

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СРАВНЕНИЕ ОБРАЗОВ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК И МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА В ПОЛЕ ЛИТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

© 2025 г. Л. М. Абрамова^{1,*}, Д. Ю. Абрамова²

¹Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта,
Москва, Троицк, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия

*E-mail: labramova@igemi.troitsk.ru

Поступила в редакцию 23.09.2024 г.

Карты пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий для трех областей нахождения горячих точек: Гавайской, Афар и Исландской проанализированы с целью решения междисциплинарной задачи взаимодействия горячих точек и мантийных плюмов с литосферой. Для построения магнитных образов плюмов и горячих точек использованы данные измерений геомагнитного поля, полученные искусственным спутником Земли CHAMP на уровне 280–260 км за 2010, последний, год его работы, когда высота орбиты была минимальной. Дополнена созданная ранее база параметров аномального магнитного поля для регионов Эфиопии и Исландии, получены новые данные для части акватории Тихого океана, где находится Гавайская горячая точка. Построены карты поля литосферных магнитных аномалий для центральной части Тихого океана, Восточно-Африканской рифтовой зоны и Северной Атлантики. Показано, что магнитные образы горячих точек различного типа: океанической Гавайской, континентальной Эфиопской и островной Исландской проявляются в литосферном поле по-разному, отражая особенности тектонических процессов, проходивших ранее и развивающихся в настоящее время на рассматриваемых территориях. Подтверждено, что использование спутниковых геомагнитных наблюдений в областях с плюмовой деятельностью в совокупности с другими геолого-геофизическими данными регионального масштаба могут добавить ценную информацию в общую картину исследования этих тектонических процессов.

Ключевые слова: литосферные магнитные аномалии, геомагнитные данные, спутник CHAMP, мантийные плюмы, горячие точки, Гавайи, Афар, Исландия

DOI: 10.31857/S0205961425020049, EDN: EJKDLL

ВВЕДЕНИЕ

Горячие точки (*hot points*) – это поверхностные проявления мантийных плюмов, сфокусированные зоны мантийного плавления. Они являются завершением процесса образования мантийного плюма на поверхности Земли. Горячим точкам свойственны пониженные сейсмические скорости, высокий тепловой поток и активный вулканизм. Схематичное изображение плюма и сопутствующей ему горячей точки показывает рис. 1.

Гипотеза мантийного плюма была предложена Д. Уилсоном (Wilson, 1963) и У. Морганом (Morgan, 1971) для объяснения природы источников Гавайской и Исландской вулканических горячих точек.

Мантийный плюм – это потоки вязкой плавучей массы материала мантии, которая в силу своей повышенной плавучести продвигается от основания мантии к поверхности Земли в виде горячей струи расплава (Loper, 1991; Maquyama, 1994; Pirajno, 2004; Добрецов, 2008).

Лабораторные эксперименты с плюмами в жидкости показали, что плюм имеет грибовидную форму (рис. 1). Большая сферическая головная часть плюма растет медленно, в то время как наполнение горячим материалом ствола более быстрое. Когда головная часть плюма достигает подошвы литосферы, она уплощается и начинает распространяться в горизонтальном направлении. Головы плюмов могут иметь диаметр от 500 до 3000 км, в то время как диаметр “стволов” (или “хвостов”) плюмов обычно лежит в пределах от 100 до 500 км.

Плюмы и горячие точки – это ключ ко многим вопросам динамики мантии. Гипотезы, предлагаемые для объяснения их происхождения и строения, к сожалению, зачастую радикально отличаются друг от друга и, естественно, могут быть поддержаны только косвенными наблюдениями. Здесь остается много проблем, требующих разностороннего изучения: существуют ли различные типы плюмов, и все ли плюмы зарождаются на одной и той же глубине? Почему некоторые плюмы зарождаются

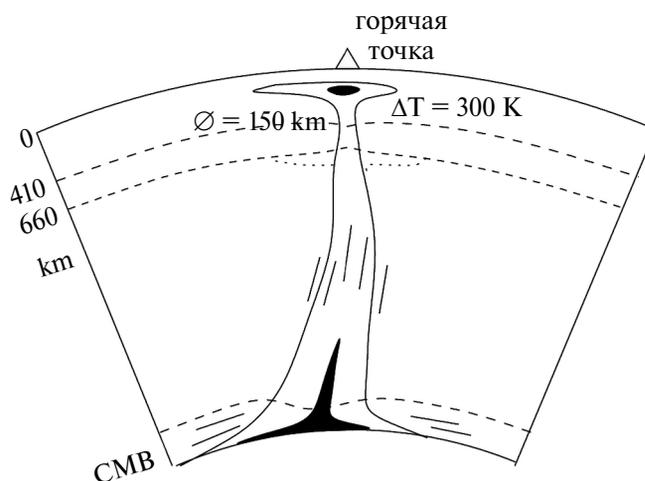


Рис. 1. Мантийный плюм и соответствующая ему горячая точка. СМВ – граница ядро – мантия (Nataf, 2000).

на термальных границах, залегающих на меньшей глубине и т.п. Для таких исследований особенно полезными оказались гравиметрические и сейсмологические методы, а также геохимический анализ извергнутой лавы.

Существенной является междисциплинарная задача исследования взаимодействия плюма с литосферой, где в ее решении серьезную роль может играть аномальное магнитное поле. Численные модели геодинамических процессов пытаются объединить эти наблюдения в единую общую картину.

Процесс наблюдений геофизических и геохимических параметров на океанических акваториях и пустынных территориях очень сложен и дорог. Поэтому лишь несколько океанических горячих точек изучены до настоящего времени этими методами.

Для исследований свойств плюмов и горячих точек эффективно и практически использовать магнитную съемку, осуществляемую низколетящими околоземными спутниками, поскольку этот метод, во-первых, является в настоящее время одним из наиболее дешевых и доступных. А во-вторых, спутниковые параметры, измеряемые непрерывно в течение нескольких лет, обеспечивают беспрецедентный равномерный глобальный охват земной поверхности, что делает их весьма перспективными для изучения региональной тектоники, глубинного картирования неоднородностей литосферы в комплексе с другими геофизическими методами.

