнепротерозойскими породами. Осадочное выполнение представлено палеозойскими и мезозойскими отложениями с максимальной мощностью от нескольких сотен метров (Тиман) до 6–8 км в платформенных прогибах и до 10–12 км в Предуральском прогибе.

В научной литературе на протяжении не одного десятилетия широко обсуждаются вопросы о том, как изменяются магнитные свойства пород с глубиной, какие слои литосферы могут создавать региональные магнитные аномалии, и какие типы магнитных минералов наиболее распространены в нижней коре и верхней мантии. Одни исследователи придерживаются мнения, что источники магнитных аномалий расположены только в верхнем,

гранитном слое, другие допускают, что в нижнем, базальтовом слое и даже в мантии до глубин более 100 км [17].

Неоднократно делались попытки решить вопрос о роли слоев земной коры в создании региональных магнитных аномалий с помощью сопоставления с разрезами ГСЗ. Использовались в основном двухслойные модели консолидированной земной коры, разделенные на гранитный и базальтовый слои. Выводы далеко не однозначны. Так, для Тимано-Печорской провинции и севера Урала [3] получили, что источники региональных аномалий находятся в верхней части земной коры (выше поверхности базальтового слоя). В работе [6] показано, что влиянием верхних частей земной коры нельзя объяснить региональные аномалии, и отмечено хорошее их соответствие структуре базальтового слоя Сибирской платформы.

В результате изучения связи аномального магнитного поля с сейсмическими границами в ряде работ сделан вывод, что рельеф границ кристаллического фундамента и подошвы коры не отражается в магнитном поле [4, 20, 29].

В работе [36] получена корреляционная зависимость между глубиной до базальтового слоя и региональными магнитными аномалиями восточных районов Восточно-Европейской платформы. З.А. Крутиховская нашла статистическую связь между интенсивностью региональных аномалий и мощностью земной коры Украинского и Балтийского щитов и пришла к выводу, что базальтовый слой обуславливает создание региональных аномалий [12]. Холл, основываясь на сейсмических исследованиях территории Канады, сделал вывод о двуслойной магнитной модели земной коры с увеличени-

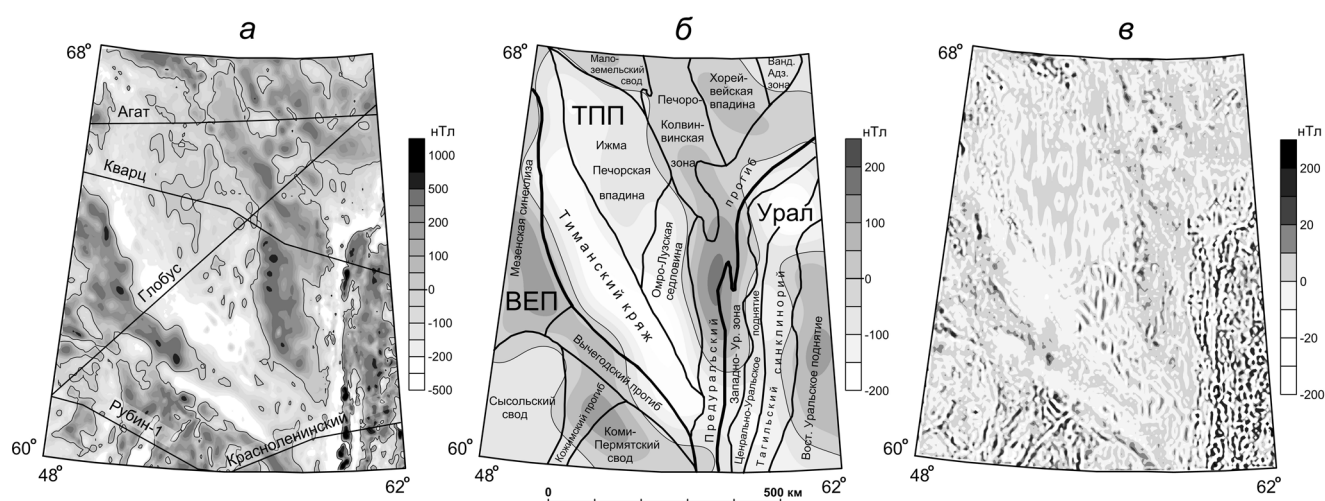


Рис. 1. Карты магнитного поля: аномального (а), региональной составляющей (б), локальных аномалий с поперечными размерами меньше 5 км (в).

Линиями показаны положения геотраверсов ГСЗ (а) и границы основных тектонических структур региона (б).

ем намагниченности в нижней ее части [37]. В работе [16] построены градиентные магнитные модели вдоль геотраверсов, проходящих по территории Европы. Намагниченность в кристаллической коре увеличивалась с глубиной в соответствии с ростом скорости сейсмических волн. В результате моделирования выявлены значительные латеральные неоднородности распределения намагниченности в нижних слоях земной коры.

Петромагнитные исследования внесли ясность в понимание вопроса: до какой глубины могут быть распространены намагниченные породы. Исследования образования оксидных ферромагнитных минералов из магматических расплавов при различных термодинамических условиях показали, что при давлениях свыше 150 МПа наблюдается резкий спад содержания ферромагнитных фаз. Вблизи критического давления кристаллизация титаномагнетита сменяется выделением слобомангитной магнезиально-глиноземистой феррошпинели [15]. Анализ результатов петромагнитных исследований привел авторов [24] к выводу, что нижним ограничением намагниченных пород литосферы может служить глубина 50–60 км.

