

УДК 550.389+550.382

## АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

© 2021 г. Ю. А. Копытенко<sup>1</sup>, А. А. Петрова<sup>1</sup>. \*, И. С. Гурьев<sup>2</sup>, П. В. Лабеецкий<sup>2</sup>, О. В. Латышева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

\*aa\_petrova@inbox.ru

Поступила в редакцию 08.11.2019 г.

После доработки 10.02.2020 г.

Принята к публикации 05.03.2020 г.

В статье представлены результаты исследования информативности аномалий модуля и компонент магнитного поля Земли в околоземном космическом пространстве в интервале высот от 300 до 800 км. Магнитные аномалии вычислены по трехмерной компонентной модели магнитного поля Земли СПбФ ИЗМИРАН. Для сопоставления с эмпирическими данными, полученными космическими аппаратами *СНАМР* и *Swarm*, произведены расчеты магнитных аномалий и их градиентов по компонентной модели для высот 400 и 450 км. С целью выявления особенностей строения литосферы магнитоактивных зон, наблюдаемых в околоземном пространстве, построены глубинные разрезы по магнитным аномалиям, аномалиям силы тяжести и сейсмологическим данным. Результаты исследования магнитных аномалий околоземного пространства имеют научное, практическое и прикладное значение для решения поисковых геолого-геофизических задач и вопросов навигации космических аппаратов.

DOI: 10.31857/S0023420621030067

### ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования являются магнитные аномалии литосферы, наблюдаемые КА миссии *СНАМР* и *Swarm*, и магнитные аномалии, вычисленные на высотах околоземного пространства по трехмерной компонентной модели [1–3].

Компонентная модель магнитного поля Земли (МПЗ) построена по материалам векторных съемок и расчетных значений, вычисленных по модульным измерениям МПЗ вблизи ее поверхности. Оценки погрешности компонентной модели получены в результате сопоставления значений, вычисленных по модели, с векторными данными аэромагнитных съемок Скандинавии, геомагнитных обсерваторий Мировой сети и измерений на КА *СНАМР* [2].

Цель работы – изучение информативности магнитных аномалий литосферы в околоземном пространстве и степени их изменения с высотой в интервале от 300 до 800 км. На основе интерпретации аномалий МПЗ [1–4, 7], силы тяжести [8] и сейсмологических данных (<http://www.isc.ac.uk>) проведен анализ глубинного строения литосферы магнитоактивных зон, выявленных КА в околоземном пространстве. В результате анализа построены глубинные разрезы по магнитным аномалиям, ано-

малиям силы тяжести и сейсмологическим данным. В процессе исследования магнитных, плотностных и скоростных свойств магнитных зон литосферы определены местоположение, намагниченность, толщина и плотностные свойства слоев литосферы, создающих магнитоактивные зоны. Исследование показало, что наиболее часто такие зоны тяготеют к древнейшим устойчивым областям континентальной земной коры. Очаги землетрясений подчеркивают контактные границы литосферных неоднородностей, фиксируя на глубинных разрезах направление перемещения блоков, оси сжатия и растяжения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная задача настоящего исследования – оценка информативности МПЗ околоземного космического пространства на основе изучения свойств аномалий модуля и компонент магнитного поля. Измерения МПЗ, проведенные на КА миссии *СНАМР* и *Swarm*, дают возможность сравнить аномалии, вычисленные по трехмерной компонентной модели, с экспериментальными данными, зарегистрированными КА соответственно на высотах 400 и 450 км.

Сопоставление аномалий модуля и вертикальной компоненты, наблюдаемых КА миссии *CHAMP*, со значениями, рассчитанными для высоты 400 км по компонентной модели, показало хорошее согласие конфигурации и интенсивности аномалий земного шара [9–14]. На высоте 400 км среднеарифметическое значение расхождений аномалий модуля МПЗ по данным КА и модели составило 1.50 нТл, доверительный интервал  $\pm 0.05$  нТл, среднеквадратическое отклонение  $\pm 6.8$  нТл. Амплитуда аномалий модуля вектора МПЗ на этой высоте изменяется в диапазоне  $\pm 20$  нТл [2]. В качестве уровня относимости для аномалий элементов МПЗ в компонентной модели использован глобальный уровень – главное магнитное поле модели IGRF [14, 15].

В настоящее время три КА системы Swarm (КА *Alpha*, *Charlie*, *Bravo*) работают по круговым околоземным орбитам на высотах 450 и 530 км. Проектом предусмотрено постепенное снижение КА на более низкую околоземную орбиту – до высоты 300 км [12–14]. В качестве аппаратуры для изучения МПЗ используется магнитометр, измеряющий вектор напряженности магнитного поля, и магнитометр, измеряющий абсолютные значения скаляра напряженности магнитного поля.

Результаты измерений МПЗ КА *Swarm* опубликованы для полярных областей Земли. Для сопоставления со значениями, наблюдаемыми КА *Swarm*, по трехмерной компонентной модели были проведены вычисления аномалий модуля ( $F$ ) и вертикальной ( $Z$ ) компоненты, а также горизонтальной ( $H$ ) компоненты МПЗ, их вертикальных и горизонтальных градиентов на высотах 300, 450 и 530 км. Расчеты выполнены в полярной стереографической равноугольной проекции.

В настоящее время значительное внимание уделяется исследованию распределения аномалий элементов МПЗ на разных уровнях высот для всего земного шара [2, 4, 7, 16–22, 24]. Первостепенное значение придается информативности аномалий компонент на приоритетных высотах околоземных орбит КА. *Международная космическая станция* находится на высоте около 400 км. Космические аппараты системы *Swarm* работают в диапазоне высот 450–530 км над поверхностью Земли. Для КА, требующих стабильного электропитания, используются солнечно-синхронные орбиты с высотой около 800 км и приполярным наклонением. Определение приоритетных информативных коридоров рабочих высот имеет принципиальное значение для аэрокосмической навигации, использующей на КА трехкомпонентные магнитометры.

С целью оценки изменений интенсивности аномалий модуля,  $Z$ - и  $H$ -компонент МПЗ с высотой проведены расчеты полей для земного шара от уровня океана до высот 300, 400, 450 и 530 км.

Это дало возможность осуществить верификацию компонентной модели по независимым наблюдаемым измерениям на КА миссии *CHAMP* и *Swarm*.

## ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

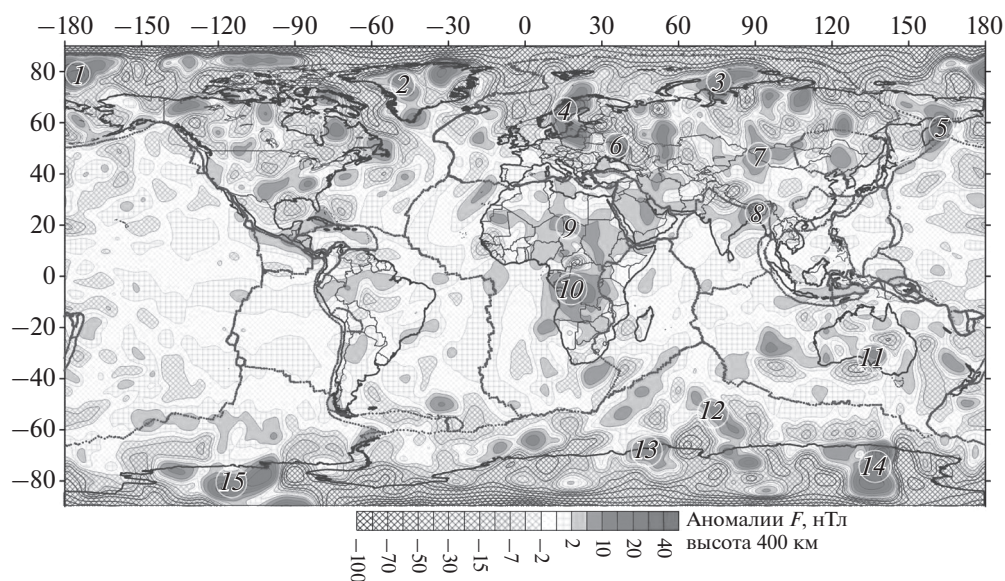
Для оценки эффективности и информативности геомагнитного поля в околоземном пространстве при решении вопросов космической навигации и геолого-геофизических задач наиболее существенное значение имеют спектральные характеристики и интенсивность аномалий модуля ( $F$ ), вертикальной ( $Z$ ), горизонтальной ( $H$ ), северной ( $X$ ) и восточной ( $Y$ ) компонент МПЗ, а также значения их градиентов. Амплитуда компонент магнитных аномалий, измеряемых КА внутри приоритетных коридоров, должна превышать уровень погрешности измерений более чем в два раза.

В некоторых случаях при решении геолого-геофизических задач и навигации КА наблюдаются малые значения вышеуказанных градиентов, измеряемых магнитометрических функций, что дает представление о низком уровне информативности параметров МПЗ. Кроме того, это обстоятельство указывает на сложность использования статистических методов оценивания для навигационного обеспечения заданной точности движения КА. [5, 6].