Материалы германского искусственного спутника CHAMP, запущенного 15 июля 2000 г. и поставившего более 10 лет (до сентября 2010 г.) высокоточные данные измерений геомагнитного поля Земли (Reigber et al., 2002), предоставляют прекрасную возможность использовать их для анализа ли-

тосферных магнитных аномалий (ЛМА) некоторых плюмов (Абрамова и др., 2018, 2020, 2023).

Целью настоящей работы является изучение генетических связей и особенностей пространственного распределения поля спутниковых ЛМА с протекающими в недрах Земли тектоническими процессами, которые явились источниками горячих точек и плюмов в трех независимых областях земного шара.

Для проведения анализа были существенно дополнены базы спутниковых данных для регионов Африки и Исландии, где уже частично имелись необходимые материалы, а главное, была создана новая база данных для части акватории Тихого океана, где находится Гавайская горячая точка. Методика обработки экспериментальных геомагнитных спутниковых измерений, позволяющая выделять региональную составляющую литосферного аномального магнитного поля достаточно надежно и с высокой точностью, подробно описана в предыдущих работах (Абрамова и др., 2014). Хотелось бы отметить, что материалы спутника CHAMP, полученные в последние годы его работы на высотах орбиты 300 км и ниже, отличаются от данных предыдущих лет более высокими значениями амплитуд измеряемых геомагнитных полей, что обусловлено снижающейся высотой полета, т.е. приближением магнитометров к источнику поля. По этой причине для анализа распределения поля ЛМА были обработаны данные спутника CHAMP именно за 2010 г., равномерно покрывающие области земной поверхности, топографически относящиеся к исследуемым регионам. Количество значений, использованных для анализа аномального магнитного поля каждого региона, составляло ~10000–12000, что обеспечило соответствие детальности построения пространственного распределения поля литосферных аномалий масштабу обсуждаемых тектонических структур.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Измеренное на спутнике CHAMP геомагнитное поле является суперпозицией следующих составляющих: главного геомагнитного поля, генерируемого источниками магнитогидродинамической природы, расположенными в жидкой части земного ядра; поля магнитных аномалий, связанного с намагниченностью горных пород, слагающих литосферу; внешних полей магнитосферно-ионосферных токовых систем; индуцированных полей, возникающих в проводящих слоях земной коры и верхней мантии.

Обработка данных заключается в выделении из экспериментальных данных аномальной части, связанной с намагниченностью литосферы: из измеренных значений полного геомагнитного поля необходимо исключить все остальные составляющие, по возможности максимально адекватно описывая их с помощью существующих на сегодняшний день математических моделей.

При удалении из суммарного поля вклада главного магнитного поля обычно используют коэффициенты Международной аналитической модели IGRF, однако в случае использования данных CHAMPа оказывается целесообразным применение среднесуточной сферической гармонической модели (ССГМ) главного магнитного поля. Дело в том, что заданные специальным образом параметры орбиты спутника CHAMP обеспечивают получение экспериментальных значений геомагнитного поля в узлах практически равномерной сетки над всей поверхностью Земли, что делает возможным построение среднесуточной модели по технологии, предложенной в работе (Головков и др., 2007). Данный подход позволяет с помощью разложения компонент поля, полученных спутником в течение суток, по сферическим гармоникам до степени и порядка 14 построить среднесуточную сферическую гармоническую модель (ССГМ) главного магнитного поля для каждого конкретного дня, а не усредненную за длительный (годовой) интервал времени как IGRF. Таким образом, используя коэффициенты ССГМ для решения задачи вычленения литосферного поля из измеренного полного, мы удаляем вклад главного поля более корректно, моделируя его именно на рассматриваемом временном отрезке.

Геомагнитные данные со спутника CHAMP отобраны и обработаны только для спокойных в магнитном отношении дней (соблюдались ограничения $k_p \leq 2$ и D_{st} индекс в пределах 20 нТл).

Чтобы уменьшить искажающее влияние на результаты анализа солнечно-суточной вариации S_q , к рассмотрению принимались только витки, совер-

шенные спутником в ночное время (LT от 22.00 до 6.00).

Таким образом с применением специально разработанной технологии выделения данных аномально-литосферного магнитного поля из общего объема записей, поставляемых спутником CHAMP, была создана обширная база экспериментальных данных поля ЛМА на разных уровнях орбиты спутника для трех областей нахождения горячих точек: регионов Африки и Исландии и для части акватории Тихого океана, где находится Гавайская горячая точка.

Для проверки надежности построений пространственных распределений поля для каждого рассматриваемого региона расчет выполнялся для нескольких независимых наборов спутниковых данных. Сопоставление полученных вариантов подтвердило достаточно надежное воспроизведение пространственной структуры ЛМА.

ОБРАЗЫ ЛИТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ НАД ОКЕАНИЧЕСКОЙ ГАВАЙСКОЙ ГОРЧЕЙ ТОЧКОЙ

Из всех известных к настоящему времени океанических горячих точек мира Гавайская – одна из самых долго живущих. Она же является одной из наиболее подробно изученных: при проведении исследований применялись методы сейсмической томографии, геохимические и петрологические методы.

Гавайские острова расположены в северной части Тихого океана (между 19° N и 29° N), Гавайский архипелаг вытянут с северо-запада на юго-восток и состоит из 24 островов и атоллов.

Установлено, что ответственные за создание цепи Гавайских островов и подводных гор вулканические процессы являются следствием перемещения океанической литосферы над мантийным плюмом, образовавшимся из-за неустойчивостей в горячем пограничном слое мантии Земли (Wilson, 1963; Morgan, 1971). Гавайи образуют линейную цепочку островов постепенно возрастающего возраста, причем, что важно, происходит это вдали от активных областей иной природы, которые могли бы оказать влияние на ее происхождение. По-видимому, это почти идеальная стационарная горячая точка, произведенная мантийным плюмом, находящимся под движущейся литосферной плитой (Nataf, 2000). Горячая точка в настоящее время находится на о. Гавайи в юго-восточной оконечности цепи Гавайских островов (рис. 2). Плюм продуцирует цепь вулканов, при этом на поверхности плиты образуются вулканические острова, погружающиеся острова, подводные горы гайоты и т.п.

