

УДК 550.389

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОТНЫХ МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

© 2019 г. Ю. А. Копытенко<sup>1</sup>, А. А. Петрова<sup>1</sup>, В. Ф. Алексеев<sup>2</sup>,  
И. С. Гурьев<sup>2</sup>, П. В. Лабетский<sup>2</sup>, \*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма и распространения радиоволн РАН,  
г. Санкт-Петербург, Россия

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

\*p.v.labetskiy@gmail.com

Поступила в редакцию 02.05.2017 г.

После доработки 28.11.2017 г.

Принята к публикации 15.05.2018 г.

Рассматривается роль высотных моделей магнитного поля Земли в решении геофизических задач с помощью космических аппаратов. Приведены результаты изучения особенностей глубинного строения земной коры в структуре магнитных аномалий по данным высотных измерений на спутниках миссии CHAMP. Показана информативность магнитных аномалий компонент в околоземном космическом пространстве, вычисленных по компонентной модели магнитного поля Земли, для поиска полезных ископаемых в геотермальных районах Центральной Европы и Северной Америки, в зоне месторождений железистых кварцитов Балтийского щита и месторождений углеводородов в нефтегазоносных бассейнах Татарстана, Сибири, Баренцева, Средиземного и Северного морей.

DOI: 10.1134/S0023420619030063

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из источников информации, используемым для решения геофизических задач с помощью космических аппаратов (КА), является магнитное поле Земли (МПЗ). Представление постоянной части МПЗ и его “векового хода”, полученное на высотах полета КА, осуществляется с помощью сферического гармонического ряда Гаусса.

Геофизическое обеспечение на основе сопоставления значений параметров высотной модели МПЗ и магнитометрических измерений, проводимых на КА, наземных магнитных обсерваториях и вариационных станциях в комплексе с измерениями других физических параметров, позволяет изучать особенности глубинного строения нижних частей земной коры. Это, с одной стороны, дает возможность оценивать состояние ряда процессов, происходящих в околоземном пространстве и в нижней мантии Земли (землетрясения, ядерные взрывы, нарушения радиосвязи, и т.д.) [1]. С другой стороны, позволяет находить региональные критерии прогнозирования долгоживущих месторождений нефтегазоносных зон, долговременной подпитки геотермальных зон, коренных благороднометалльных образований докембрийских щитов, обусловленных дли-

тельным воздействием глубинных рудообразующих флюидно-магматических систем литосферы.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Качество решения геолого-геофизических и геодезических задач с помощью КА зависит от точности высотных моделей МПЗ. Точность моделей МПЗ достигается решением следующих основных задач [2, 3]: совершенствование магнитометрических измерителей (магнитометров) с целью уменьшения погрешностей измерений; разработка методов учета и компенсации собственных магнитных помех КА; разработка методов уменьшения отрицательного влияния возмущений МПЗ на точность магнитометрических измерений; совершенствование статистических методов обработки магнитометрических измерений.

Кратко рассмотрим состояние и результаты исследований перечисленных задач.

1. Основным элементом, обеспечивающим измерение параметров МПЗ для построения высотной модели, является магнитометр. С развитием технологий создания магнитометров появляется возможность повышать их точностные характеристики. В качестве примера можно привести со-

временный лабораторный образец отечественного трехкомпонентного феррозондового магнитометра, обладающего следующими основными характеристиками: диапазоном измерений  $\pm 100000$  нТл; разрешающей способностью менее 0.05 нТл; абсолютной погрешностью измерений менее 2 нТл; полосой частот от 0 до 100 Гц; энергопотреблением менее 2.5 Вт; массой менее 300 г. [4].

В ряде случаев, для повышения точности магнитометрических измерений, например, при съемке МПЗ, феррозондовые магнитометры могут комплексоваться с квантовыми магнитометрами. Абсолютная точность и разрешающая способность современных квантовых магнитометров составляет порядка 0.01 нТл [5, 6]. Ведутся работы по совершенствованию магниторезистивных магнитометров [7–10], обладающих малыми массогабаритными характеристиками и энергопотреблением.