Прямыми фрагментами вещества земных недр являются ксенолиты горных пород, выносимые на поверхность земли магмами. Изучение магнитных характеристик образцов ксенолитов континентальных глубинных пород показало, что верхняя мантия содержит в основном слабомагнитные минералы и практически не магнитна [25, 27]. Обобщение геологических и петромагнитных данных показало, что возможные носители высокой намагниченности – глубинные породы, образующие низы континентальной коры, – в подавляющем большинстве своем первоначально образовались как поверхностные и близповерхностные магматические породы. Новообразования магнитных минералов происходило главным образом путем переработки первично-магнитных минералов, что приводило к незначительному изменению общей намагниченности глубинного вещества [7].

Авторами коллективной монографии [25] сделаны выводы, что главные носители намагниченности глубинных пород – минералы титаномагнетитового ряда, и прежде всего магнетит, которые имеют различные точки Кюри, ограничивающие глубину распространения магнитоактивного слоя, независимо от природы и времени образования магнитных пород. Верхняя температурная граница составляет 580°C.

Результаты проведенных исследований позволяют ввести ограничение по глубине источников магнитных аномалий. При построении моделей распределения намагниченности можно принять, что нижняя граница магнитоактивного слоя литосферы проходит по границе Мохо или на глубине изотермы 580°C в тех районах, где температура у подошвы земной коры выше температуры Кюри магнетита.

Вследствие неоднозначности решения обратных задач геотермии и достаточно редкой и неравномерной сети данных измерения теплового потока, получены существенно отличающиеся оценки температурных условий в земной коре региона. Так, для района исследований [22] проводят температурную границу 580° на глубинах от 15 км до 35 км. Область с наименьшей глубиной 15 км охватывает южные части Тиманского кряжа и Вычегодский прогиб, в пределах которых аномалия теплового потока достигает 70 мВт/см². В зоне Предуральского прогиба изотерма Кюри магнетита находится на глубине 25 км, под Уралом – 30 км, а на Восточно-Европейской платформе достигает, по данным Моисеенко, глубины 35 км. По результатам моделирования геотермических разрезов вдоль профилей ГСЗ на Урале [33, 34] температура 580° достигается существенно глубже: на ВЕП – 50 км, под Уралом – 70 км. Поскольку профили ГСЗ не пересекают аномалию повышенного теплового потока, мы допускаем, что нижняя граница магнитоактивного слоя литосферы проходит по границе Мохо.

Далее приведем оценки намагниченности слоев земной коры. Осадочные породы обладают довольно низкими значениями намагниченности (меньше 0.1 А/м) и не создают заметных аномалий магнитного поля. Для кристаллических пород щитов украинские исследователи провели изучение магнитных свойств пород довольно большой территории и для представительной коллекции получили сравнительно небольшое значение средней намагниченности верхнего слоя – 0.3 А/м [13].

Петрофизические исследования, проведенные за последние десятилетия в глубоких и сверхглубоких скважинах (вплоть до глубины 11 км), показали, что верхний слой кристаллической коры состоит, в основном, из слабомагнитных пород. Сильномагнитные породы (намагниченность 2–10 А/м) встречались в скважинах в виде тонких пластов 20–300 м [11].

В работах [13, 28] дана оценка намагниченности для нижнего “базальтового” слоя. Авторы исходили из предположения, что нижний слой земной коры платформ содержит в основном базиты и ультрабазиты, поэтому средняя намагниченность может достигать значений от 2 до 4 А/м. Холл оценил намагниченность нижней части коры в 5.3 А/м [37].

В результате моделирования распределения намагниченности в коре Северной Евразии, проведенного по данным измерений магнитного поля на искусственном спутнике Магсат, сделаны выводы, что источниками спутниковых остаточных аномалий могут быть кристаллические породы древних докембрийских платформ, намагниченные по современному полю. Распределение намагниченности близко к однородному, среднее значение составляет 2 А/м [30]. Эта величина практически совпадает с оценками средней намагниченности коры

ВЕР, полученной при моделировании магнитоактивного слоя по аэромагнитным данным вдоль геотраверса Гранит [31], а также с результатами, полученными в работе [8] при построении магнитных моделей земной коры для территории Украины.

КАРТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РЕГИОНА

Для изучения глубинного строения региона были использованы цифровые модели аномально-магнитного и гравитационного полей, созданные на основе картографических данных [23]. Аномальное магнитное поле региона приведено на рис. 1а. Рядом на рис. 1б приведена карта региональной составляющей, которая получена с помощью пересчетов поля вверх на высоту 50 км и затем вниз на нулевой уровень. Эта карта совмещена с тектонической схемой региона.

Большая часть аномального магнитного поля вызвана неоднородностями верхней части консолидированной коры. Для того, чтобы показать насколько значительно различается намагниченность верхней части коры и соответственно интенсивность локальных аномалий для различных тектонических структур, мы выделили наиболее коротковолновую часть магнитного поля с помощью трансформаций для высоты пересчета 5 км. На рис. 1в приведена карта локальных аномалий с поперечными размерами меньше 5 км. Поскольку в пределах Тимано-Печорской плиты аномалии имеют небольшую интенсивность (20–30 нТл) по сравнению с аномалиями (100–200 нТл) в пределах ВЕР и Урала, то для этой карты задана нелинейная шкала раскраски. С помощью коротковолновых аномалий выделяют разломы в земной коре и находят интрузии, содержащие магматические породы. В геофизической практике на закрытых территориях локальные аномалии магнитного поля успешно используются для определения глубины залегания кристаллического фундамента [1]. Из рис. 1б и 1а видно, что распределение локальных аномалий магнитного поля лучше всего соответствует границам тектонических структур.