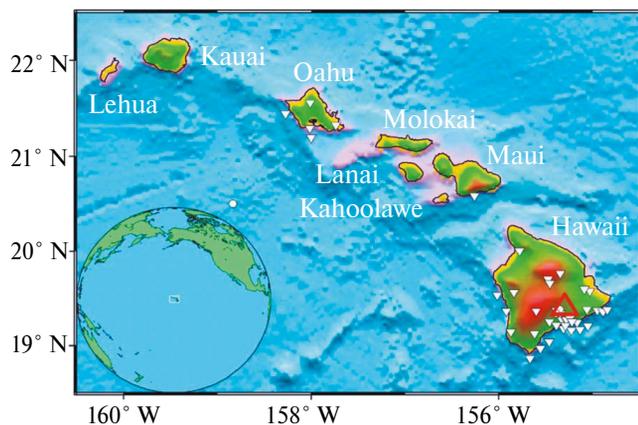


Рис. 2. Район исследований Гавайской горячей точки. Белые точки сейсмические станции и землетрясения. Горячая точка обозначена красным треугольником. Расположение исследуемой территории показано на вставке в виде прямоугольной рамки в центре Тихого океана (Lei, Zhao, 2006).

Глобальные томографические модели, построенные по телесеismicким данным, дают изображения аномалий низких скоростей на мантийных глубинах, которые указывают на наличие мигрирующего расплава плюма вверх к действующим вулканам (Wolfe et al., 2002; Li et al., 2000). В результате исследований (Lei, Zhao, 2006) удалось зафиксировать магматический канал, пересекающий литосферу и питающий вулканы, а также простирающуюся в юго-восточном направлении низкоскоростную аномалию вдоль Гавайских островов (рис. 3а). На всех глубинных уровнях мантии в окрестности Гавайской горячей точки наблюдается значительная низкоскоростная аномалия, морфология, местоположение и амплитуда которой меняются с глубиной. Эта аномалия имеет сходную форму на разных глубинах в верхней мантии, ниже средней мантии она постепенно смещается к северо-востоку, в нижней мантии уменьшается в размерах и амплитуде, а у основания мантии снова становится сильнее. Такой результат предполагает, что это самостоятельный цельно мантийный плюм, исходящий от границы ядро – мантия. Анализ геометрии Гавайской горячей точки томографическими методами показывает, что область влияния плюма на скоростные свойства среды достигает более чем 1000 км в диаметре и вытянута в соответствии с направлением движения плиты на юго-восток (Davies, 1988; Sleep, 1990).

Тем не менее, остается много нерешенных фундаментальных вопросов взаимодействия мантийного плюма и литосферы, в частности, в какой степени нагрев литосферы влияет на магнитные свойства слагающих нижнюю кору пород и каковы масштабы этого воздействия. Ответы на подобные вопросы и дополнительную геофизическую информацию

могут дать спутниковые исследования поля ЛМА акватории Гавайских островов.

С целью анализа отражения Гавайского плюма в пространственном распределении аномально-го литосферного поля по геомагнитным данным спутника CHAMP за последние пять месяцев его работы в 2010 г. были построены карты ЛМА изучаемого региона различных масштабов и параметров осреднения на уровне ~280–260 км. На рис. 4 представлен пример карты T_a поля ЛМА для области акватории Тихого океана с координатами 0°–28° N и 170°–142° W. Гавайский архипелаг показан в виде цепочки островов, расположенной примерно в секторе 8°–22° N и 160°–154° W.

В полученном пространственном распределении поля ЛМА условно можно выделить три большие зоны. В южной части карты вблизи экватора наблюдается область слабо положительных значений аномального магнитного поля, близких к нулевым. В северной части карты положительные значения ЛМА несколько больших амплитуд характеризуют поле северной части Тихоокеанской океанической плиты. Через центральную часть карты проходит полоса отрицательных ЛМА, причем самые яркие из них наблюдаются именно над восточной частью цепи Гавайских островов, и, в частности, острова Гавайи, где сейчас находится Гавайская горячая точка. Наиболее низкие отрицательные значения, порядка – 6 нТл, наблюдаются в области, расположенной непосредственно над предполагаемым положением головы Гавайского плюма.

Карта обсуждаемой отрицательной литосферной магнитной аномалии более крупного масштаба, построенная с осреднением по блокам размером 40 × 40 км, обеспечивающим повышенное пространственное разрешение, была приведена выше на рис. 3б.

Значимым результатом является то, что рассматриваемая область отрицательных ЛМА в районе Гавайской горячей точки имеет размеры, вполне сопоставимые с обнаруженной телесеismicкими методами низкоскоростной аномалией. Контур отрицательной ЛМА вытянут на юго-восток, что отражает движение литосферной плиты над горячей точкой (Davies, 1988; Sleep, 1990) в этом направлении. Объяснение причин отрицательной аномалии, наблюдаемой над океанической Гавайской горячей точкой, по-видимому, заключается в том, что активные процессы разогрева астеносферы материалом плюма существенно поднимают уровень поверхности, на котором достигается температура Кюри для ферромагнитных минералов, что ведет к сокращению мощности магнитоактивного слоя.