2. В настоящее время накоплены результаты отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований по компенсации и учету собственных магнитных помех подвижных объектов, предложены способы уменьшения влияния магнитных полей носителей [2, 3].

3. Разработка методов уменьшения отрицательного влияния возмущений МПЗ (магнитных бурь) является также одной из основных задач повышения точности магнитометрических измерений [1–3].

Известно, что величины амплитуд возмущений МПЗ растут с увеличением магнитной широты от экватора к северному и южному полюсам и могут достигать значений сотен нанотесл, что, в свою очередь, увеличивает погрешности магнитометрических измерений. Однако вероятность появления магнитных бурь с большими индексами магнитной активности ( $K = 9$  и  $K = 8$ ) в течение года не превышает 0.6%. В годы минимума магнитной активности такой интенсивности не наблюдается [3]. Глобальная съемка МПЗ проводится в течение длительного времени (~ нескольких месяцев). При этом для построения высотных моделей МПЗ используются только магнитометрические измерения, полученные в периоды малой магнитной активности.

4. Для получения оценок параметров высотных моделей МПЗ используются статистические методы обработки, однако они не учитывают условия нестационарности и нелинейности измерений МПЗ. Для повышения точностей оценок параметров высотных моделей МПЗ необходимо разрабатывать новые или совершенствовать существующие статистические методы оценивания.

Впервые измерения параметров МПЗ для построения его высотной модели были проведены

на третьем советском КА. Затем они были выполнены на зарубежных КА. Для построения высотных моделей МПЗ был осуществлен ряд запусков отечественных КА (*Космос-26*, *Космос-49*, *Космос-321*, *Болгария-1300*), на которых размещалась магнитометрическая аппаратура. С 1987 года запуски отечественных КА для съемки МПЗ прекратились [8].

Последняя отечественная высотная модель МПЗ (1980–1990 гг.) с учетом “векового хода” позволяла определять составляющие вектора индукции МПЗ и его модуля на расстоянии до 40000 км от поверхности Земли в МПЗ. Об ошибках этой модели можно судить по данным в п. 1.3 [5] – “при длине ряда 10–13 гармоник погрешность вычисления геомагнитного поля на поверхности Земли составляет 2%”.

За рубежом регулярно проводятся высокоточные съемки МПЗ с использованием КА (*Pogo*, *Explorer*, *Magsat*, *CHAMP* (Challenging Minisatellite Payload), *Oersted*, *Swarm*) [11–16]. Для повышения точности магнитометрических измерений на некоторых КА совместно используются скалярные и векторные магнитометры. Через каждые 5 лет, начиная с 1975 года, строятся глобальные международные модели (IGRF) МПЗ с учетом его “векового хода”. Погрешность аппроксимации осредненных параметров данной модели оценивается величиной ошибки порядка 0.1 нТл [16].

Вышеперечисленные КА предназначались не только для построения глобальных моделей МПЗ, но и для решения других задач. Например, КА *Magsat* предназначался для решения задачи коррекции региональных магнитных карт [11], а КА миссии *CHAMP* – для съемки параметров магнитного поля Земли на низколетящих орбитах (около 300 км), выполняя возложенные на нее задачи в течение десяти лет [12].

Для повышения точности измерений компонент МПЗ на КА *Oersted* совместно использовались скалярный магнитометр с абсолютной погрешностью измерения менее 0.5 нТл с диапазоном измерений от 16000 до 64000 нТл и векторный магнитометр с разрешающей способностью менее 0.25 нТл с диапазоном измерений  $\pm 65000$  нТл [13].

Определенный интерес с точки зрения проведения съемок МПЗ с использованием КА вызывает осуществляемая в настоящее время программа *Swarm*, которая предусматривает создание серии КА *Earth Explorer*, предназначенных для изучения параметров Земли и их изменений под воздействием деятельности человека. Одной из задач программы является определение формы МПЗ и ее связи с циркуляцией вод в мировом океане. Программа предусматривает группировку из трех КА, два из которых летят параллельно в непосредственной близости друг от друга, посте-

пенно снижаясь за 4 года с высоты 460 до 300 км. Третий КА поддерживает высоту около 530 км. На КА размещаются магнитометры для измерения вектора индукции МПЗ и абсолютных значений модуля вектора магнитной индукции [15].