Интенсивность регионального магнитного поля (рис. 1б) в несколько раз ниже аномального поля (рис. 1а) и не превышает 250 нТл. В региональном поле над краем Восточно-Европейской платформы расположены положительные аномалии, а над Сысольским сводом – отрицательная. Над Тиманским кряжем и Ижма-Печорской впадиной, включая Омро-Лузскую седловину (максимальная глубина фундамента 3.6 км), наблюдается протяженная отрицательная аномалия. В южной части площади на широте 61° эта аномалия сливается с другой отрицательной аномалией, простирающейся с юга на север над Центрально-Уральским поднятием и Тагильским синклиниорием. Как известно, в этих структурах на поверхности обнажаются кристалли-

ческие породы, многие из которых сильно намагничены и создают интенсивные положительные аномалии. Коротковолновая часть аномалий магнитного поля отчетливо выделяется на карте региона (рис. 1в).

Над северо-восточной частью территории ТПП региональное поле положительное. В тектоническом плане здесь чередуются валы и впадины: Печоро-Колвинский мегавал, Денисовская впадина, Колвинский мегавал, Хорейвейская впадина и др. Положительная аномалия простирается на юг над структурами Предуральского краевого прогиба и частично охватывает Западно-Уральскую зону. Эту аномалию в геофизической литературе часто называют Илычская (по названию реки Илыч), и в региональном поле она имеет максимальную интенсивность более 200 нТл. Именно в этих зонах кристаллический фундамент резко погружается с 3–4 км до 10–11 км. По-видимому, источники Илычевской аномалии расположены значительно глубже кровли фундамента.

Сопоставление распределения положительных и отрицательных региональных магнитных аномалий над тектоническими структурами и картой поверхности фундамента приводит нас к выводу, что породы верхней части фундамента, скорее всего, имеют низкие значения средней намагниченности, особенно в пределах ТПП, и верхний слой кристаллической коры не вносит заметного вклада в длинноволновые магнитные аномалии.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Для сейсмических профилей, проходящих по изучаемой территории: Агат-2, Кварц, Красноленинский, – в едином модельном представлении заново проведена интерпретация данных ГСЗ [18, 32]. Результаты исследований по этим геотраверсам, полученные раньше, опубликованы в работах [9, 10]. По данным наблюдений, на основе метода решения обратной кинематической задачи по двумерным полям времен рефрагированных волн [21], рассчитаны градиентные скоростные модели земной коры. Для каждого профиля построены двумерные поля времен первых вступлений продольных волн, которые рассматриваются как рефрагированные.

Алгоритм решения обратной задачи реализован в программе “Invers”. В результате вычислений получены массивы значений скорости продольных волн V_p , на основе которых построены модели градиентных скоростных разрезов. Положение границы Мохо на разрезах определялось по скоростным уровням 7.75–8.25 км/с и уточнялось при сопоставлении с результатами интерпретации имеющихся данных по отраженным, обменным и преломленным волнам.

Оценки погрешностей построения скоростных разрезов проводились по результатам сопоставления с моделями разрезов, построенными другими мето-