Одним из основных факторов, положительно влияющих на эффективность решения рассматриваемых в статье задач, является создание высокоточных бортовых магнитометров. В условиях космического пространства нашли широкое применение следующие типы магнитометров: феррозондовые, квантовые и сверхпроводящие (СКВИД). Данные магнитометры обладают довольно высокой точностью, которая характеризуется погрешностями, лежащими в диапазоне от  $10^{-1}$  до  $10^{-5}$  нТл. Такая точность бортовых магнитометрических средств позволяет решить задачу навигационного обеспечения в рассматриваемом высотном диапазоне с ошибками определения ориентации КА менее одной угловой минуты, а координат – несколько десятков метров [4, 6].

КА *CHAMP* измерили аномалии  $F$ - и  $Z$ -компоненты МПЗ в околоземном пространстве на высоте 400 км. На основе этих данных построены карты аномалий  $F$ - и  $Z$ -компоненты МПЗ для всего земного шара [10, 11]. Модель  $Z$ -компоненты MF7 до сих пор используется в качестве эталона [12, 13]. Благодаря этой уникальной информации получено представление о характере намагниченности пород в низах литосферы.

По модели MF7 интенсивность аномалий модуля и  $Z$ -компоненты МПЗ на высоте 400 км в об-



**Рис. 1.** Магнитные аномалии модуля МПЗ магнитоактивных зон на высоте 400 км, вычисленные по компонентной модели [1–3]. 1 – Хребет Менделеева; 2 – о. Гренландия; 3 – Карское море; 4 – Балтийский щит; 5 – п-в Камчатка; 6 – Воронежский массив; 7 – Таримский бассейн (Тибет); 8 – Индийский щит; 9–10 – Африканская плита; 11 – Австралийский щит; 12 – Плато Кергелен (Индийский океан); 13 – Земля Эндерби (Восточная Антарктида); 14 – Земля Уилкса (Восточная Антарктида); 15 – Земля Мэри Бэрд (Западная Антарктида).

ластях древних докембрийских платформ Северной Америки, Гренландии, Восточной Европы, Сибири, Средней Азии, Африки, Австралии, Антарктиды, а также в Арктическом бассейне (хребты Альфа и Менделеева) превышает уровень инструментальной погрешности измерений МПЗ более чем в 5–10 раз.

С помощью измерений КА *СНАМР* выявлены наиболее магнитные зоны земного шара по положительным аномалиям модуля на высоте 400 км. В процессе работы авторами были исследованы выделенные зоны по аномалиям  $F$ -,  $Z$ - и  $H$ -составляющих МПЗ, рассчитанным на основе компонентной модели (рис. 1–3) [7]. Сопоставление наблюдаемых КА *СНАМР* аномалий  $F$ - и  $Z$ -компоненты с расчетными значениями на высоте 400 км показало хорошее согласие. В результате анализа по всему земному шару выделено 15 крупных магнитоактивных зон, прослеживающихся в околоземном пространстве до высоты 400 км и более (рис. 1–2).

Повысотные расчеты аномалий  $F$ -,  $H$ - и  $Z$ -составляющих выполнены по компонентной модели МПЗ [1–3]. Карты аномалий элементов земного магнетизма в околоземном пространстве построены для всего земного шара на высотах 300, 400, 500, 800 км. Они позволили проследить изменение интенсивности аномалий крупных магнитных зон благодаря повышенной намагниченности источников литосферных аномалий (табл. 1).

Для высот 300–800 км по компонентной модели авторами сделана оценка навигационных ори-

ентиров в виде аномалий, превышающих уровень погрешности измерений на КА в приоритетных высотных коридорах околоземного пространства [4, 7]. Исследование изменений интенсивности аномалий модуля и компонент МПЗ магнитоактивных зон с высотой показало, что они достаточно информативны и могут использоваться в магнитной аэрокосмической навигации до высот 400–450 км и более. Однако на высотах ~600–800 км из 15 магнитных зон остается 8. Уверенно выделяются по аномалиям  $F$ -,  $Z$ - и  $H$ -компонентам магнитные зоны: № 1, 3, 4, 8, 10, 11, 13, 14. По аномалиям  $F$ - и  $Z$ -компоненте прослеживаются № 12, 15 зоны (табл. 1).

Принципиальное значение для решения задач аэрокосмической магнитной навигации имеет оценка градиентов аномалий геомагнитного поля [6, 23]. В настоящей работе по компонентной модели выполнены расчеты вертикального и горизонтального градиентов аномалий  $Z$ -компоненты МПЗ для интервала высот 300–600 км.

Ожидаемые значения вертикального градиента  $Z$ -компоненты МПЗ по измерениям КА *Swarm* в магнитных зонах Восточной Европы на высоте 300 км имеют значения 0.1–0.4 нТл/км, в зонах Северной Америки, Гренландии и Арктического бассейна – 0.1–0.15 нТл/км. На высоте полета КА 450 км он составляет в Восточной Европе – 0.02–0.1 нТл/км, в Северной Америке, Гренландии и Арктическом бассейне – 0.02–0.06 нТл/км. На высоте полета КА 530 км вертикальный градиент  $Z$ -компоненты может иметь значения в Восточ-

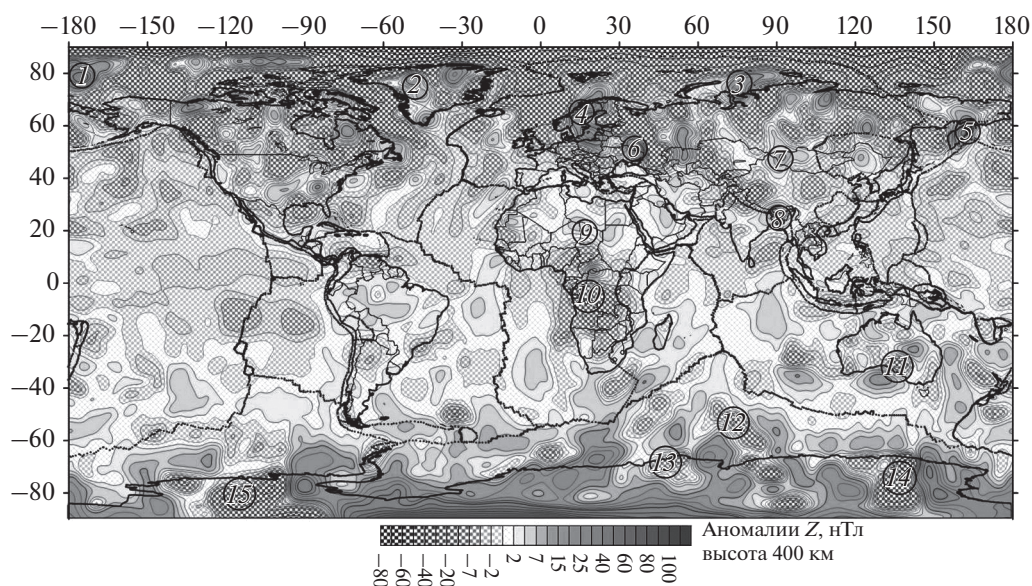


Рис. 2. Магнитные аномалии  $Z$ -компоненты МПЗ на высоте 400 км, вычисленные по компонентной модели [1–3].

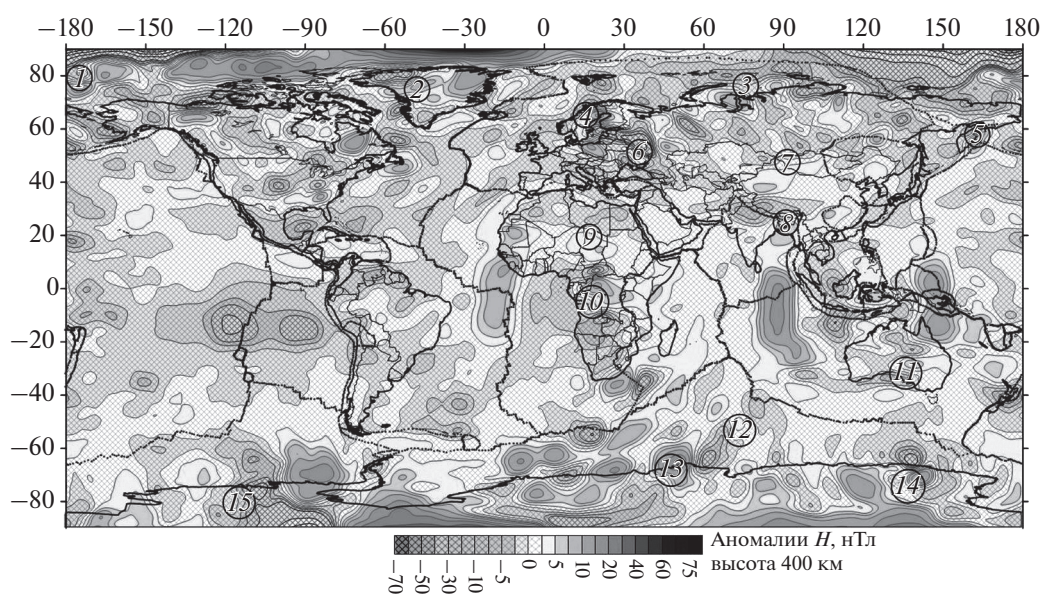


Рис. 3. Магнитные аномалии  $H$ -компоненты МПЗ на высоте 400 км, вычисленные по компонентной модели [1–3].