Из анализа программы Swarm можно сделать вывод, что использование трех КА может существенно повысить точность съемки МПЗ при одновременном измерении КА элементов МПЗ за счет определения горизонтальных, а в ряде случаев и вертикальных градиентов МПЗ. Такой подход позволяет уменьшить отрицательное влияние возмущений МПЗ на результаты построения высотной модели МПЗ [15, 16].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время значительный интерес для решения геолого-геофизических и навигационных задач представляет построение высотных моделей аномалий компонент МПЗ околоземного космического пространства. Определенный прогресс в этом направлении предпринят в СПБФ ИЗМИРАН при создании первой очереди мировой трехмерной модели компонент МПЗ [17–19].

Основа для первой пространственной модели аномалий компонент МПЗ на весь земной шар – магнитного склонения ( $dD$ ), магнитного наклона ( $dI$ ), горизонтальной ( $dH$ ) и вертикальной ( $dZ$ ) составляющих – построена в 2012 году [18]. Она была создана на основе обширной базы магнитометрических данных, полученных в результате многолетних исследований пространственного распределения элементов земного магнетизма и его вековых вариаций на территории бывшего СССР, России и в акватории мирового океана на маломагнитной шхуне Заря [17–20]. Помимо материалов векторных съемок компонентная модель включает расчетные значения, вычисленные по измерениям модуля полного вектора индукции магнитного поля вблизи поверхности Земли [19]. В статье использованы обновленные результаты по созданию пространственной модели аномалий компонент постоянного магнитного поля Земли.

Мировые карты, создаваемые на основе компонентной модели МПЗ, предназначены для использования на различных уровнях околоземного космического пространства в диапазоне высот от 0 до 400 км. Построение нового поколения магнитных карт компонент для акватории Мирового океана и околоземного пространства является одной из приоритетных задач магнитной картографии.

Мировые карты магнитного склонения, наклона, вертикальной и горизонтальной компонент могут быть использованы как в интересах

изучения глубинного строения земной коры континентов и океанов, поиска полезных ископаемых, так и для целей морской и воздушной магнитной навигации [17–19].

Проведенный статистический анализ моделей компонент МПЗ СПБФ ИЗМИРАН показал достаточно высокие точностные характеристики как для условий по наблюдениям в Мировой сети обсерваторий, так и для больших высот. Например, расхождение расчетных значений созданных карт магнитного склонения с данными определения склонения в геомагнитных наблюдениях в обсерваториях Мировой сети имеет среднеквадратическое отклонение менее 6 угл. мин для 53% ( $N = 117$ ) измерений и менее 12 угл. мин для 70% ( $N = 176$ ) измерений [19].

По измерениям на КА *СНАМР* опубликованы редукции карт магнитных аномалий для высот 100 и 400 км [19, 21, 22]. Проведенный анализ магнитных аномалий модуля вектора индукции МПЗ, полученных на КА *СНАМР* для высот 100 и 400 км, и расчетных аномалий по модели СПБФ ИЗМИРАН показал хорошую сходимость результатов. Так, на высоте 100 км среднеквадратическое отклонение составляет 15.6 нТл, на высоте 400 км – 6.2 нТл.

Особый интерес для региональных геолого-геофизических исследований представляет совместный анализ данных спутниковых измерений и расчетов аномалий элементов МПЗ на промежуточных уровнях околоземного космического пространства, полученных по компонентной трехмерной модели МПЗ. Вычисления компонент по модели МПЗ проводятся для оптимального набора высот околоземного пространства в соответствии со спецификой спектральной структуры аномалий, обусловленных распределением неоднородностей в различных слоях земной коры. Анализ глубинного строения земной коры и выбор оптимального набора высот выполнен на основе расчетов магнитных и плотностных глубинных разрезов вдоль протяженных профилей (более 1500 км), пересекающих месторождения рассмотренных регионов [19, 23–33].