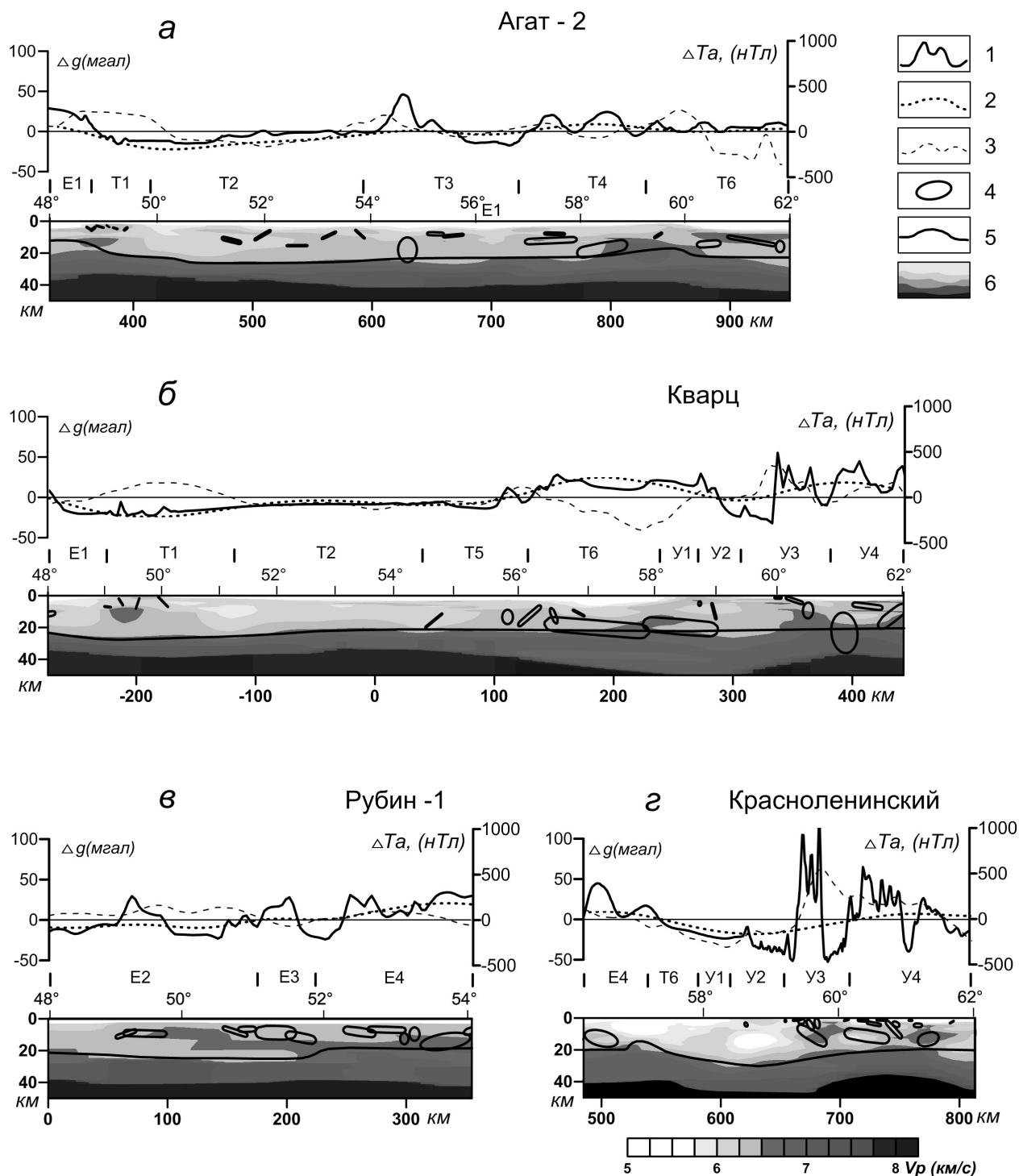


Рис. 2. Модели распределения скорости продольных волн и намагниченности в земной коре по фрагментам геотраверсов Агат-2 (а), Кварц (б), Рубин-1 (в), Красноленинский (г).

1 – график аномального магнитного поля; 2 – график региональных аномалий; 3 – график аномального гравитационного поля; 4 – контуры источников магнитной модели в верхнем слое земной коры; 5 – модельная граница для скачка намагниченности 3 А/м; 6 – градиентная модель скорости V_p ; шкала раскраски приведена под рисунком (г).

Тектонические структуры обозначены в пределах Восточно-Европейской платформы: E1 – Мезенская синеклиза, E2 – Сысольский свод, E3 – Кожимский прогиб, E4 – Коми-Пермяцкий свод, E5 – Вычегодский прогиб; в пределах Тимано-Печорской плиты: T1 – Тиманский кряж, T2 – Ижма-Печорская впадина, T3 – Печоро-Колвинская зона, T4 – Хорейвская впадина, T5 – Отра-Лузская седловина, T6 – Предуральский прогиб; в пределах Уральской складчатой системы: Y1 – Западно-Уральская зона складчатости, Y2 – Центральное-Уральское поднятие, Y3 – Тагильский синклиниорий, Y4 – Восточно-Уральское поднятие.

дами, а также при сравнении результатов моделирования в местах пересечения профилей. Сопоставление показало, что погрешность в определении скоростей соответствует 0.15–0.20 км/с, то есть 2–3%, а погрешность в определении глубин – около 5% [32].

Скоростной разрез земной коры по фрагменту геотраверса Рубин-1 составлен на основе сейсмического разреза [5]. В целях однотипного представления данных слоисто-блоковая авторская модель перестроена нами в скоростную модель в виде изолиний скорости продольных волн.

Модели скоростных разрезов по фрагментам геотраверсов Агат-2, Кварц, Рубин-1, Красноленинский приведены на рис. 2. Над разрезами показаны графики аномального магнитного поля, его региональной составляющей, выделенной с помощью фильтрации для всей площади, а также графики гравитационного поля Δg в редукции Буге.

Сравнительный анализ скоростных разрезов земной коры позволил выявить некоторые характерные особенности упругой модели исследуемой площади. Так, Ижма-Печорской впадине, которую пересекают два геотраверса – Агат и Кварц, соответствуют самые низкоскоростные блоки земной коры с пониженными скоростями (5.8–6.0 км/с) в верхней части фундамента и погружением скоростного уровня 6.5 км/с глубже 20 км. Данной структуре соответствуют отрицательные аномалии магнитного и гравитационного полей. Граница Мохо в пределах впадины залегает на глубине 35–38 км.

Низкоскоростной блок земной коры, соответствующий Ижма-Печорской впадине, контрастно выделяется на фоне граничащих с ним структур: Тиманского кряжа на западе и особенно – Печоро-Колвинской впадины (профиль Агат), а также Омро-Лузской седловины и Предуральского прогиба (профиль Кварц) на востоке. В этих блоках скорость продольных волн в верхней части фундамента 6.10–6.25 км/с, а скоростной уровень 6.5 км/с поднимается местами до 10–12 км. Толщина земной коры в Печоро-Колвинской и Хорейверской впадинах 40–42 и 39–40 км, соответственно.

В пределах Предуральского прогиба, на профилях Агат (захватывает только самую западную часть прогиба) и Кварц, наблюдается утолщение земной коры. Граница Мохо погружается с 40 до 47 км в восточном борту прогиба и до 50 км под Уральским хребтом. Всем этим высокоскоростным структурам соответствуют положительные аномалии магнитного поля. Характер гравитационных аномалий здесь сложнее. Печоро-Колвинской и Хорейверской впадинам соответствуют положительные аномалии Δg , а высокоскоростной и при этом значительно утолщенной земной коре Предуральского прогиба на разрезе по профилю Кварц – отрицательная гравитационная аномалия.

Погружение границы Мохо до 50 км наблюдается и на Красноленинском профиле, который прохо-

дит в юго-восточной части площади, в зоне сочленения ВЕП, Тимана и Урала, но начинается оно не в Предуральском прогибе, как на профиле Кварц, а в пределах Западно-Уральской зоны и достигает максимальных глубин в Центрально-Уральском поднятии. В отличие от разреза для геотраверса Кварц, на Красноленинском профиле утолщенная кора под Западным Уралом – низкоскоростная, с волноводами, скорость в которых понижается от 5.8–6.0 км/с на поверхности фундамента до 5.5 км/с – в низах верхней коры. Скоростной уровень 6.5 км/с погружен до 25–27 км [32]. Этому низкоскоростному блоку утолщенной земной коры соответствуют отрицательные аномалии магнитного и гравитационного полей.