ной Европе – 0.02–0.08 нТл/км, в Северной Америке, Гренландии и Арктическом бассейне – 0.02–0.04 нТл/км.

Ожидаемые значения горизонтального градиента  $Z$ -компоненты МПЗ по измерениям КА *Swarm* на высоте 300 км могут иметь величину 0.01–0.3 нТл/км в Восточной Европе, в Северной Америке, Гренландии и Арктическом бассейне – 0.01–0.1 нТл/км. На высоте 450 км горизонтальный градиент  $Z$ -компоненты составляет в Восточной Европе – 0.04–0.1 нТл/км, в Северной Америке, Гренландии и Арктическом бассейне –

0.01–0.04 нТл/км. На высоте 530 км горизонтальный градиент может иметь значения в Восточной Европе – 0.03–0.06 нТл/км, в Северной Америке, Гренландии и Арктическом бассейне – 0.01–0.03 нТл/км.

Аномалии  $H$ - и  $Z$ -составляющих МПЗ в околоземном пространстве представляют интерес для исследования характера намагниченности пород в низах литосферы. Компоненты аномалий расширяют возможности количественной интерпретации магнитного поля. Аномалии компонент дают возможность более достоверно представ-

**Таблица 1.** Изменение интенсивности аномалий *F*-, *Z*- и *H*-компонент МПЗ магнитоактивных зон (рис. 1–3) с высотой в околоземном пространстве

№ аномалий	Амплитуда, нТл											
	высота 300 км			высота 400 км			высота 600 км			высота 800 км		
	<i>F</i>	<i>Z</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>Z</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>Z</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>Z</i>	<i>H</i>
1	50	50	15	30	30	10	13	12	2	4	1	1
2	25	20	12	10	10	7	2	1	3	0	0	0
3	30	25	13	15	15	10	6	5	3	0.5	0	1
4	30	30	15	20	20	10	10	7	2	4	1	1
5	40	40	12	20	20	7	7	7	3	3	2	1
6	60	60	10	30	30	4	7	7	0	2	0	0
7	15	15	8	10	10	5	5	3	2	2	0	1
8	15	15	7	10	10	5	6	5	4	3	1	2
9	10	7	6	6	5	4	4	2	2	3	0	1
10	25	–25	12	15	–15	7	10	–10	4	7	–7	3
11	15	–15	10	10	–10	5	4	–2	3	0.5	1	0
12	15	–15	5	10	–8	2	6	–3	1	1.5	2	1
13	20	–15	25	10	–8	15	6	0	10	1.5	5	7
14	30	–30	20	20	–20	10	10	–12	5	6	–5	4
15	30	–30	0.5	20	–20	0	10	–12	0	7	–7	0

лять физические процессы в земной коре и верхней мантии. Они позволяют изучать особенности строения низов литосферы, осуществлять поиск геотермальных зон и рудных полезных ископаемых, уточнять пространственно-временные перемещения тектонических плит [2–4, 11, 20, 24–29].

С целью оценки толщины магнитоактивных слоев, свойств намагниченности и плотности пород литосферы через выделенные магнитные зоны проведены профили, пересекающие их по широтным направлениям. Глубинные разрезы построены методом спектрально-пространственного анализа (SPAN) [25, 29] по аномалиям модуля МПЗ, измеренным вблизи поверхности Земли, аномалиям силы тяжести и сейсмологическим данным. На глубинные разрезы точками нанесены очаги землетрясений. Результаты комплексного анализа глубинных разрезов выявили особенности магнитных и плотностных свойств пород магнитоактивных зон литосферы.

Глубинный разрез через магнитную зону № 2 показал, что основные источники магнитных аномалий древнего щита Гренландии расположены на глубинах 7–10, 14–17, 30–36 км (рис. 1, 4а). Они приурочены к ослабленным слоям с пониженной плотностью, на границы которых приходятся очаги землетрясений (рис. 5а).

Глубинный разрез через магнитную зону № 6 (рис. 1, 4б) выявил вертикальные источники магнитных аномалий в диапазоне глубин 7–12, 13–20,

25–37 км, находящиеся в ослабленной разломной зоне пониженной плотности, в которой зафиксированы очаги землетрясений в диапазоне от 10 до 66 км на границах блоков разной плотности (рис. 5б). Сопоставление плотностного разреза с глубинами очагов землетрясений вблизи линии профиля, показало, что расположение очагов согласуется с полученной картиной распределения плотностных образований. Гипоцентры землетрясений тяготеют к контактам пород разной плотности на кровле, подошве и на латеральных границах плотностных и магнитных неоднородностей горизонтов и блоков (рис. 5).

Аномалии компонент МПЗ содержат значительно больше информации о магнитных свойствах пород земной коры, чем модульные данные. Это позволяет подойти к решению вопроса о намагниченности источников аномалий, несущих сведения о современном состоянии глубинных образований низов литосферы, что позволяет выявлять древние геоблоки, намагниченность которых образовалась при значениях главного МПЗ, отличавшихся от современного. Это дает возможность получить информацию о величине и направлении вектора МПЗ и оценить наиболее вероятное время периодов инверсий.

В результате изучения характера изменения аномалий компонент с высотой выявлены особенности физического состояния пород наиболее “холодных” намагниченных блоков литосферы,

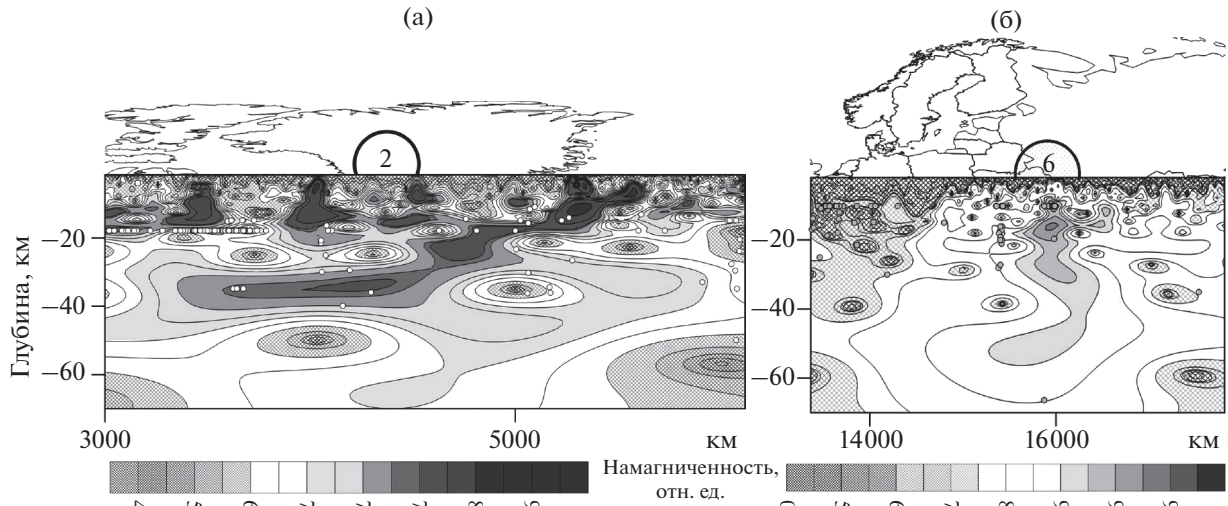


Рис. 4. Магнитные разрезы через зоны № 2 (Гренландия) (а) и № 6 (Воронежский массив Восточно-Европейской платформы) (б).