В результате исследования глубинных разрезов было выявлено, что для поиска долгоживущих месторождений углеводородов наиболее информативен уровень высот ~20 км, для геотермальных месторождений ~10–15 км, для коренных золоторудных образований докембрийских щитов ~15–30 км, для алмазоносных структур, возникающих в результате поднятия магнитоактивных и плотных пород мантийных диапиров ~15–50 км. На этих уровнях околоземного космического пространства более четко, чем на спутниковых высотах локализуется эффект выявления флюидных систем средней части земной коры и уточняется местоположение выходов флюидоподводящих ка-

налов, исходящих из мантии. Наиболее информативные результаты получены по горизонтальной ( $dH$ ) и вертикальной ( $dZ$ ) компонентам МПЗ [24].

Таким образом, наблюдения геомагнитного поля на КА *СНАМР* и построение карт магнитных аномалий для высот 100 и 400 км не только дали ценную информацию о глубинном строении литосферы, но и открыли новые возможности более достоверного исследования магнитных аномалий земной коры из околоземного космического пространства в интервале высот 10–50 км.

Глубинные проникаемые зоны литосферы выделяются по целому комплексу геофизических признаков (слабая намагниченность, пониженная скорость сейсмических волн и высокая электропроводность). Однако наиболее ярко региональные особенности проникаемых зон выявляются в измерениях магнитных аномалий на больших высотах. Так, например, проникаемые глубинные зоны в районах выходов геотермальных вод в *Yellowstone National Park* и *High Cascade Mountains* четко выражены на картах магнитных аномалий на высотах 100 и 400 км в виде слабомагнитных областей, что означает отсутствие источников магнитных аномалий в средней и нижней частях земной коры в геотермальных зонах *Yellowstone National Park* и *High Cascade Mountains* [23, 24].

Исследование неоднородностей строения литосферы на примере полуострова Таймыр показало, что положительные магнитные аномалии, обусловленные источниками в нижней части земной коры, хорошо проявляются в спутниковых измерениях, фиксируя магнитные аномалии в редукциях для высот 100 и 400 км. Кроме того, в настоящее время большой интерес вызывают зоны отрицательных магнитных аномалий, выделяемых на различных уровнях околоземного космического пространства. Они приурочены к особым проникаемым зонам земной коры и литосферы, имеющим повышенную геотермальную активность и связаны с целым рядом полезных ископаемых [24].

Исследования показали, что к спутниковым отрицательным магнитным аномалиям (на высотах 100 и 400 км) на глубинах 20–30 км приурочены слабомагнитные линзы низкой плотности. В верхней части коры они перекрываются плотными и магнитными породами. С одной из таких зон полуострова Таймыр – Фадьюкудинско-Котуйскую кольцевой структурой – связаны формации инъекционных карбонатных тектонитов и высокотемпературных метасоматитов, контролирующих торий-урановое флюорит-барит-редкоземельное и золоторудное оруденения [24].

На основе интерпретации спутниковых магнитных аномалий, редуцированных для высоты

100 км, и на околоземных уровнях ~10–15 км, вычисленных по компонентной трехмерной модели МПЗ, проведено изучение неоднородностей строения земной коры Европы [19, 23, 25, 26]. По результатам исследований в Центральной Европе выявлены особенности глубинного строения геотермальных зон, выделены крупные ареалы развития флюидо-динамических систем и каналы вертикальной миграции флюидного потока. Это позволило оценить перспективы глубинной долговременной подпитки термальных вод на территориях Германии, Польши, Венгрии, Словакии и Чехии.

В результате исследования Восточной Европы в раннедокембрийской земной коре Балтийского щита по магнитным аномалиям на высоте 100 км и на околоземных уровнях ~10–15 км выявлена магнитоактивная зона “магнетитового” слоя с повышенными магнитными свойствами. Глубинный маркирующий горизонт магнитного комплекса расположен в интервале глубин от 10 до 15 км. В фундаменте раннедокембрийской земной коры Балтийского щита эта зона образует мощный магнитоактивный слой, подстилающий подошву гранитного слоя. Магнетитовый слой является источником формирования месторождений железистых кварцитов и благороднометалльного оруденения в тектонических структурах зеленокаменных поясов. Закономерность размещения магнетитового слоя в раннедокембрийской земной коре определяет рудогенерирующие процессы образования целого ряда полезных ископаемых. В результате гранитизационного процесса магнетитообразования возникают железорудные месторождения, представленные железорудной формацией магнетитовых кварцитов, золоторудных и золото-платинометалльных минерализаций. На примере Костомукшского месторождения Балтийского щита получены представления о глубинных особенностях золоторудной зоны в железистых кварцитах [19].