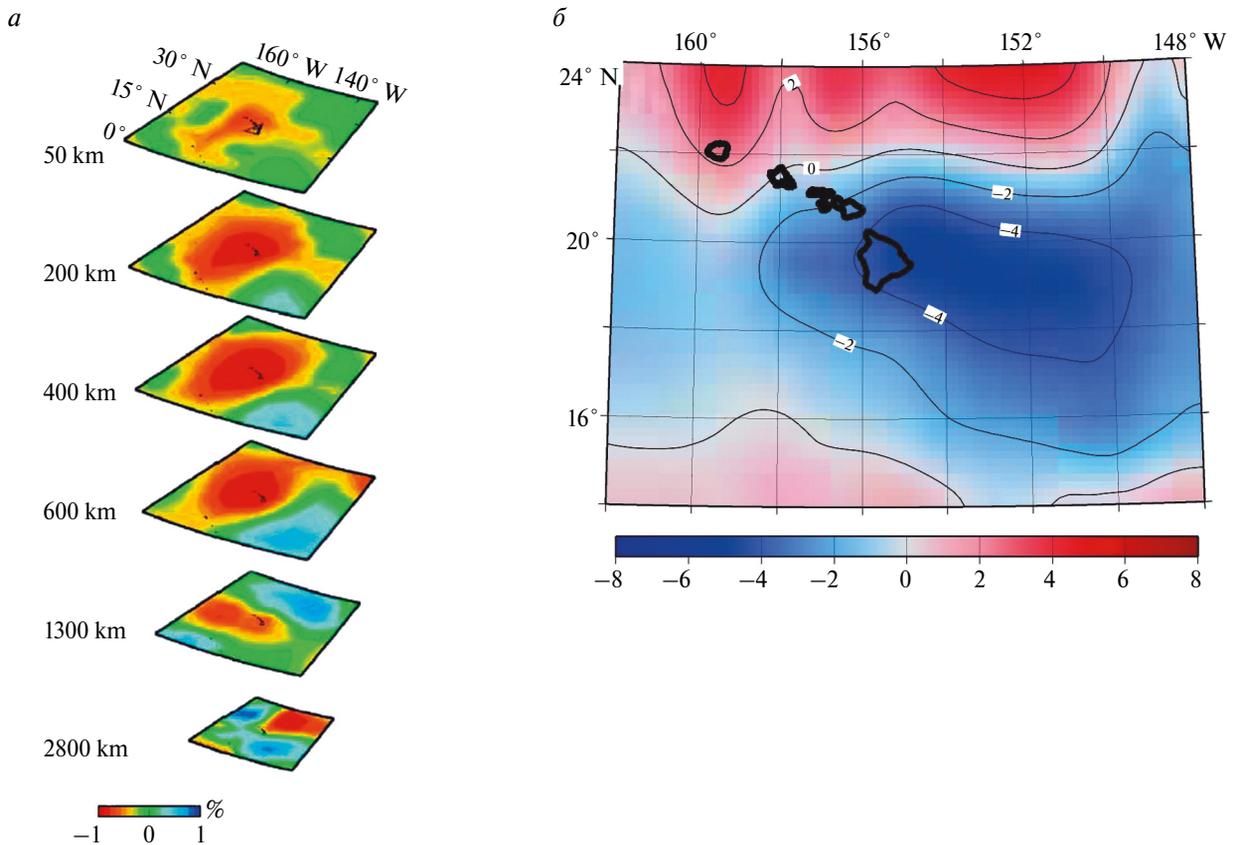


Рис. 3. (а) Результат сейсмической томографии скоростей p -волн под Гавайской горячей точкой на некоторых репрезентативных глубинах, число слева – глубина (км) каждого слоя. Цветом обозначено отклонение в процентах скоростей в меньшую (красный) или большую (синий) сторону от средней мантийной скорости (на основе (Lei, Zhao, 2006)).

(б) Распределение поля ЛМА (T_0) в районе исследования. Карта построена с использованием медианного осреднения по блокам размером 40×40 км средствами GMT (*blockmedian*) (Wessel, Smith, 2007). Значения шкалы в нТл.

ЛИТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НАД ГОРЯЧЕЙ ТОЧКОЙ АФАР

Континентальная горячая точка Эфиопия / Афар, о которой пойдет речь, является одной из самых известных геофизических и геохимических аномалий на Земле.

В отличие от Гавайской горячей точки, источником которой был плюм, поднимающийся здесь непосредственно от границы ядро–мантия, горячая точка Афар является продуктом более сложных процессов плюмовой активности, а именно сложного движения так называемого Эфиопского плюма, массовые излияния которого произошли 30–37 млн лет назад. По современным представлениям, источником мантийного вещества для него был Африканский суперплюм (АСП), крупномасштабная структура, расположенная у основания мантии, с центром под Южной Африкой (Ritsema, et al., 1999; Fouch et al., 2004).

Согласно проведенным в разные годы геолого-геофизическим исследованиям, мантийный по-

ток, произведенный АСП, продолжается от Южной Африки на северо-восток в виде широкого аномального апвеллинга (Ritsema, Allen, 2003; Simmons, et al., 2007; Forte et al., 2010; Hansen et al., 2012). Как представляют построенные по данным сейсмических исследований модели, мантийный поток поднимается из нижней мантии в переходную зону, затем пересекает ее под северной Замбией или южной Танзанией, поднимается далее в верхнюю мантию и продолжается в северо-восточном направлении под Кению, Восточно-Африканскую рифтовую зону, Эфиопию к западной Аравии.

Современная тектоника территории, включающей в себя Эфиопское плато и Восточно-Африканскую рифтовую зону, достаточно хорошо изучена сейсмическими методами. Глобальные томографические исследования сейсмических скоростей на продольных и поперечных волнах обнаружили низкоскоростную аномалию значительных размеров, расположенную в верхней мантии под этими территориями, предположительно, с геометрическим центром под котловиной Афар, название которой