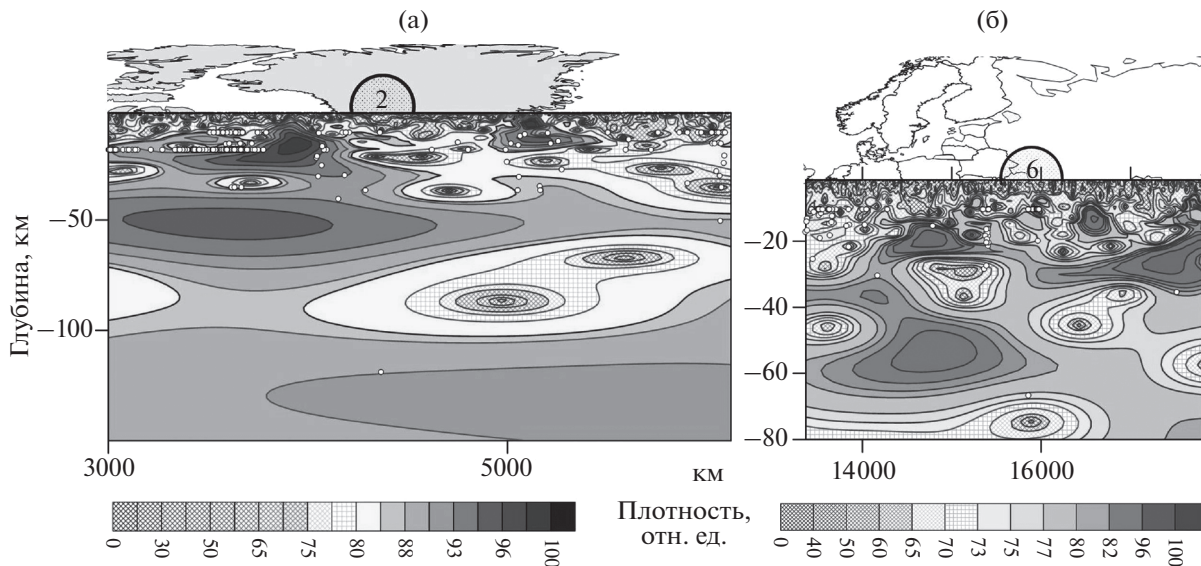


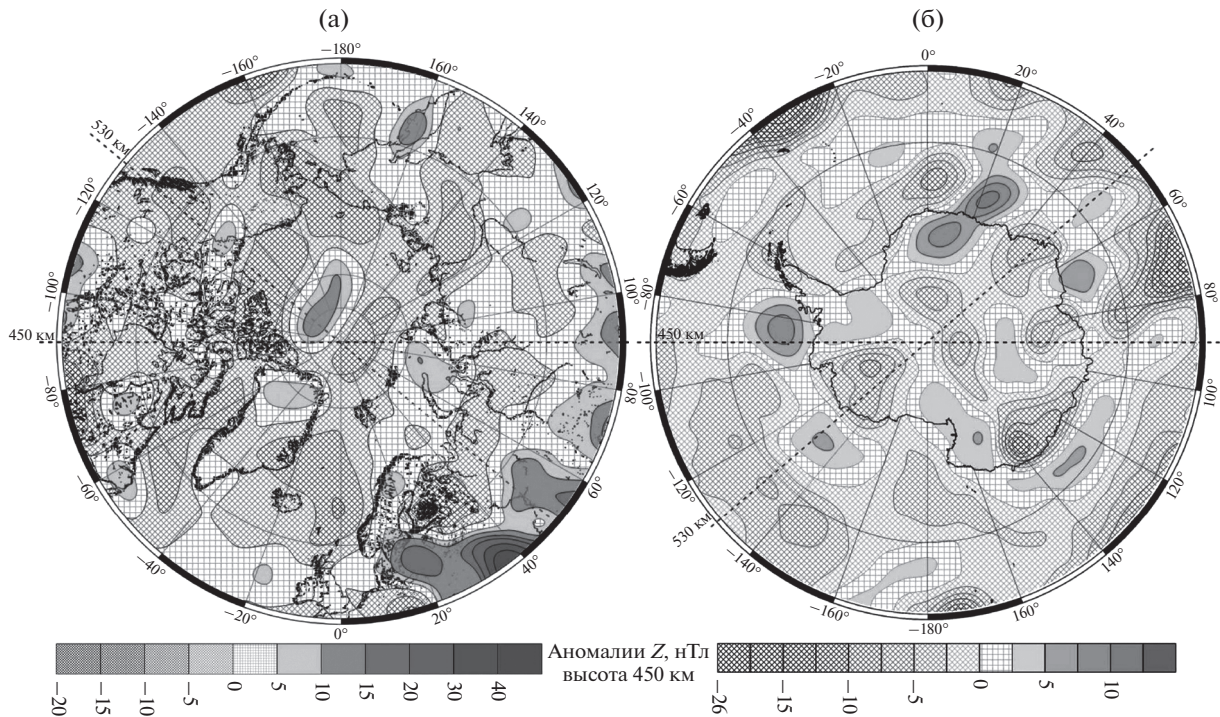
Рис. 5. Глубинные плотностные разрезы через магнитоактивные зоны № 2 (Гренландия) (а) и № 6 (Воронежский массив Восточно-Европейской платформы) (б).

находящихся на значительных глубинах. Особый интерес представляют магнитные аномалии  $Z$ - и  $H$ -компонент древних докембрийских образований литосферы, которые могут иметь как индуктивную, так и термоостаточную намагниченность, в том числе образовавшуюся в периоды инверсий МПЗ [3, 24, 25].

Наиболее наглядно такое явление выражено в полярных областях Земли вблизи магнитных полюсов. Например, в Амеразийском бассейне в Арктике (хребты Альфа и Менделеева) и на Восточном плато докембрийской Восточно-Антарктической платформы, где в последние 100 лет главные значения  $H$ -компоненты малы и состав-

ляют менее 0.1–1% от максимальных значений (рис. 3). Тем не менее, здесь выявлены интенсивные аномалии  $H$ -компоненты, прослеживающиеся до околоземных высот  $\geq 400$  км. Интерес представляют протяженные субмеридиональные аномалии  $H$ -компоненты, проявившиеся в районах Восточно-Индийского хребта и вдоль Срединно-Атлантического хребта от котловины Сьерра-Леоне через разлом Романш до Бразильской котловины. Эти аномалии выявлены на высоте 400 км в картах модуля и  $Z$ -компоненты, но наиболее ярко выделяются в картах  $H$ -компоненты МПЗ.

Большой интерес вызывают интенсивные аномалии  $H$ -компоненты вблизи магнитного полюса



**Рис. 6.** Магнитные аномалии  $Z$ -компоненты МПЗ в Арктике (а) и в Антарктике (б) на высоте 450 км, вычисленные по компонентной модели [1–3]. Магнитные аномалии приведены в полярной стереографической равноугольной проекции. Пунктирные линии – траектория орбиты КА *Swarm* (изображение ESA) на высотах 450 и 530 км.

в приполярной области Арктики, где главное поле  $H$ -компоненты имеет значения  $\leq 0-500$  нТл. Аномалии  $H$ -компоненты хребтов Альфа и Менделеева вблизи поверхности Земли составляют  $\geq 400$  нТл. Расчеты по компонентной модели для высоты 300 км допускают значения аномалий более 10–15 нТл (рис. 3, табл. 1). Вероятнее всего, это означает, что породы хребтов Альфа и Менделеева, помимо индуктивной намагниченности обладают также существенной термоостаточной намагниченностью. Возможно, что термоостаточная намагниченность могла сохраниться с тех времен, когда в Арктике не было магнитного полюса или породы хребтов Альфа и Менделеева образовались и намагнитились в других широтах, где главные значения  $H$ -компоненты имеют большие значения, такие как в экваториальной области [1–3, 24].

Магнитные аномалии компонент создают более четкое представление о характере изменений вектора МПЗ в периоды инверсий. Изучение аномалий компонент придает новый импульс исследованиям пространственно-временного представления о реконструкциях тектонических плит [3].

### МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЗЕМЛИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В настоящее время опубликованы первые данные измерений КА *Swarm*, наблюдаемые на высо-

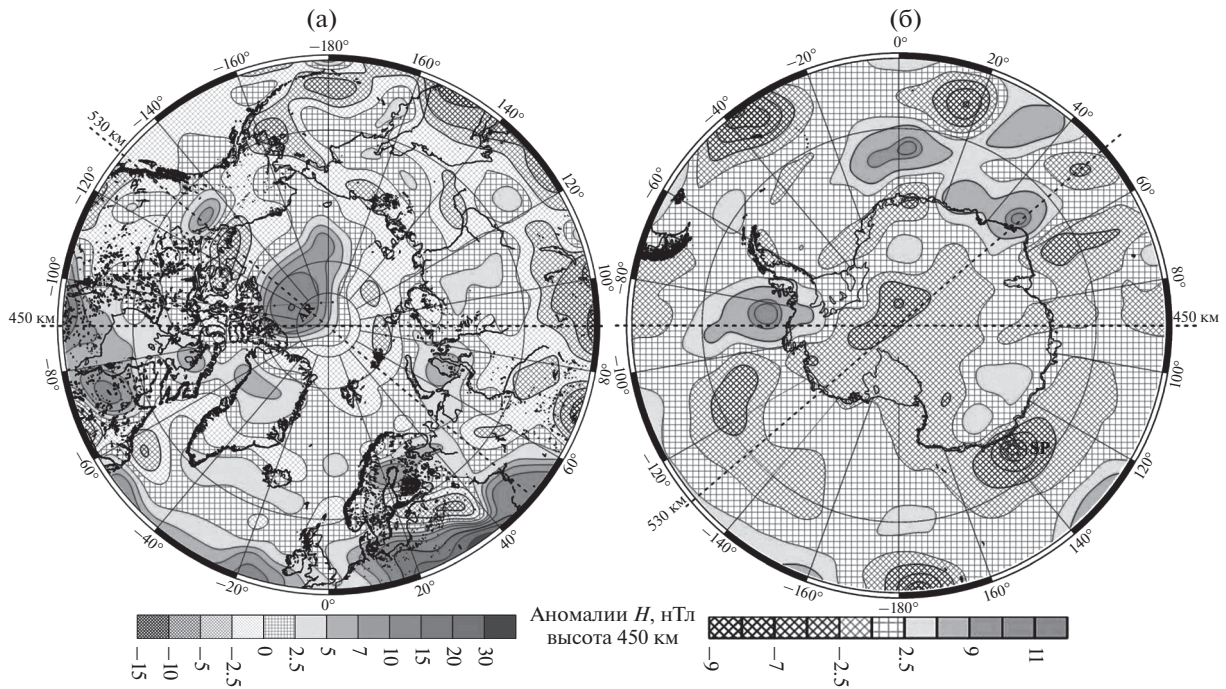
те 450 км [12–14]. Для полярных областей Арктики и Антарктики представлены модели аномалий  $Z$ -компоненты МПЗ на высоте 450 км и модели аномалий, пересчитанных с высоты полета КА к поверхности Земли.