Следует отметить, что прогибы границы Мохо в скоростных моделях земной коры под Уралом как по профилю Кварц, так и по Красноленинскому профилю имеют асимметричный характер с пологими западными склонами и крутыми восточными. Плавное погружение под Урал высокоскоростных уровней в низах коры начинается от западного борта Предуральского прогиба на профиле Кварц и от восточного – на Красноленинском профиле, а заканчивается крутым подъемом с амплитудой больше 10 км в осевой части Тагильского прогиба. В верхней и средней частях земной коры такие резкие подъемы скоростных уровней с явными элементами надвигов наблюдаются ближе к западному борту Тагильского прогиба.

Фрагмент профиля Рубин-1 расположен в пределах северо-восточной части ВЕП. Разрез отличается высокоскоростной корой, без явно выраженных контрастных блоков. Самый высокоскоростной блок в разрезе выявлен в восточной части профиля, соответствующей Коми-Пермяцкому своду.

При сопоставлении графиков регионального магнитного поля с сейсмическими разрезами можно отметить следующую особенность: отрицательные аномалии наблюдаются над участками, где на разрезах погружаются скоростные уровни 6.5 км/с и больше. Такие участки часто совпадают с сокращением толщины нижнего высокоскоростного (6.5–7.0 км/с) слоя коры. Рельеф границы Мохо не отражается в региональном поле. Над участками с повышенной мощностью коры до 43–50 км на геотраверсах Агат-2 (пикеты 600–700 и 900–950) и Кварц (пикеты 200–300) интенсивность региональных аномалий небольшая, близка к нулю, а на Красноленинском профиле участок прогиба границы коры (пикеты 600–670) соответствует эпицентральной зоне отрицательной аномалии.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ

При моделировании магнитных разрезов использован метод А. В. Цирульского [35]. Аномаль-

ное магнитное поле ΔT_a в автоматизированном режиме аппроксимируют полем набора модельных источников. В двухмерном варианте метода модельный источник – двумерная пластина с произвольной линейной намагниченностью. Разделение источников на региональные и локальные происходит на этапе аппроксимации аномального магнитного поля. Для ограниченных по простиранию намагниченных объектов использование модельных пластин позволяет определять интегральные характеристики: магнитный момент, центр и направление падения источника. Принимая во внимание принципиальную неоднозначность решения обратных задач магнитометрии, интерпретатор для каждого сингулярного источника может быстро рассчитать контуры ограниченных объектов для разных значений намагниченности и построить варианты моделей распределения намагниченности в земной коре.

При региональных исследованиях удобство применения данного класса состоит в том, что аномальные объекты можно рассчитывать для класса границ раздела горизонтально слоистых сред, которые лучше соответствуют сейсмическим моделям. Это позволяет строить модели в пределах земной коры даже в тех случаях, когда сингулярный источник (или его часть) расположены ниже границы Мохо. Кроме того, при интерпретации отрицательных аномалий можно построить модели с направлением вектора намагниченности по современному полю без привлечения источников с обратной намагниченностью.

При решении обратной задачи магнитометрии для границ раздела центр аномальных масс однозначно не определяется, и для вычисления контура границы требуется задавать скачок намагниченности между слоями и глубину до границы слоя. Интерпретатору предоставляется возможность быстро рассмотреть эквивалентные варианты для набора значений глубин и намагниченностей и выбрать наиболее вероятный окончательный вариант разреза на основании имеющейся по данному району априорной информации. В качестве такой априорной информации мы использовали сейсмические градиентные скоростные модели.

В результате аппроксимации аномалий магнитного поля ΔT_a для сейсмических профилей найдено распределение сингулярных источников. Источники можно разделить на локальные, расположенные в верхних 10–20 км коры, и протяженные региональные, расположенные ниже 20 км. Результаты аппроксимации были сопоставлены с картой глубин фундамента, все источники располагаются ниже подошвы осадочного чехла.

Для источников, расположенных в верхней части разреза, геометрия эквивалентных объемных контуров аномальных тел рассчитана для намагниченности 1, 2 и 3 А/м. В Уральских структурах

источники большей части магнитных аномалий располагаются преимущественно в верхней части разреза и связаны с породами основного и ультраосновного состава. Выходы этих пород на дневную поверхность позволяют идентифицировать ряд источников с зонами разломов, массивами и интрузиями, а по результатам моделирования оценить их форму и расположение на глубине. На разрезах приведены контуры для намагниченности 3 А/м (рис. 2). Мы не будем подробно описывать верхние источники, поскольку цель этой статьи – поиск общих закономерностей распределения намагниченности в земной коре. Отметим только, что распределение источников в Уральских структурах, восточное падение многих из них на профилях Кварц и Красноленинский убедительно свидетельствуют о тектоническом надвиге уралид на структуры ВЕП и ТПП.

В фундаменте Тиманского кряжа выделено несколько сравнительно небольших и маломощных магнитных источников. Поэтому в западных частях разрезов для геотраверсов Агат-2 и Кварц приведены контуры для намагниченности 1 А/м.