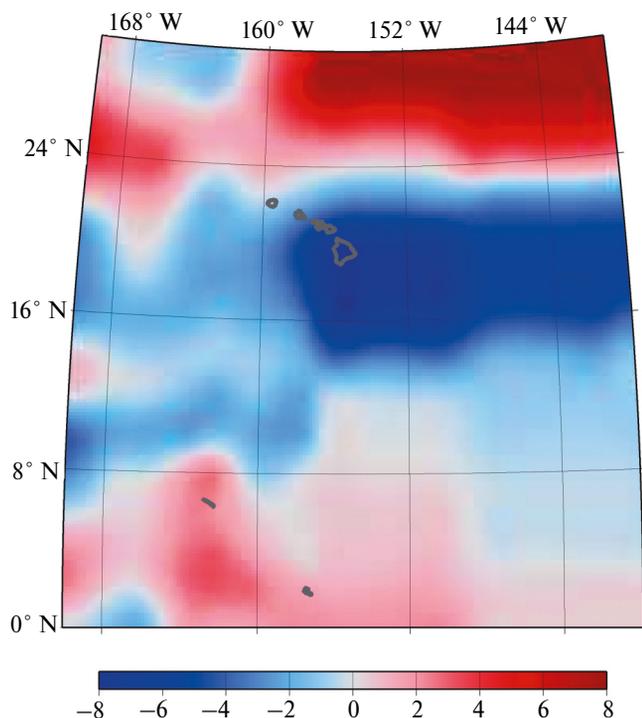


Рис. 4. Распределение поля ЛМА (T_a) над частью акватории Тихого океана. При построении использовано медианное осреднение по блокам размером 80×80 км средствами GMT (*blockmedian*) (Wessel, Smith, 2007). Значения шкалы в нТл.

и получила горячая точка (Ritsema, Allen, 2003; Montelli et al., 2006; Simmons et al., 2007).

Однако возник дискуссионный вопрос, в решение которого могут внести ясность исследования ЛМА региона. В настоящее время рассматривается два варианта томографических моделей нахождения горячей точки на этой обширной территории. Так, модели, построенные по данным глобальных исследований, как было отмечено выше, показывают самые низкие скорости под депрессией Афар (местоположение обозначено AF на рис. 5), что продолжительное время и интерпретировалось как центр горячей точки. В то же время, при анализе моделей регионального масштаба с более высоким разрешением скоростных параметров оказывается, что наименьшие сейсмической скорости проявляются под Главным Эфиопским рифтом юго-западнее депрессии Афар (Bastow et al., 2008; Benoit, et al., 2006).

Для оценки влияния на литосферное аномальное магнитное поле магматических процессов, протекающих на территории Эфиопия / Афар, мы дополнили ранее созданную базу спутниковых магнитных данных материалами, полученными на более низких высотах орбиты спутника CHAMP, когда он в силу завершения миссии терял высоту.

На рис. 5 приведена карта пространственного распределения T_a поля ЛМА для части территории Эфиопское плато / Восточно-Африканская рифтовая зона в секторе с координатами 4° – 14° N и 34° – 46° E, построенная по материалам спутника CHAMP, полученным на высоте 260 км. Использовано медианное осреднение по блокам размером 40×40 км средствами GMT (*blockmedian*) (Wessel, Smith, 2007).

Низкие значения поля ЛМА над Эфиопским плато и в особенности в зоне Главного Эфиопского рифта, по-видимому, вызваны тем, что в течение долгого времени здесь происходил прогрев нижней коры мигрировавшим мантийным веществом, что привело к потере ею магнитных свойств. Такое пространственное положение магнитной аномалии находится в хорошем согласии с обнаруженной здесь по данным сейсмической томографии областью пониженных сейсмических скоростей, которая также является следствием повышенной пластичности мантийного расплава в результате прогрева верхней мантии веществом плюма и отражает эти процессы.

На общем фоне отрицательных значений поля ЛМА выделяются расположенные практически на одной широте по обе стороны Главного Эфиопского рифта (MER) две отрицательные аномалии с центрами 7.5° N / 38° E и 7.5° N / 41.5° E, значения T_a в которых опускаются до -16 – 20 нТл. Можно предположить, что эти области низких значений являются образом единой аномалии с пониженными магнитными свойствами, разделенной на две части Главным Эфиопским рифтом, который на рис. 5 обозначен пунктирными линиями.

Севернее значения поля ЛМА становятся положительными с невысокой величиной амплитуды T_a , причем одна из этих областей расположена непосредственно над депрессией Афар. Положительные значения аномального литосферного поля T_a свидетельствуют о том, что некоторая намагниченность вещества нижней части коры все еще имеет место и, соответственно, о том, что прогрев нижней части земной коры и подъем поверхности Кюри магнетита происходит здесь более медленно.

Таким образом, ярко выраженные отрицательные ЛМА, приуроченные к области Главного Эфиопского рифта хорошо согласуются с томографическими образами сейсмических скоростей, в частности, со скоростной моделью p -волн горячей точки, которая была построена авторами (Hansen, Nyblade, 2013) при проведении региональных исследований, являясь, таким образом, подтверждением именно этой гипотезы.

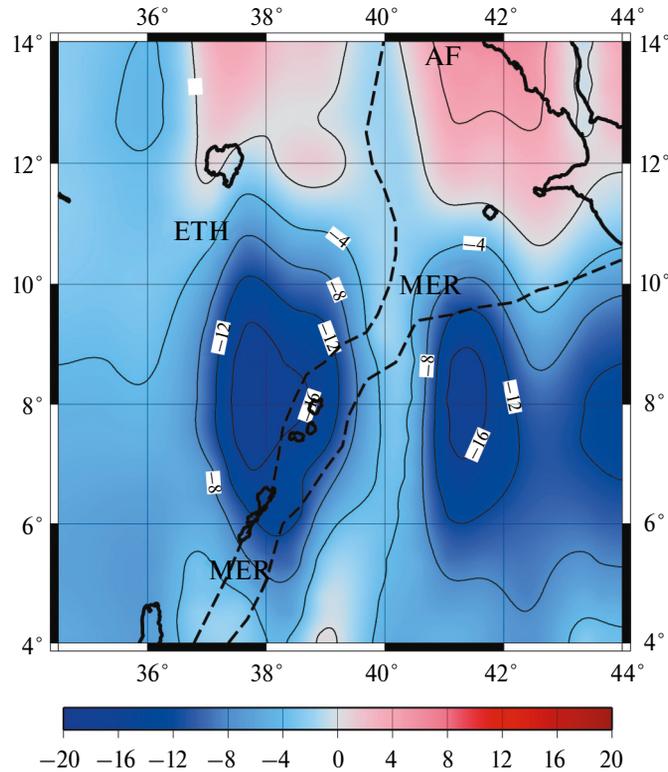


Рис. 5. Карта ЛМА (T_a) над территорией Эфиопское плато / Восточно-Африканская рифтовая зона. Буквами обозначены: ETH – Эфиопское плато; AF – котловина Афар; MER – Главный Эфиопский рифт. Значения шкалы в нТл.

ЛИТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ ИСЛАНДСКОЙ ГОРЯЧЕЙ ТОЧКИ

Окрестности острова Исландия, на территории которого находится горячая точка, являются одним из самых активных вулканических регионов в мире: сильные извержения здесь происходят, в среднем, примерно каждые три года.

Расположение Исландии практически на оси Срединно-Атлантического хребта, где происходит спрединг Евразийской и Северо-Американской плит, отчасти является причиной этой интенсивной вулканической активности. Кроме этого, тектоническая картина усложняется происходящими здесь магматическими процессами, связанными с деятельностью мантийного плюма.

Исландская горячая точка наиболее доступна и хорошо изучена. Это обусловлено тем, что остров обитаем и достаточно велик для постоянной регистрации сейсмических скоростей и расстановки переносных пунктов наблюдения (Wolfe et al., 1997; Foulger et al., 2005; Darbyshire et al., 2000; Rickers et al., 2013).

Для анализа общей картины пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий, вызванных воздействием Исландской горячей точки и плюма, были использованы экспери-

ментальные данные спутника CHAMP за 2010 год, когда он находился на уровне 280 км. На рис. 6 показана карта поля ЛМА (T_a) над областью Северной Атлантики с координатами 11°–25° W и 63°–67° N. Использовано медианное осреднение по блокам размером 100 × 100 км средствами GMT (Wessel, Smith, 2007).

Приведенная карта ЛМА является отражением суммарного воздействия спрединга в области Срединно-Атлантического хребта, положение которого обозначено на рис. 6 сплошной жирной линией, и молодого мантийного плюма (Darbyshire et al., 2000; Hjartarson et al., 2017).

Практически вдоль всего протяжения Срединно-Атлантического хребта аномальное магнитное поле над этой частью Северной Атлантики понижено. По данным сейсмической томографии под Норвежско-Гренландским бассейном прослеживается интенсивная низкоскоростная аномалия, которая, по-видимому, отражает процессы спрединга, протекающие не только непосредственно вдоль оси Срединно-Атлантического хребта, но и по его периферийным ответвлениям (Bijwaard, Spakman, 1999; Яковлев и др., 2012; Rickers et al., 2013). Активные процессы разогрева астеносферы поднимают к поверхности уровень, на котором достигается температура точки Кюри для ферромагнитных

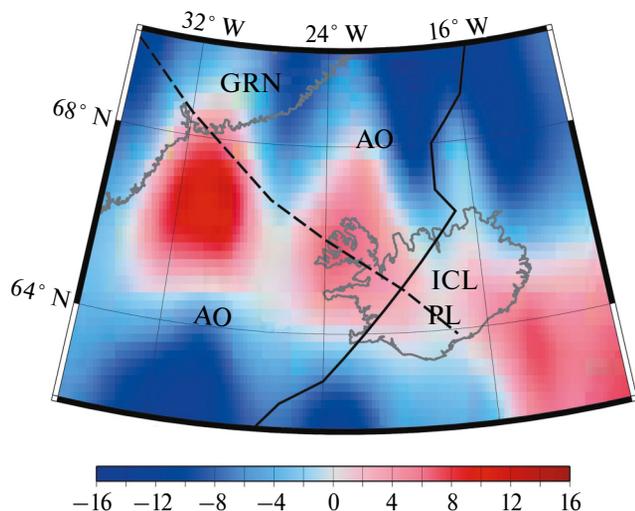


Рис. 6. Карта ЛМА (T_a) на высоте 280 км над Северной Атлантикой; АО – Атлантический океан; GRN – о. Гренландия; ICL – о. Исландия; жирная сплошная линия – положение Срединно-Атлантического хребта; пунктир – предполагаемая траектория прохождения Исландского плюма; RL – современное положение плюма и Исландской горячей точки. Значения шкалы в нТл.

минералов, что ведет к сокращению мощности магнитоактивного слоя литосферы и объясняет низкие значения аномального магнитного поля в океанической части. Кроме того, по данным этих же авторов в результате глобальных и региональных томографических исследований рассматриваемого региона получены убедительные доказательства наличия под Исландией аномалии скорости сейсмических волн, соответствующей горячему магматическому каналу диаметром ~ 100 км, который достигает нижней мантии и порождает мантийный плюм. Таким образом, к активному воздействию спрединга вдоль оси Срединно-Атлантического хребта добавляется влияние разогрева астеносферы плюмом, поднимающим уровень глубины, на которой достигается температура Кюри для ферромагнитных минералов, что приводит к сокращению мощности магнитоактивного слоя литосферы и, соответственно, низким значениям литосферного аномального магнитного поля.

Через середину обширной области отрицательного аномального поля – от восточного края Гренландии до шельфа Фарерских островов – в юго-восточном направлении проходит пояс изометрических положительных аномалий. Их природа может быть связана с погружением отдельных частей (микроплит) разрушавшейся древней коры, сохранивших значительную намагниченность, под активные области, в период мощной тектонической активизации, в том числе, в процессе прохожде-

ния Исландского плюма (Allen et al., 2002; Foulger, Anderson, 2005).

Представляется интересным рассмотреть подробнее детальное распределение поля T_a ЛМА непосредственно над островом Исландия, где в настоящее время находятся горячая точка и производший ее мантийный плюм.

Известно, что под комплексом Бардар-Бунга-Гримсвогн – одним из наиболее активных современных вулканических регионов в Исландии, спродуцировавшим в 1783 г. невероятно мощное извержение щитового вулкана Лаки, сосредоточена обширная низкоскоростная аномалия. Томографическими исследованиями сейсмических скоростей установлено, что эта аномалия обусловлена системой, подающей мантийный расплав к поверхности острова, и представляет собой сейсмический образ мантийного плюма, обеспечивающего поступление расплава в верхние магматические камеры, где происходит современное формирование земной коры (Allen et al., 2002).