Для сравнения с высокоширотными магнитными аномалиями, измеренными КА *Swarm* в полярных областях [10], по компонентной модели были проведены расчеты аномалий  $F$ -,  $Z$ - и  $H$ -составляющих МПЗ для высоты 450 км (рис. 6–8) [1–3]. Сопоставление расчетных значений аномалий  $Z$ -компоненты с наблюдаемыми КА *Swarm* в Арктике и в Антарктике показало хорошее согласие компонентной модели с независимыми оценками измерений на КА. Расхождения в полярных областях значений аномалий  $Z$ -компоненты составляют менее 2 нТл.

Для района Арктики выполнены расчеты ожидаемых магнитных аномалий  $Z$ - и  $H$ -компонент МПЗ на высоте 530 км (рис. 9). Интенсивность  $A$  и протяженность  $L$  аномалий  $F$ -,  $Z$ - и  $H$ -элементов МПЗ для всех трех ожидаемых высот орбит КА системы *Swarm* (300, 450, 530 км) [12–14] приведены в виде таблицы (табл. 2).

Конфигурация и морфология ожидаемых вертикальных и горизонтальных градиентов аномалий модуля МПЗ в высокоширотной области Арктики представлены для высоты 450 км (рис. 10).

Трасса орбиты КА *Swarm* на высоте 530 км пересекает одну из самых крупных магнитоактив-



**Рис. 7.** Ожидаемые магнитные аномалии  $H$ -компоненты МПЗ в Арктике (а) и в Антарктике (б) на высоте 450 км, вычисленные по компонентной модели [1–3]. Магнитные аномалии приведены в полярной стереографической равноугольной проекции. Сплошная линия с точками – перемещение магнитного полюса в северной полярной шапке с 1900 по 2020 гг. [17] (а); пунктирные линии – орбиты КА *Swarm* (изображение ESA).

ных структур Северного Ледовитого океана в Амеразийском бассейне вблизи  $80^\circ$  с.ш. – хребт Альфа (*AR*) (рис. 6–9). Линейновытянутые магнитные аномалии хребта Альфа вблизи поверхности Земли имеют интенсивность 500–1500 нТл [30, 31]. Вдоль трассы *KA Swarm* по приземным значениям аномалий  $Z$ -компоненты построен глубинный разрез, секущий магнитоактивную зону хребта Альфа, проявляющуюся в аномалиях  $Z$ -компоненты в околоземном пространстве [2, 4, 12–14, 24] (рис. 11).

Анализ магнитного разреза показал, что основные источники аномалий магнитоактивной зоны хребта Альфа расположены на глубинах 6–11 и 15–21 км. На глубине 6–11 км расположен магнитный и плотный маркирующий горизонт. Вертикально намагниченный слой на глубине 15–21 км

приурочен к мощной вертикальной разломной зоне пониженной плотности, четко прослеженной по разрезу до 27 км и, возможно, проходящей до 40 км (рис. 11б).

Слабомагнитный слой, прослеживающийся на глубине 33–43 км, приурочен к окраине плотных образований в низах литосферы, подстилающих древнюю Северо-Американскую платформу (рис. 1, 11а).

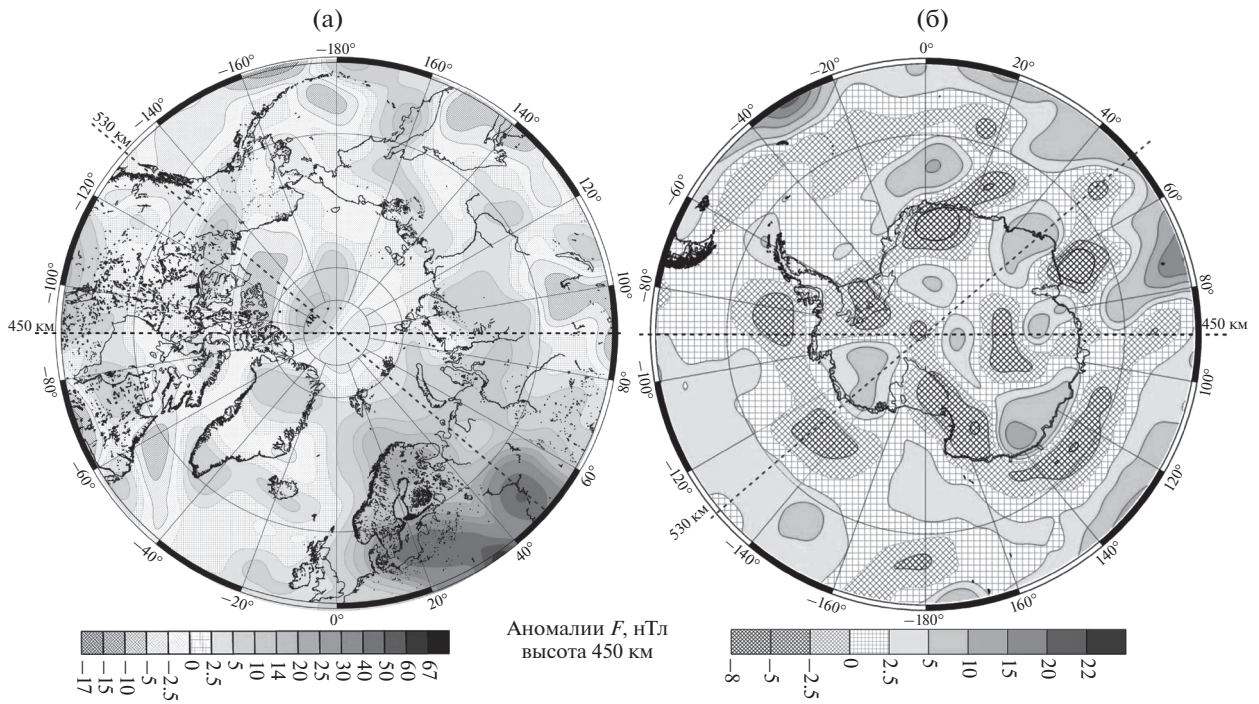
Большой интерес представляют аномалии  $H$ -компоненты, характерные для хребта Альфа и простирающиеся до хребта Менделеева (рис. 3, 7–9). Расчеты показали, что основной источник аномалий  $H$ -компоненты представляет собой слой на глубине 15–20 км. Магнитоактивная зона хребта Альфа расположена в области магнитного полюса (рис. 7, 9), где главное значение  $H$ -компоненты мало (0–500 нТл) [17]. Такие аномалии  $H$ -компоненты характерны для докембрийской земной коры Северной Америки и Европы [7, 26]. Вполне возможно, что хребт Альфа тоже возник в докембрии.

Очаги землетрясений на глубинных разрезах расположены на пограничных поверхностях и контактах слоев разной плотности и намагниченности. Результаты комплексного анализа глубинных разрезов выявили особенности строения магнитоактивной зоны литосферы в районе хребта Альфа.

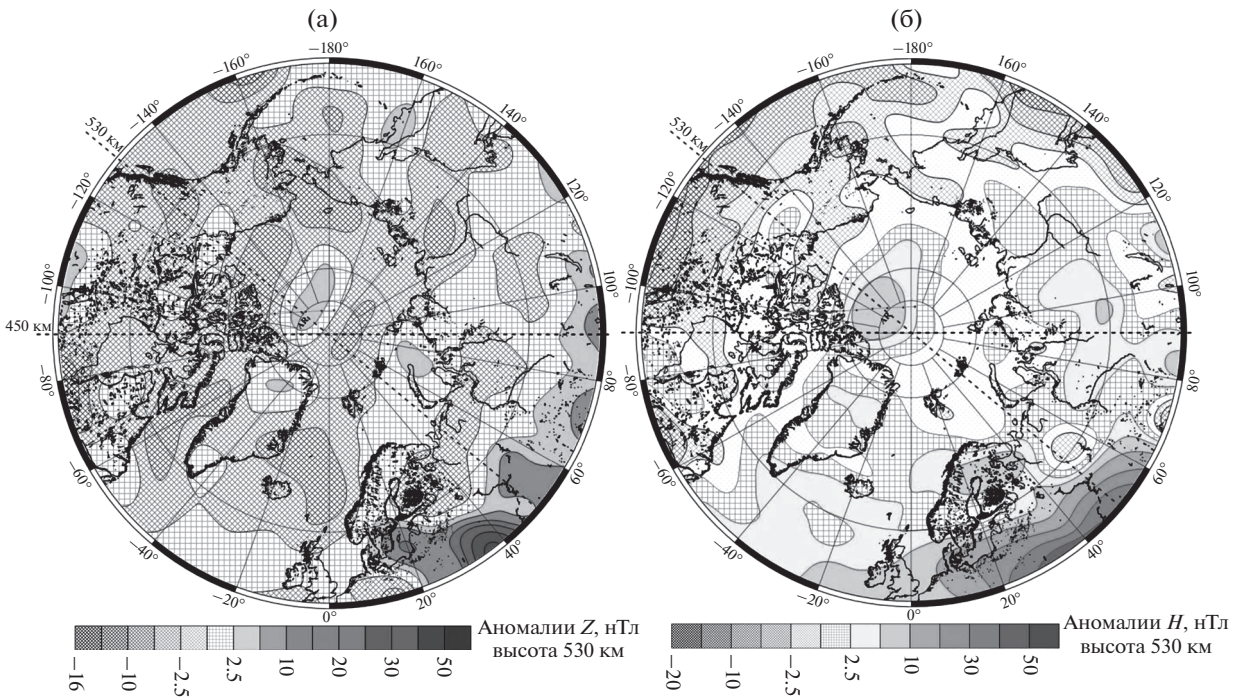
**Таблица 2.** Интенсивность  $A$  и протяженность  $L$  аномалий  $F$ -,  $Z$ - и  $H$ -элементов МПЗ на орбитах КА системы *Swarm* в зоне хребта Альфа Амеразийского бассейна Северного Ледовитого океана