При моделировании источников региональных аномалий использована модель слоистой среды и рассчитаны эквивалентные границы с намагниченностями от 1 до 4 А/м и для глубин от 0 до 30 км. Результаты построений сопоставлялись со скоростными разрезами. Выбор окончательного варианта проводился по наилучшему совпадению магнитной и скоростной границ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При сопоставлении магнитных источников со скоростными разрезами наблюдаются следующие закономерности: 1) все сингулярные источники расположены ниже границы осадочного чехла; 2) большинство источников расположено в зонах, где скорость продольных волн превышает 6.2 км/с; 3) в верхнем слое коры блоки с аномально высокими скоростями (более 6.5 км/с) часто содержат магнитные источники; 4) границы раздела, соответствующие региональным источникам и вычисленные для намагниченности 3 А/м и глубины до горизонтальной асимптоты 20 км, лучше всего совпадают с положениями скоростного уровня 6.5 км/с на сейсмических разрезах. Контуры этих границ, наложенные на градиентные сейсмические разрезы, показаны на рис. 2.

В результате моделирования построена двухслойная модель, в которой верхний слой практически немагнитный, а нижний имеет намагниченность 3 А/м. В пределах верхнего слоя выделены локальные намагниченные источники. С помощью зависимости, приведенной в начале работы и связывающей плотность и скорость продольных волн в земной коре, можно оценить, что на грани-

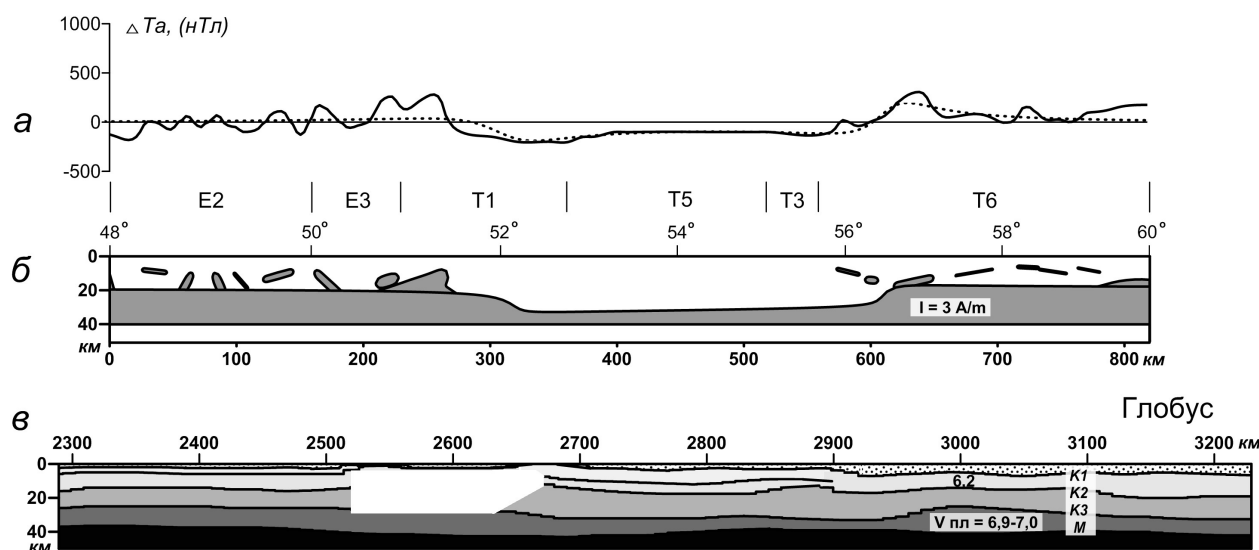


Рис. 3. Фрагмент геотраверса Глобус.

а – графики аномального магнитного поля и поля от регионального источника, б – магнитный разрез, в – сейсмический разрез [2] (в). Тектонические структуры обозначены, как на рис. 2.

це верхнего и нижнего слоя плотность достигает значения 2.9 г/см^3 .

Для геотраверса Глобус (Черное море – Воркута) нам не удалось построить градиентную скоростную модель, так как мы не располагали географами для этого профиля. Однако, поскольку этот профиль проходит практически вкострест простирающихся региональных магнитных аномалий, как отрицательной, так и обрамляющих ее положительных (как известно, при таком сечении снижаются погрешности моделирования с помощью двумерных методов), магнитная модель была построена. Для регионального источника, расположенного в нижней коре и создающего отрицательную аномалию (рис. 3а), использовали при расчете границы такие же параметры, какие выбрали на других профилях: скачок намагниченности 3 A/m и глубина до асимптоты 20 км (рис. 3б).

Результаты сравнили с сейсмическим разрезом, приведенным в работе [2]. Авторы использовали трехслойную модель консолидированной коры. На разрезе (рис. 3в) показаны границы $K1$, $K2$, $K3$ – гранитного, промежуточного, базальтового слоев и M – (Мохо), построенные по преломленным и обменным волнам. Под западной и центральной частями Тиманского кряжа границы $K2$ и $K3$ не прослежены. Скорость сейсмических волн на границах не постоянная. Наиболее низкое значение 6.0 км/с на границе $K1$ наблюдаются под Ижма-Печорской впадиной. Значение пластовой скорости в нижнем слое коры – $V_{пл} = 6.9-7.0$. Для промежуточного слоя скорость оценивается в $6.3-6.4 \text{ км/с}$ [14].