Для сопоставления образов ЛМА и сейсмической скорости были дополнительно отобраны и обработаны экспериментальные геомагнитные данные спутника CHAMP на уровне орбиты 260 км непосредственно для территории о. Исландия, что позволило построить распределение поля ЛМА с большей детальностью.

На представленной карте T_a (рис. 7а) видно, что значения амплитуды поля ЛМА магнитной аномалии в центральной части острова ниже по сравнению с северо-западной и юго-восточной окраинами.

На рис. 7б для сопоставления приведен вертикальный разрез относительных значений сейсмической скорости для трехмерной (3D) модели вдоль профиля NW – SE (Allen et al., 2002). В верхней части коры, как следует из модельных построений, область пониженных скоростей распределена под обширной территорией современной вулканической активности, в то время как в нижней коре на глубине более 15 км низкоскоростная область сужается до вертикального цилиндра, расположенного практически под серединой острова. В целом, как было сказано выше, эта низкоскоростная структура интерпретируется сейсмологами как образ канала, поставляющего разогретое мантийное вещество под центральную Исландию, где широко распространены зоны современных действующих вулканов.

Пространственное распределение аномального литосферного магнитного поля (T_a), полученное в данном исследовании, хорошо согласуется с томографическими данными. Область положения канала Исландского плюма, как видно из рис. 7а, характеризуется пониженными значениями ампли-

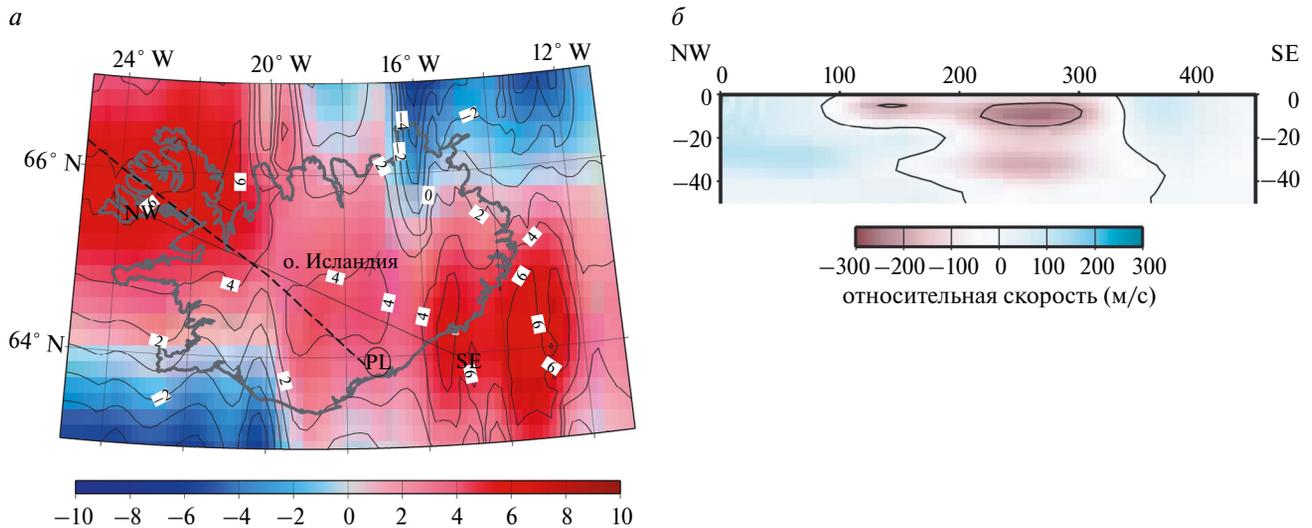


Рис. 7. (а) Пространственное распределение поля ЛМА (T_a) на уровне 260 км над территорией о. Исландия. Пунктиром обозначена траектория прохождения Исландского плюма; сплошная тонкая линия – сейсмический профиль NW – SE; PL – современное положение горячей точки. Значения шкалы в нТл.
(б) Вертикальный разрез аномалий сейсмической скорости для трехмерной модели вдоль профиля NW – SE на территории Исландии (Allen et al., 2002).

туды T_a ЛМА, что свидетельствует о частичной потере магнитных свойств материала земной коры под действием высоких температур, связанной с влиянием нагрева литосферы в окрестности Исландской горячей точки в результате поступления мантийного вещества. По-видимому, можно полагать, что и низкоскоростная сейсмическая аномалия, и пониженные значения аномального литосферного магнитного поля имеют своей причиной тепловое влияние системы каналов расплава, управляемых плюмом, и связаны как с притоком магмы вертикально вверх в верхнюю кору, так и с растекающейся из нижней коры в центральной Исландии вдоль рифтовой системы верхней коры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Рассмотренные магнитные образы горячих точек различного типа: океанической Гавайской, континентальной Эфиопской и островной Исландской продемонстрировали, что пространственная картина поля ЛМА над этими территориями проявляются по-разному, отражая особенности тектонических процессов, результатами которых они являются.

Над океанической Гавайской горячей точкой выделенный образ ЛМА четко выражен как изометричная отрицательная аномалия непосредственно над областью предполагаемого положения головы плюма. Это, по-видимому, говорит о том, что достаточно тонкая океаническая литосфера быстро прогревается горячим расплавом, поднимающим-

ся к поверхности по системе каналов, управляемых плюмом, вследствие чего происходит существенная потеря магнитных свойств составляющего ее материала. Геометрия магнитного образа Гавайской горячей точки показывает, что аномалия окружена значительной “областью влияния” с размерами более 1000 км в диаметре, но меньшей амплитудой магнитного поля, и вытянута в направлении на юго-восток, что отражает траекторию движения океанической плиты над мантийным плюмом.

Континентальная горячая точка Эфиопия / Афар является продуктом более сложных процессов плюмовой активности, а именно прохождением в северо-восточном направлении в данном регионе потока мантийного материала, так называемого Эфиопского плюма, расположенного в верхней мантии, который по современным представлениям был спродуцирован Африканским суперплюмом. Полученный по спутниковым данным образ отрицательной ЛМА, как бы разрезанной Главным Эфиопским рифтом на две части по обе стороны от него, позволяет предположить, что горячая точка Афар находится именно здесь, под Главным Эфиопским рифтом, а не под депрессией Афар.