Высота, км	Аномалия $F$		Аномалия $Z$		Аномалия $H$	
	$A$ , нТл	$L$ , км	$A$ , нТл	$L$ , км	$A$ , нТл	$L$ , км
300	2.5–25	1260	2.5–22	1260	5–13	1800
450	2.5–14	1240	2.5–13	1237	5–9	1500
530	2.5–10	1210	2.5–10	1220	5–7	1350

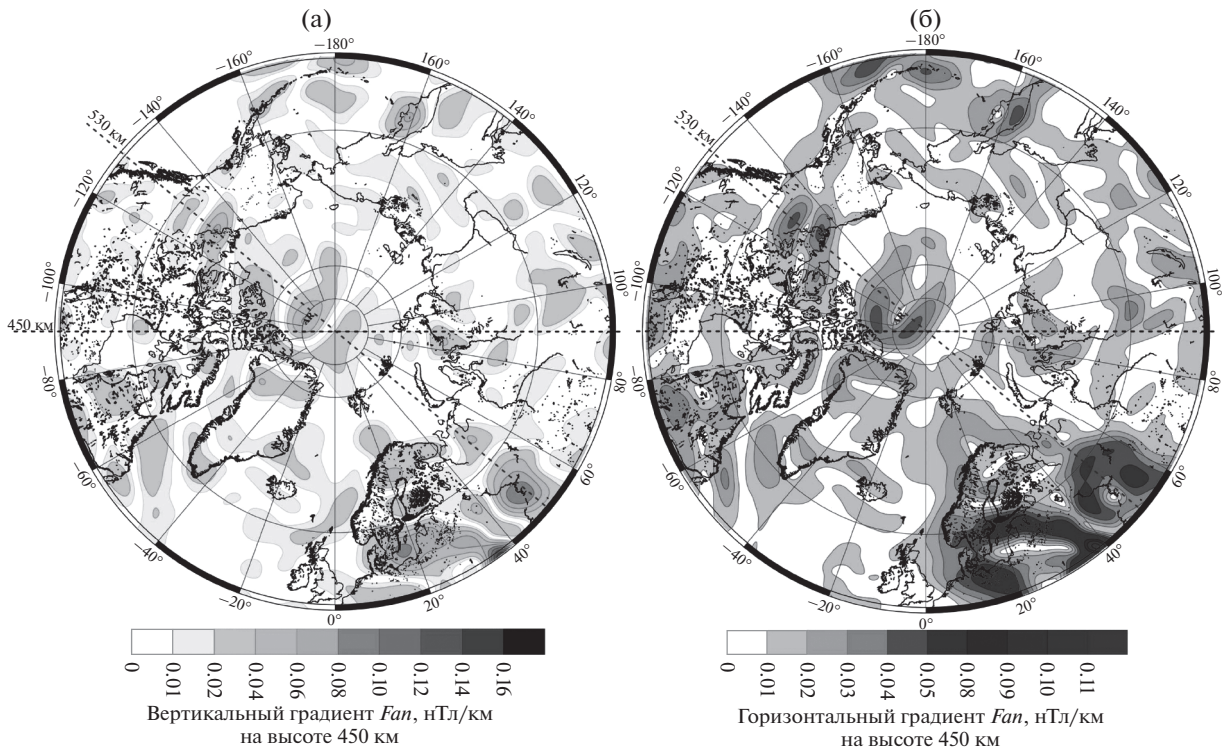




**Рис. 8.** Магнитные аномалии модуля МПЗ в Арктике (а) и в Антарктике (б) на высоте 450 км, вычисленные по компонентной модели [1–3]. Пунктирные линии – траектория орбиты КА *Swarm* (изображение ESA).



**Рис. 9.** Магнитные аномалии вертикальной (а) и горизонтальной (б) компонент МПЗ в Арктике на высоте 530 км, вычисленные по компонентной модели [1–3]. Условные обозначения те же, что на рис. 7.



**Рис. 10.** Ожидаемые градиенты магнитных аномалий модуля МПЗ в Арктике на высоте 450 км: вертикальный (а) и горизонтальный (б), вычисленные по компонентной модели [1–3]. Проекция полярная (стереографическая равноугольная).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЗОН В РАЙОНАХ ДРЕВНИХ ГЕОБЛОКОВ ЛИТОСФЕРЫ

В фундаменте континентов залегает раннедокембрийская земная кора. С докембрийскими образованиями связано возникновение значительной части полезных ископаемых. Магнитоактивные зоны геоблоков докембрия представляют особый интерес для решения поисковых геолого-геофизических задач. Исследование глубинного строения древних геоблоков дает возможность выявлять области, перспективные на рудные и алмазные полезные ископаемые [25, 26, 28, 29, 32, 33].

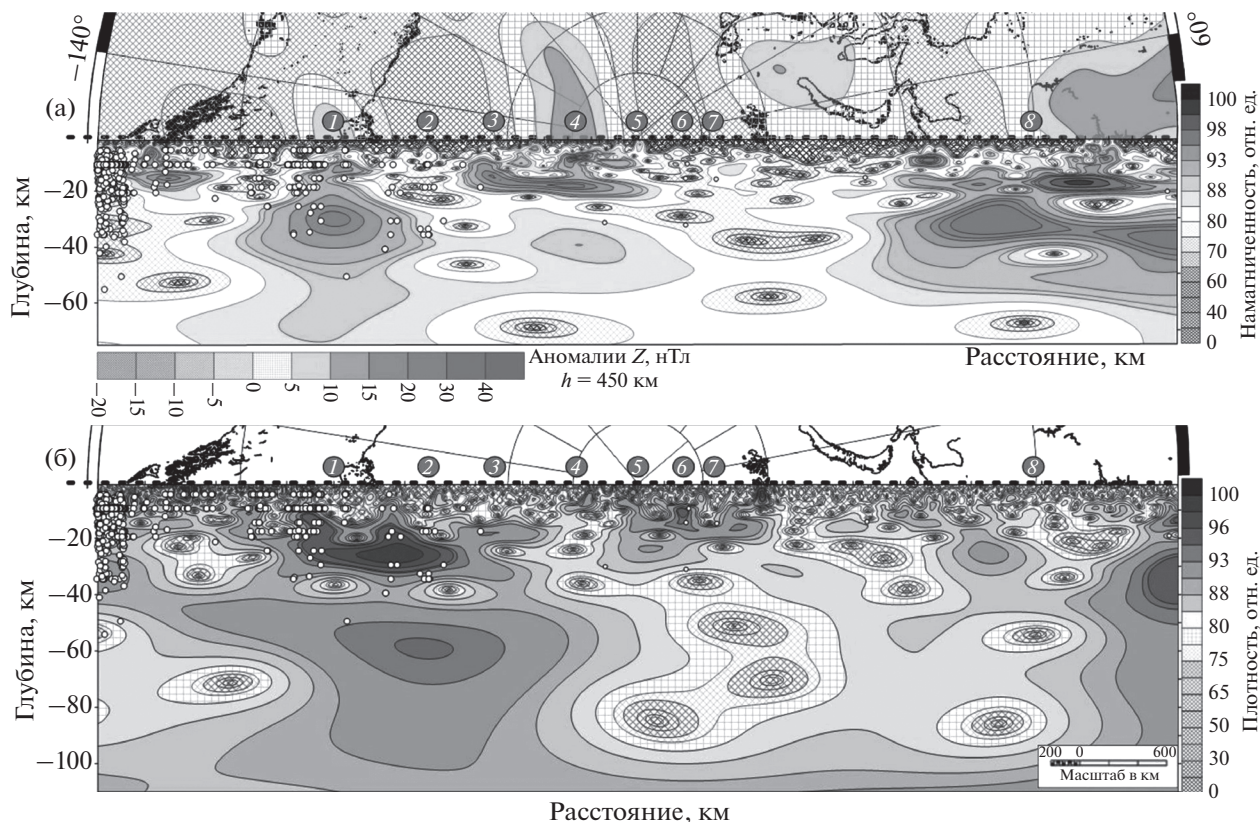
На основе исследования глубинных разрезов, проходящих через геоблоки докембрийской коры континентов, сделана оценка мощности магнитоактивных слоев, намагнитченности и плотностных свойств литосферы магнитных зон, проявляющихся в околоземном пространстве. На разрезах отражены зоны расщепления земной коры, латеральные и вертикальные разломы, флюидные системы и пути миграции термофлюидных потоков.