Исследование неоднородностей строения земной коры и литосферы Евразийского бассейна Северного ледовитого океана в районе хребтов Гаккеля, Ломоносова, Менделеева-Альфа и шельфа Новосибирских островов по геомагнитным данным позволило выделить каналы вертикальной миграции флюидного потока и оконтурить проникаемые геотермальные зоны, перспективные для развития железомарганцевых конкреций в труднодоступных районах Северного Ледовитого океана [27, 28].

По магнитным аномалиям на высотах 100 и 400 км в литосфере зон субдукции Курило-Камчатского и Колумбийского регионов выявлены горизонтальные и вертикальные слои с разными магнитными и плотностными свойствами [23, 26, 29]. По

результатам исследования выявлено, что магнитные неоднородности литосферы являются индикаторами зон пониженных температур мантии в зонах субдукции. Вблизи сейсмофокальных зон намечены возможные пути выхода флюидоподводящих потоков. На основе этих представлений предлагается методика выявления опасных зон наиболее вероятного проявления вулканической деятельности и землетрясений, а также намечены площади для электромагнитного мониторинга с целью краткосрочного прогноза активизации тектонической активности и контроля техногенного фактора. По результатам этих работ выделены площади для электромагнитного мониторинга с целью краткосрочного прогноза активизации тектонической активности и контроля техногенного фактора по выявлению опасных зон наиболее вероятного проявления вулканической деятельности и землетрясений.

На основе совместного анализа спутниковых и приземных измерений магнитного поля, а также расчетов аномалий околоземного космического пространства на высоте ~20 км выявлены свойства литосферы в районах газовых и нефтяных месторождений. Подтверждено наличие реологически ослабленных зон в земной коре и показана роль флюидных систем в подпитке месторождений углеводородов [19, 30, 31]. Геомагнитный метод прогноза долгоживущих месторождений нефти и газа по высотным моделям магнитного поля наибольший интерес представляет для поиска нефтегазоносных зон в труднодоступных областях суши и на шельфах арктических морей.

Области наибольших нефтескоплений Североморского рифта в Северном море на высоте 100 км расположены в зоне градиентов магнитных аномалий северо-восточного смещения западного и восточного блоков фундамента Северного моря. Анализ показал, что месторождения приурочены к положению выхода флюидоподводящих каналов [30].

Крупные месторождения углеводородов в нефтегазоносных бассейнах Баренцева, Средиземного и Северного моря приурочены к краевым частям коровых неоднородностей, выявляемых по спутниковым магнитным аномалиями и аномалиям околоземного космического пространства на высоте ~20 км [30–33].

Гигантское скопление углеводородов Куямбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазонакопления Восточной Сибири также проявляется в градиентной зоне магнитных аномалий на высотах 20, 100 и 400 км.

Особый интерес вызывает изучение специфики глубинного строения земной коры наиболее известных долгоживущих зон нефтегазоносности, подпитывающих месторождения из глубин

фундамента, таких как Ромашкинское в Татарстане, дающее нефть уже более полувека [30, 33]. Долгоживущее месторождение Ромашкинское, расположенное в градиентной зоне магнитных аномалий, четко проявляется на высотах 20, 100 и 400 км.

На площади Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) глубинные проницаемые зоны средней и нижней частей земной коры выявляются как по спутниковым измерениям в виде минимумов геомагнитного поля на высотах 100 км и 400 км, так и в аномалиях околоземного космического пространства на высоте ~20 км.