Мощность земной коры варьирует вдоль профиля незначительно: от 37 км под Сысольским сводом ВЕП до 42 км под Тиманским кряжем и $40-41 \text{ км}$

под остальной частью ТПП. Граница $K2$ проходит практически горизонтально, на глубине 15 км , наблюдаются лишь небольшие подъемы до $11-12 \text{ км}$ и прогиб до $18-20 \text{ км}$. Граница $K3$ в нижней коре на восточной окраине Восточно-Европейской платформы проходит горизонтально на глубине $25-26 \text{ км}$. Под восточной частью Тиманского кряжа (пикеты $2640-2700$) происходит ее резкое погружение до 32 км , под Ижма-Печорской впадиной глубина колеблется от 32 до 34 км , а затем, восточнее Печорской гряды (пикеты $2950-2970$), наблюдается резкий подъем до 25 км .

Следовательно, региональной отрицательной магнитной аномалии на сейсмическом разрезе соответствует погружение границы $K3$ и значительное сокращение нижнего высокоскоростного слоя коры. Протяженность и перепад глубин погружения границы $K3$ неплохо соответствуют на магнитном разрезе рельефу модельной границы, отделяющей верхний слабомагнитный слой от нижнего, намагниченность которого составляет 3 A/m (рис. 3б и в).

На скоростной колонке, приведенной в статье [2] по данным А.В. Егоркина, показано, что резкий рост скорости продольных волн от 6.2 до 6.5 км/с происходит на глубине 20 км . Такое же значение средней глубины скоростного уровня 6.5 км/с получено нами для фрагментов других профилей (Агат-2, Кварц, Рубин-1 и Краснотенинский).

По сейсмическим данным наиболее глубокое положение ($6-8 \text{ км}$) верхней границы фундамента $K1$ наблюдается в восточной части профиля. Причем в районе пикета 2900 происходит резкое погружение фундамента. Над этой зоной наблюдается небольшая локальная аномалия. На магнитном разрезе этой аномалии соответствует источник восточно-

го падения, который, по-видимому, трассирует глубинный разлом. Однако погружение фундамента не создает заметного изменения в уровне магнитного поля, что еще раз подтверждает вывод о низкой величине средней намагниченности пород верхнего слоя консолидированной коры.

Таким образом, мы приходим к выводу, что выявленное нами совпадение модельных магнитных границ и границ скоростных уровней 6.5 км/с – не случайное, а с большой долей вероятности отражает реальное распределение физических свойств в земной коре, поскольку наблюдается на всех сейсмических профилях, расположенных в этом регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пределах трапеции 48–62° в.д. и 60–68° с.ш., включающей северо-восточную часть Восточно-Европейской платформы, Тимано-Печорский и Северо-Уральский регионы, по данным ГСЗ построены градиентные модели распределения скоростей продольных волн и выполнены количественные расчеты распределения намагниченности в разрезе земной коры для фрагментов геотравверсов: Агат-2, Кварц, Рубин-1, Красноленинский, Глобус. При построении моделей использовались компьютерные технологии, основанные на алгоритмах решения обратных двумерных задач.

Сопоставление разрезов глубинного строения, полученных независимыми методами по отдельным геофизическим полям, позволило нам разделить консолидированную земную кору по магнитным свойствам на два слоя. Верхний слой кристаллической земной коры не вносит заметного вклада в региональное магнитное поле и характеризуется низкой средней намагниченностью, по литературным источникам, ее величина менее 0.3 А/м. В пределах этого слоя выделены локальные намагниченные источники. Нижний слой коры намагничен значительно сильнее. По результатам двумерного моделирования значение намагниченности этого слоя коры достигает 3 А/м, а средняя глубина составляет 20 км. Верхняя граница этого слоя достаточно хорошо совпадает с положениями скоростного уровня 6.5 км/с на соответствующих сейсмических разрезах.

Проведенные исследования отражают первую стадию построения объемной магнитной модели региона. Полученные параметры можно использовать в качестве начального приближения для трехмерной интерпретации. В дальнейшем при численном моделировании значение намагниченности будет уточняться. Можно ожидать, что интерпретация аномалий регионального магнитного поля позволит получить не только рельеф намагниченного слоя, но и пространственное представление о рельефе границы нижнего высокоскоростного и более плотного слоя земной коры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусев А.А.* Изучение рельефа поверхности кристаллического фундамента по данным магниторазведки // *Геофизика*. 2003. № 4. С. 37–40.
2. *Беляевский Н.А., Вольвовский Б.С., Вольвовский И.С. и др.* Строение земной коры и верхней мантии по профилю ГСЗ Воронежский массив–Полярный Урал // *Строение земной коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы*. Киев: Наукова думка, 1978. С. 154–156.
3. *Берлянд Н.Г., Цирель В.С.* Распределение аномалий Тимано-Печорской провинции и Севера Урала по статистическим свойствам, геологической природе и глубинности источников // *Аномалии магнитного поля и глубинное строение земной коры*. Киев: Наукова думка, 1982. С. 63–64.
4. *Борисов А.А., Круглякова Г.И.* Региональные и зональные аномалии геомагнитного поля Европейской части СССР // *Советская геология*. 1967. № 1. С. 127–130.
5. *Булин Н.К., Егоркин А.В.* Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. М.: Центр ГЕОН, 2000. 194 с.
6. *Булмасов А.П.* О связи региональных магнитных аномалий Сибирской платформы с базальтовым слоем земной коры // *Геология и геофизика*, 1962. № 7. С. 32–45.
7. *Геншафт Ю.С., Печерский Д.М., Шаронова З.В. и др.* Магнитопетрологическое изучение условий формирования недр континентальной земной коры // *Физика Земли*. 1995. № 3. С. 26–45.
8. *Гордиенко В.В.* Магнитная модель земной коры территории Украины. Киев: Знание, 2000. 91 с.
9. *Дружинин В.С., Автонеев С.В., Шарманова Л.Н., Турыгин Л.В.* Глубинное строение Северного Урала по Красноленинскому профилю ГСЗ // *Советская геология*. 1990. № 9. С. 79–82.
10. *Егоркин А.В.* Строение земной коры по сейсмическим геотравверсам // *Глубинное строение территории СССР*. М.: Наука, 1991. С. 118–135.
11. *Иголкина Г.В.* Скважинная магнитометрия при исследовании сверхглубоких и глубоких скважин. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 215 с.
12. *Крутиховская З.А.* Проблема создания земной коры древних щитов // *Геофизический сборник*. 1976. № 73. С. 3–29.
13. *Крутиховская З.А., Пашкевич И.К.* Намагниченность земной коры древних щитов и региональные магнитные аномалии // *Магнитные аномалии земных глубин*. Киев: Наукова думка, 1976. С. 108–125.
14. *Литосфера Центральной и Восточной Европы: Восточно-Европейская платформа*. Киев: Наукова думка, 1989. 188 с.
15. *Льков А.В., Печерский Д.М.* Экспериментальные исследования связи магнитных свойств базальтов с условиями их образования // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1977. № 4. С. 65–73.
16. *Магнитная модель литосферы Европы*. Киев: Наукова думка, 1990. 168 с.
17. *Магнитные аномалии земных глубин*. Киев: Наукова думка, 1976. 232 с.