В результате анализа магнитных и плотностных разрезов земной коры выявлено местоположение глубокофокусных флюидных систем и эндогенных каналов флюидно-магматической проработки древних пород фундамента, которые играют

первостепенную роль в генерации значительной части полезных ископаемых [25, 26, 28, 29].

Магнитные и плотностные разрезы докембрийских геоблоков Гренландского щита (зона № 2), Воронежского массива (зона № 6) (рис. 4–5), Северо-Американской и Восточно-Европейской платформ (рис. 11) показали двухслойную структуру магнитных образований магнитоактивных зон, наблюдающихся в околоземном пространстве на высотах 400–450 км. Источники магнитных образований расположены вблизи подошвы верхней коры и в нижней коре. Очаги землетрясений приурочены к границам магнитных и плотностных неоднородностей литосферы.

На основе применения комплексной технологии интерпретации геофизических данных получены новые представления о слоистости и вертикальной раздробленности строения земной коры. Проведена оценка плотностных свойств магнитных геологических образований литосферы разного возраста. Это позволило проследить пути термофлюидных потоков по разломным зонам древних блоков и выявить латеральную стратификацию и вертикальную фрагментацию неоднородностей земной коры и мантии на примере магнитоактивных зон земного шара, прослеживающихся в околоземном пространстве (рис. 1–2). Полученные результаты дают возможность выяв-



**Рис. 11.** Глубинные разрезы Арктического бассейна. Магнитный разрез (а); плотностной разрез (б). Магнитный разрез показан на фоне карты аномалий  $Z$ -компоненты на высоте 450 км [1–3]. 1 – Северо-Американская платформа; 2 – море Бофорта; 3 – Канадская котловина; 4 – хр. Альфа; 5 – хр. Ломоносова; 6 – хр. Гаккеля; 7 – котловина Нансена; 8 – Восточно-Европейская платформа. Белые кружки – очаги землетрясений. Пунктирная линия – трасса орбиты КА *Swarm*.

лять гидротермальные зоны, флюидно-эксплозивные алмазонасные образования и области метасоматически измененных пород, перспективных на рудные полезные ископаемые [25, 26, 28, 29, 32, 33].

В процессе исследования магнитных, плотностных и скоростных свойств низов литосферы определено местоположение наиболее плотных и магнитных неоднородностей. Границы этих образований подчеркнуты очагами землетрясений, которые показывают направление перемещения геоблоков литосферы [7].

На базе комплексных исследований древних континентов вблизи подошвы верхней коры выделена магнитоактивная магнетитовая зона. Она возникла в результате процессов регионального метаморфизма раннего докембрия при гранитизации метабазитов с замещением фемических минералов салических с выделением магнетита [25, 26, 28].

Для магмы докембрия характерно сильное обогащение минералами железа. Она создала магнитные горизонты магнетитовых зон, которые могут являться источниками железа при фор-

мировании месторождений джеспилитов (железистых кварцитов). Джеспилиты – одни из самых древних горных образований, относящиеся к протерозойской и архейской эрам. Магнитные аномалии докембрийских образований прослеживаются в околоземном пространстве до высоты 400–450 км. Физические условия в низах верхней коры благоприятны для образования термоостаточной и вязкой намагниченности. К магнетитовым зонам докембрийской земной коры приурочены повышенные значения магнитных аномалий  $H$ - и  $Z$ -компонент в околоземном пространстве [24, 26].

На плотностных, магнитных и скоростных разрезах древних блоков литосферы выявлены уплотненные магнитоактивные слои в низах верхней и нижней коры. Они четко отражены в аномалиях МПЗ на околоземных высотах, измерены на КА по аномалиям модуля и  $Z$ -компоненты и вычислены для всех элементов компонентной модели МПЗ [2, 7, 26].

В процессе анализа магнитоактивных зон докембрийских геоблоков континентов по плотностным разрезам в низах литосферы выделены

**Таблица 3.** Толщина намагниченного слоя нижней коры и амплитуда магнитных аномалий геоблоков докембрия в околоземном пространстве

Название	Толщина, км	$A$ , нТл $h = 100$ км	$A$ , нТл $h = 400$ км	$A$ , нТл $h = 600$ км
Северная Америка	10	$\geq 60$	$\geq 10$	2.5
Гренландия	10	$\geq 90$	$\geq 10$	2.5
Балтийский щит	12	$\geq 100$	$\geq 20$	7–10
Украинский щит	15	$\geq 160$	$\geq 18$	7
Воронежский массив	25	$\geq 170$	$\geq 19$	7
Восточная Сибирь	10	$\geq 50$	$\geq 10$	5
Африка	20	$\geq 60$	$\geq 10$	7
Австралия	10	$\geq 40$	$\geq 10$	4
Антарктида	12	$\geq 100$	$\geq 20$	10

маркирующие слои и горизонты на глубинах 25–50 км. В Северной Америке выявлены уплотненные горизонты на глубине 33–55 км. В Гренландии плотные слои выделены на глубине 30–40 км, на Балтийском щите – на глубине 38–48 км [26, 28, 30]. Толщина намагниченных слоев литосферы варьируется от 10 до 25 км, а интенсивность магнитных аномалий блоков докембрия в околоземном пространстве составляет от 10 до 60 нТл (табл. 3).

Глобальная тепловая модель для континентальной литосферы (ТС1), построенная по измерениям теплового потока в скважинах и на основе электромагнитных исследований, указывает на существование архейских кратонов с характерными толщинами литосферы до 200–250 км [34]. Модель ТС1 показывает значительную тепловую неоднородность в пределах верхней мантии континентов. Карта глубин изотермы Кюри для магнетита ( $\sim 550^\circ\text{C}$ ) дает представление о возможной толщине магнитоактивного слоя древних кратонов.

Изучение горных пород геологических разрезов показало, что плотности и скорости горных пород связаны между собой прямолинейной зависимостью от состава пород и степени метаморфизма [26]. Это позволило установить значения глубинных геофизических параметров. Анализ вещественного состава пород глубинных разрезов дал возможность определить геологическую и вещественную природу магнетитовых зон. Физические условия в низах верхней коры благоприятны для образования индуктивной и термоостаточной намагниченности. Вероятно, поэтому магнетитовые зоны древних геоблоков земной коры создают высокие значения магнитных аномалий в околоземном пространстве (рис. 1–3) [2, 7, 35].

Намагниченность глубинных пород нижних горизонтов раннедокембрийской земной коры определяется, в основном, концентрацией магнетита и индуктивной намагниченностью вплоть до изотермы Кюри магнетита. Условия в низах континентальной коры могут быть благоприятны для обра-

зования современной вязкой намагниченности, что отражается в аномалиях  $Z$ - и  $H$ -компонент МПЗ. В областях развития раннедокембрийской коры наблюдаются региональные магнитные аномалии, прослеживающиеся до высот  $\geq 400$  км.

По данным аэромагнитной и космической съемки сделана оценка средней намагниченности нижней коры докембрийских блоков для центральной Канады – 5 А/м, северо-западной Германии – 2 А/м, Украинского щита – 2–4 А/м, США – 3.5–1 А/м [26]. Полученные оценки не противоречат данным непосредственных измерений намагниченности глубинных пород коры [36] и статистическим расчетам по измерениям КА, которые позволяют принять среднее глобальное кажущееся индуцированное намагничивание от 0.3 до 0.6 А/м, среднее значение толщины магнитной коры от 23 до 30 км и среднеквадратичное значение поля между 190 и 205 нТл с вероятностью 95% [20].

Результаты интерпретации магнитных аномалий позволили выявить особенности строения разных магнитоактивных слоев литосферы [2, 7, 10, 11, 25–30]. Глубинные плотностные разрезы с учетом сейсмологических данных создали представление о распределении плотностных неоднородностей и направлении смещения контактных поверхностей слоев земной коры. Это позволяет уточнить внутреннее строение литосферы и подойти к решению вопроса о характере намагниченности источников региональных и крупных региональных аномалий, отражающих физическое состояние древнейших блоков континентальной и океанической коры [1, 2, 10].

Комплексное исследование магнитных, плотностных и сейсмологических характеристик раннедокембрийской земной коры, слагающей фундамент континентов, позволяет подойти к оценке ее глубинного строения на вещественном уровне и показать, что региональные геомагнитные аномалии отражают влияние магнетитсодержащих слоев, существующих на глубинах более 10–35 км.

В настоящее время геомагнитные технологии успешно применены для поиска полезных ископаемых труднодоступных территорий полярных зон [4, 25, 32, 33].

По магнитным аномалиям модуля,  $Z$ - и  $H$ -компонентам МПЗ исследовано глубинное строение сейсмофокальных зон Курило-Камчатского желоба, которое проявляется в виде интенсивных аномалий вблизи поверхности Земли и на высотах до 450 км. Магнитные аномалии магнитоактивной зоны, обусловленной погружающимися намагниченными слоями в области пониженных температур мантии в зоне субдукции, ярко проявляются в аномалиях компонент вектора индукции МПЗ в околоземном пространстве [2, 3].