Исследование коровых неоднородностей нефтегазоносной зоны ЯНАО проведено с целью оценки перспектив долгожечности уже известных углеводородных месторождений за счет глубинной подпитки. Коровые неоднородности, в частности, реологически ослабленные слои, часто контролируют месторождения полезных ископаемых верхней части фундамента и осадочного чехла. В нефтегазоносных районах Северного, Средиземного и Баренцева морей ослабленные слои средней коры образуют сложнопостроенные флюидные системы, которые играют ведущую роль в процессе транспорта флюида к поверхности. Наличие основных элементов таких систем в виде ослабленных слоев и глубинных подводящих каналов является важным условием возобновляемости ресурсов. Выходящие из них каналы обеспечивают подпитку нефтегазовых месторождений осадочного чехла из глубин фундамента. В этом случае формирование месторождений происходит за счет восходящей миграции углеводородных флюидов через разломы, секущие кристаллический фундамент и нижние горизонты осадочного чехла. На настоящий момент эта концепция подтверждена на известных месторождениях – супергигантском Ромашкинском в Татарстане и Куямбинско-Юрубчено-Тохомском ареале нефтегазонакопления в Восточной Сибири [33].

Исследования по спутниковым геомагнитным картам и картам аномалий околоземного космического пространства позволяют выделить особенности глубинного строения нефтегазоносных бассейнов и наметить пути повышения ресурсного потенциала труднодоступных регионов Арктического бассейна [28, 32, 33].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, следует высоко оценить прикладную значимость мировой модели аномалий МПЗ по измерениям на спутнике *СНАМР* в условиях отсутствия космических магнитометрических съемок в России. В настоящее время возникает необходимость в проведении отечественных

магнитометрических съемок околоземного космического пространства с помощью космических аппаратов для разработки высокоточных высотных моделей МПЗ для решения не только геофизических, но и навигационных задач.

Отечественный и зарубежный опыт показывает на возможность достижения высоких точностей отечественных перспективных магнитометрических съемок и построения высокоточных моделей МПЗ и магнитных карт с ошибкой менее 5 нТл.

Магнитные съемки рекомендуется проводить не менее одного раза в пять лет на разных высотах: на высотах полетов КА (250–500 км); на высотах полетов самолетов (0.3–8 км); на земной поверхности и акваториях.