18. Мартышко П.С., Дружинин В.С., Начапкин Н.И. и др. Методика и результаты создания объемной геолого-геофизической модели верхней части литосферы северного и среднего сегментов Уральского региона // Динамика физических полей Земли. М: ИФЗ РАН, 2011. С. 9–30.
19. Мартышко П.С., Ладовский И.В., Колмогорова В.В. и др. Применение сеточных функций в задачах трехмерного плотностного моделирования // Уральский геофизический вестник. 2012. № 1. С. 30–34.
20. Матушкин Б.А. Результаты аэромагнитных исследований по профилям ГСЗ // Советская геология. 1967. № 1. С. 131–135.
21. Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф., Крылов С.В. Использование линеаризованной постановки обратной кинематической задачи для двумерных полей времен $t(x, l)$ рефрагированных волн // Численные методы в сейсмических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1983. С. 140–152.
22. Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. Л: Недра, 1986. 180 с.
23. Овчаренко Ф.И. Компьютерная база геополей Урала – информационная основа нового этапа исследований региона // Глубинное строение и развитие Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. С. 136–146.
24. Петрова Г.И., Печерский Д.М., Лыков А.В. Магнитные минералы и магнитные аномалии // Магнитные аномалии земных глубин. Киев: Наукова думка, 1976. С. 55–64.
25. Петромагнитная модель литосферы. Киев: Наукова думка, 1994. 175 с.
26. Петрофизика. Справочник. Т. 1. Горные породы и полезные ископаемые. М.: Недра, 1992. 391 с.
27. Печерский Д.М. О петромагнетизме низов континентальной земной коры // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 9. С. 66–78.
28. Пискарев А.Л. Источники магнитных аномалий в земной коре Сибирской платформы // Геофизический сборник. 1976. № 73. С. 66–73.
29. Симоненко Т.Н. О привлечении данных магнитометрии к выяснению глубинного строения земной коры // Советская геология. 1962. № 8. С. 4–15.
30. Федорова Н.В. Источники спутниковых аномалий над Северной Евразией // Физика Земли. 1997. № 8. С. 613–618.
31. Федорова Н.В. Модели намагниченности земной коры по геотраверсу Гранит // Уральский геофизический вестник. 2001. № 2. С. 88–93.
32. Федорова Н.В., Колмогорова В.В., Ладовский И.В. Геофизические модели строения земной коры по Краснотеннинскому профилю // Уральский геофизический вестник. 2010. № 1. С. 59–68.
33. Хачай Ю.В., Дружинин В.С. Геотермический разрез литосферы Урала вдоль широтных профилей ГСЗ // Физика Земли. 1998. № 1. С. 67–70.
34. Хачай Ю.В., Щанов В.А. Геотермические исследования // Геотраверс Гранит: Восточно-Европейская платформа–Урал–Западная Сибирь. Екатеринбург: ГУПР МПР, 2002. С. 215–224.
35. Цирульский А.В., Никонова Ф.И., Федорова Н.В. Метод интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с построением эквивалентных семейств решений. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. 135 с.
36. Ярош А.Я., Дементьева Г.Д., Кассин Г.Г. Строение поверхностей переходного и базальтового слоев земной коры восточных районов Русской платформы // Тр. СГИ. 1968. № 54. С. 5–20.
37. Holl D.H. Long-wavelength aeromagnetic anomalies and deep crustal magnetization in Manitoba and Northwestern Ontario // Canad. J. Geoph., 1974. V. 40. P. 403–430.

Рецензент В.О. Михайлов

Models of distribution of the magnetization and the longitudinal wave velocity of the Earth's crust in Timan-Pechora and Northern Ural regions

N. V. Fedorova, V. V. Kolmogorova

Institute of Geophysics, Urals Branch of RAS

This report shows the results gained from the study of the structure of the Earth crust in Timan-Pechora Plate and Northern Ural, by geophysical methods. Based on the DSS, profiles of the gradient seismic velocity cross-sections are built and modeling of the distribution of the magnetization is carried out. Features of the structure of the top part of lithosphere are revealed. The study concluded that in this region the long wavelength magnetic anomalies could be created by the bottom layer of the crust, the average depth of which is 20 km, the velocity of longitudinal waves reaches up to 6.5 km/s, and the magnetization is estimated as 3 A/m.

Key words: *deep seismic sounding, gradient velocity model, regional magnetic anomalies, magnetic modeling.*