Особый интерес представляют погруженные магнитоактивные геоблоки древнего фундамента. Магнитные аномалии околоземного пространства выявили возможное продолжение фундамента западного побережья Африки в глубоководные котловины южной части Атлантического океана (рис. 1–3). Магнитные аномалии в котловине Сьерра-Леоне и Бразильской котловине прослеживаются по измерениям КА миссии *СНАМР* на высоте около 400 км. Расчеты по компонентной модели допускают, что аномалии вертикальной и горизонтальной составляющих МПЗ с амплитудой ~4–5 нТл могут выделяться до высоты 800 км. Глубинные плотностные и магнитные разрезы и сейсмологические исследования этих котловин выявили плотный и магнитный горизонт в низах литосферы на глубине 35–50 км.

В результате проведенного комплексного исследования магнитных аномалий, аномалий силы тяжести с учетом распределения глубин очагов землетрясений выявлена специфика внутреннего строения магнитоактивных зон литосферы и получено новое представление о распределении литосферных неоднородностей в земной коре и мантии. Это позволило разработать систему поисковых геофизических критериев прогноза потенциально рудоносных участков на основе особенностей влияния глубинных факторов [2, 25, 26, 28, 29, 32, 33].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на конкретных примерах продемонстрированы возможности компонентной модели МПЗ, которая позволяет высислять аномалии компонент и их градиентов в околоземном пространстве, начиная от уровня океана и до высот КА, что представляет научное, практическое и прикладное значение.

Сопоставление расчетных значений модуля и  $Z$ -компоненты с аномалиями по независимым наблюдениям КА на высотах 400–450 км подтвердили хорошее качество компонентной модели, по-

строенной на основе приземных аэро- и гидромагнитных съемок. Это позволяет делать прогнозы ожидаемых аномалий компонент, их горизонтальных и вертикальных градиентов для разных уровней высот в околоземном пространстве.

Глубинные разрезы магнитных зон литосферы выявили особенности строения земной коры древних областей Земли и специфику флюидомагматической активности верхней мантии, что открывает новые возможности поиска рудогенерирующих структур полезных ископаемых и исследования геологической эволюции земной коры.

По результатам проведенных геофизических исследований глубинного строения земной коры и мантии получена уточненная модель литосферы магнитоактивных зон с учетом особенностей влияния глубинных факторов.

Проведенные исследования аномалий компонент МПЗ создают предпосылки для выявления изменений геомагнитного поля в прошлом и предоставляют важные сведения о характере генерации МПЗ, что дает возможность уточнить и понять динамический процесс тектоники плит.

Для решения геолого-геофизических и навигационных задач необходима разработка современных высокоточных высотных моделей МПЗ на основе отечественных векторных магнитометрических съемок околоземного космического пространства с помощью КА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания 0037 2014 0005.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрова А.А. Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля // Сб. трудов ИЗМИРАН. М., 2015. С. 412–423.
2. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 2. С. 88–106.
3. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Компоненты морских линейных магнитных аномалий Мирового океана. Ч. 1. Северная Атлантика // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 4. С. 34–41.  
<https://doi.org/10.7868/S2073667318040056>
4. Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Алексеев В.Ф. и др. Применение высотных моделей магнитного поля Земли для решения геофизических задач // Космич. исслед. 2019. Т. 57. № 3. С. 185–191. (Cosmic Research. P. 163–168).
5. Брандин В.Н., Васильев А.А., Худяков С.Т. Основы экспериментальной космической баллистики. М.: Машиностроение, 1974.
6. Гурьев И.С. Адаптивные магнитометрические системы контроля пространственного положения. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

7. *Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Латышева О.В.* Магнитные аномалии литосферы в околоземном космическом пространстве // Материалы научной конференции “Магнетизм на Земле и в космосе”. М.: ИЗМИРАН, 2019. С. 91–95.  
<https://doi.org/10.31361/pushkov2019.021>
8. *Balmino G., Bonvalot S.* Gravity Anomalies // Encyclopedia of Geodesy. Springer International Publishing. Switzerland. 2016. P. 1–9.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0\\_45-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_45-1)
9. *Heman K., Thebault E., Manda M. et al.* Magnetic anomaly map of the world: merging satellite, airborne, marine and ground-based magnetic data sets // Earth planet. Sci. Lett. 2007. № 260. P. 56–71.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.040>
10. *Maus S.* An ellipsoidal harmonic representation of Earth’s lithospheric magnetic field to degree and order 720 // Geochem. Geophys. Geosyst. 2010. V. 11. № 6. Q06015.  
<https://doi.org/10.1029/2010GC003026>
11. *Thebault E. et al.* The magnetic field of the Earth’s lithosphere // Space Science Reviews. 2010. V. 155. P. 95–127.
12. *Thebault E., Vigneron P., Langlais B., Hulot G.* A Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80 // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. № 126. P. 1–13.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0510-5>
13. *Sabaka T.J., Clausen L.T., Olsen N., Finlay C.C.* A comprehensive model of Earth’s magnetic field determined from 4 years of Swarm satellite observations // Earth, Planets and Space. 2018. V. 70. № 130. P. 1–26.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0896-3>
14. *Olsen N., Pauluhn A.* Exploring Earth’s magnetic field – Three make a Swarm // Spatium. 2019. V. 43. P. 3–15.
15. *Thebault E., Finlay C., Beggan C., Alken P.* International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. Springer. 2015.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>
16. *Непоклонов В.Б., Петрова А.А., Августов Л.И.* Результаты исследований навигационной информативности аномалий гравитационного и магнитного полей Земли на высотах до 20 км // Труды XXX конференции памяти Н.Н. Острякова. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. С. 389–397.
17. *Kopytenko Y.A., Chernouss S., Petrova A.A. et al.* The Study of Auroral Oval Position Changes in Terms of Moving of the Earth Magnetic Pole // Problems of Geocosmos. 2018. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. P. 289–297.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_25)
18. *Джанджгава Г.И., Августов Л.И.* Навигация по геополям. М.: Научтехлитиздат, 2018.
19. *Джанджгава Г.И., Августов Л.И., Бабиченко А.В. и др.* Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. М.: Научтехлитиздат, 2015.
20. *Thebault E., Vervelidou F.* A statistical spatial power spectrum of the Earth’s lithospheric magnetic field // Geophys. J. Int. 2015. V. 201. № 2. P. 605–620.  
<https://doi.org/10.1093/gji/ggu463>
21. *Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Августов Л.И.* Анализ информативности магнитного поля Земли для автономной корреляционно-экстремальной навигации // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10. № 1. С. 61–67.  
<https://doi.org/10.7868/S2073667317010075>
22. *Щербаков И.А., Петрова А.А.* Магнитная навигационная карта // Записки по гидрографии. 2017. № 304. С. 35–40. <http://hydrobase.narod.ru/zapiski.htm>
23. *Михлин Б.З., Селезнев В.П., Селезнев А.В.* Геомагнитная навигация. М.: Машиностроение, 1976.
24. *Петрищев М.С., Петрова А.А., Копытенко Ю.А., Латышева О.В.* Магнитные аномалии докембрия в околоземном пространстве // Матер. 17 конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 162–163.
25. *Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны Северного Забайкалья // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. Вып. 41. № 1. С. 37–53.  
<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-37-53>
26. *Наливкина Э.Б., Петрова А.А.* Магнетитовая зона земной коры континентов. СПб.: ВСЕГЕИ, 2018.
27. *Manda M., Thebault E.* The Changing Faces of the Earth’s Magnetic Field. Paris, 2007.
28. *Petrova A.A., Kopytenko Yu.A., Petrishchev M.S.* Deep Fluid Systems of Fennoscandia Greenstone Belts // Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. 2019. P. 239–247.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_28)
29. *Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Геотермальные зоны юга Восточной Сибири // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. Вып. 42. № 2. С. 25–41.  
<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-25-41>
30. *Litvinova T., Petrova A.* Features of the structure of the lithosphere of the Arctic Ocean near the Gakkel Ridge, the Alpha and Lomonosov // Proceedings of the Geological Society of Norway. Tromsø. 2014. № 2. P. 31–34.
31. *Глебовский В.Ю., Верба В.В., Каминский В.Д.* Потенциальные поля Арктического бассейна: история изучения, аналоговые и современные цифровые обобщения // 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане / Под ред. В.Л. Иванова, В.Д. Каминского. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2008. С. 93–109.
32. *Петрова А.А., Мавричев В.Г.* Геомагнитный метод прогноза коренных месторождений алмазов на примере Красновишерского района // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. С. 261–265.
33. *Lyukianova L., Petrova A.* Geomagnetic method of primary diamond deposits prediction exemplified by the Western Urals // EGU General Assembly. Vienna, Austria. 2014. EGU2014-4086.
34. *Artemieva I.M.* Global 1° × 1° thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution // Tectonophysics. 2006. V. 416. P. 245–277.
35. *Oakey G.N., Saltus R.W.* Geophysical analysis of the Alpha–Mendeleev ridge complex: Characterization of the High Arctic Large Igneous Province // Tectonophysics. 2016. V. 691. Part A. P. 65–84.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.005>
36. *Печерский Д.М., Геншафт Ю.С.* Петромагнетизм континентальной литосферы и природа региональных магнитных аномалий: обзор // Российский журнал наук о Земле. 2001. Т. 3. № 2. С. 97–124.