В промежутках между съемками должны регулярно проводиться измерения абсолютных значений магнитного МПЗ и его вариаций на сети обсерваторий и мобильных пунктах “векового хода” (один раз в 2.5–5 лет). В этом случае будут получены данные для осуществления надежного геофизического обеспечения с использованием МПЗ в околоземном космическом пространстве, в атмосфере, на поверхности Земли и в акваториях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд. ЛГУ, 1978.
2. Михлин Б.З., Селезнев В.П., Селезнев А.В. Геомагнитная навигация. М.: Машиностроение, 1976.
3. Гурьев И.С. Адаптивные магнитометрические системы контроля пространственного положения. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
4. URL://nvlaboratory.spb.ru.html (дата обращения 28.01.2016).
5. Долгинов Ш.Ш., Жузгов Л.Н. Статистические характеристики модульных и компонентных тесламетров. М.: ИЗМИРАН 1985. С. 37.
6. Техническое описание магнетометров КМ-2, КМ-5, КМ-8. М.: ИЗМИРАН, 1985.
7. Кузнецов В.Д. Использование магнитного поля Земли в проблемах ориентации и навигации. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. Т. 1. С. 424–432.
8. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников, ГОСТ 25645.126-85. Гос. комитет СССР по стандартам. М.: Изд. стандартов, 1986.
9. Русанова Н.В. Современные феррозондовые магнитометры, разработанные за рубежом // Геофиз. аппаратура. В. 57. Л.: Недра, 1975. С. 37–44.
10. Техническое описание микросхемы LMS 303 D. URL://www.ssec.hone-ywell.com/magnetic (дата обращения: 2.10.2015).
11. Американский исследовательский ИСЗ “Марсат” URL://epizodsspace.airbase.ru/bibl/ejeg/1980/80.html (дата обращения 28.01.2016).
12. Kaban M.K., Reigber C. New possibilities for gravity modeling using data of the CHAMP and GRACE satellites // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2005. V. 41. Iss. 11. P. 950–957.
13. Oersted Geomagnetic Mission. URL://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/oersted.html (дата обращения 28.01.2016).
14. Satellite & Systems. URL://op.gfz-potsdam.de/champ/systems/main\_SYS-TEMS.html (дата обращения 28.01.2016).
15. Программа Swarm. URL://coopi.khrunichev.ru/main.php?id = 6 (дата обращения 28.01.2016).
16. International Geomagnetic Reference Field. URL://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html (дата обращения 28.01.2016).
17. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Магнитные карты нового поколения для целей морской магнитной навигации // Труды XII всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА – 2014”. СПб. Нестор-История. 2014. С. 258–261.
18. Петрова А.А. Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля // Сб. трудов ИЗМИРАН, М.: 2015. С. 412–418.
19. 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. № 2. Т. 2. 2016. С. 88–96.
20. Иванов М.М. Оценка градиента аномального геомагнитного поля и его статистических характеристик по отдельным профилям в океане Исследование геомагнитного поля на акваториях морей и океанов // Сб. ИЗМИРАН. М.: 1978. С. 34–45.
21. Manda M., Thebault E. The Changing Faces of the Earth’s Magnetic Field. Paris. 2007.
22. Thebault E. et al. The magnetic field of the Earth’s lithosphere // Space Science Reviews. 2010. V. 155. P. 95–127.
23. Петрищев М.С. Глубинное строение термальных зон по результатам комплексирования геофизических полей. Вопросы и практики геологической интерпретации геофизических полей // Материалы 38-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. Пермь: Ги УрО РАН, 2011. С. 219–222.
24. Litvinova T., Petrova A. Heterogeneous structure of the lithosphere of the Taimyr Peninsula // Geophysical Research Abstracts. 2016. V. 18. EGU2016-12688. EGU General Assembly 2016.
25. Petrova A.A., Petrishchev M.S. Features of European geothermal structures by geomagnetic data // Programme book of the 5th IUPAP International Conference on Women in Physics. 5–8 August 2014. Waterloo, Canada, 2014.
26. Petrova A., Petrishchev M. Electromagnetic imaging of lithosphere permeable zones. EGU General Assembly 2014 // Geophysical Research Abstracts. 2014. V. 15. EGU2015-14065.
27. Litvinova T., Petrova A. Lithospheric sources of magnetic anomalies of the Aldan shield and Alpha Ridge // Geophysical Research Abstracts. 2013. V. 15. EGU General Assembly. Vienna, Austria. EGU2013-2578.

28. *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. 2014. № 2. P. 31–34.
29. *Vargas T.S., Dewhurst T.W., Lopez J. et al.* Subsurface Structures Using Mt Images And Heated Fluid Distribution Beneath Nevado Del Ruiz Volcano Xv Congreso Colombiano De Geología // Innovar en Sinergia con el Medio Ambiente. Bucaramanga. Colombia. 2015. С. 1–22.
30. *Petrova A., Demina I., Petrishchev M.* Detection of the deep approach fluid channels in the oil-and-gas basins using the geomagnetic data (North and Norwegian Seas) // Proc. 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM). 1–5 August 2011. Trondheim, Norway. P. 523–529.
31. *Петрова А.А.* Флюидные системы Средиземноморья // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. Вып. № 17. С. 23–33.
32. *Литвинова Т.П.* Проявление зон нефтегазогенерации Берингова моря в приземных магнитных аномалиях и аномалиях спутника Чамп // Региональная геология и металлогения. № 54. СПб. ВСЕГЕИ. 2013. С. 17–24.
33. *Копытенко Ю.А.* Пути повышения ресурсного потенциала Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках проекта “Урал промышленный – УРАЛ Полярный” по геомагнитным данным // Доклады и материалы межрегионального проекта “Дни науки и инноваций Санкт-Петербурга в Ямало-Ненецком автономном округе”. Санкт-Петербург–Салехард–ЯНАО: Изд-во ООО “Артвид”, 2011. С. 40–63.