Подобно магнитному образу Гавайской горячей точки, отрицательная аномалия Афар четко выражена, характеризуется значительными амплитудами и, так же как первая, находится в хорошем согласии с томографическими образами моделей сейсмических скоростей, зафиксированных региональными исследованиями.

Образы Исландской горячей точки и Исландского плюма, построенные по данным спутника CHAMP, не так отчетливы и однозначны. Являясь результатом последствий сложных масштабных тектонических процессов, проходивших ранее и развивающихся в настоящее время, ЛМА здесь отражают суперпозицию процессов спрединга и магматической деятельности молодого Исландского мантийного плюма.

Следует отметить, что в отличие от Гавайской и Эфиопской горячих точек, над которыми аномальное литосферное магнитное поле приобретает отрицательные значения, аномальное магнитное поле над территорией Исландии, уменьшаясь по амплитуде, остается положительным. Это, по-видимому, объясняется различием в возрасте плюмов, продуцирующих горячие точки, и толщиной коры в рассматриваемых регионах.

Образ Исландской горячей точки – область пониженных значений аномального литосферного магнитного поля – находится в центре о. Исландия, именно там, где по сейсмическим данным фиксируется самая мощная кора на территории Исландии, достигающая 46 км, что является следствием постоянного активного приращения первоначальной коры материалом, поступающим из мантии через зону расплава. И если в случае Эфиопского мантийного плюма, не говоря уже о Гавайском, где океаническая кора не обладает значительной мощностью, земная кора Восточно-Африканской магматической зоны практически потеряла магнитные свойства вследствие длительного мощного прогрева, то в случае молодого Исландского плюма, действующего гораздо меньший промежуток времени, значительная по мощности кора пока еще обладает достаточной намагниченностью, что и отражает карта литосферных магнитных аномалий.

Кроме того, полученные по спутниковым измерениям магнитные образы хорошо согласуются с данными сейсмической томографии изучаемых регионов и позволяют зафиксировать область нахождения горячей точки. Этот факт свидетельствует о перспективности использования данных спутниковой магнитной съемки для первичного обнаружения и оценки параметров горячих точек в труднодоступных областях земного шара, в том числе там, где более трудо- и ресурсозатратные сейсмологические и гравиметрические исследования пока не проводились.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование горячих точек и плюмовой активности является одной из междисциплинарных задач, требующих разностороннего изучения. В настоящее время для решения этой задачи оказалось эффективным использовать магнитную съемку,

осуществляемую низколетящими околоземными спутниками, поскольку этот метод является одним из наиболее дешевых и доступных и позволяет получать большой объем высокоточных данных, равномерно покрывающих значительные пространства, в том числе, над труднодоступными территориями.

Использование измерений геомагнитного поля, выполненных спутником CHAMP, позволило получить достаточно детальное распределение поля региональных литосферных магнитных аномалий для трех областей горячих точек и мантийных плюмов различного типа. Построены карты T_a поля ЛМА для центральной части Тихого океана, Восточно-Африканской рифтовой зоны и Северной Атлантики. Показано, что магнитные образы горячих точек различного типа: океанической Гавайской, континентальной Эфиопской и островной Исландской проявляются по-разному, отражая последствия тектонических процессов, проходивших ранее и развивающихся в настоящее время на рассматриваемых территориях. Полученные по спутниковым измерениям магнитные образы горячих точек хорошо согласуются с данными сейсмической томографии изучаемых регионов и современными представлениями о их происхождении и тектонике.

Таким образом, спутниковые наблюдения литосферного магнитного поля областей с плюмовой деятельностью в совокупности с другими геолого-геофизическими данными регионального масштаба, отражая свойства крупных региональных тектонических структур, добавляют ценную информацию в общую картину исследования тектонических процессов, позволяя оценивать степень намагниченности и температурное состояние литосферы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет бюджетных средств РФ в рамках плановых заданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Филиппов С.В. Корреляция литосферных магнитных аномалий и тектонических структур в норвежско-гренландской части Арктики // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1163–1172. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0388>
- Добрецов Н.Л. Геологические следствия термохимической модели плюмов // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 587–604.
- Головков В.П., Зверева Т.И., Чернова Т.А. Метод создания пространственно-временной модели главного магнитного поля путем совместного использования методов сферического гармонического анализа и естественных ортогональных компонент // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47. № 2. С. 272–278.
- Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л. Структура верхней мантии Арктического региона по дан-

- ным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1261–1272.
- Abramova D. Yu., Abramova L.M.* Lithospheric magnetic anomalies in the territory of Siberia (from measurements by the CHAMP satellite) // Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55. № 7. P. 854–863. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.06.005>
- Abramova D. Yu., Filippov S.V., Abramova L.M.* Possible Use of Satellite Geomagnetic Observations in Geological and Tectonic Studies of Lithosphere Structure // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. V. 56. № 12. P. 1695–1704. <https://doi.org/10.1134/S0001433820120324>
- Abramova L.M., Varentsov I.M., Abramova D. Yu.* Image of Mantle Plume Processes in the Satellite Magnetic Field over Africa // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. V. 59. № 9. P. 1045–1054. <https://doi.org/10.1134/S0001433823090025>
- Allen R., Nolet G., Morgan W., Vogfjord K., Nettles M., Ekstrom G., Bergsson B., Erlendsson P., Foulger G., Jakobsdóttir S., Julian B., Prüchard M., Ragnarsson S., Stefánsson R.* Plume driven plumbing and crustal formation in Iceland // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № B8. P. ESE 4-1-ESE 4-19. <https://doi.org/10.1029/2001JB000584>
- Bastow I., Nyblade A., Stuar, G., Rooney T., Benoit M.* Upper mantle seismic structure beneath the Ethiopian hot spot: Rifting at the edge of the African low-velocity anomaly // Geochem. Geophys. Geosyst. 2008. V. 9. № 12. <https://doi.org/10.1029/2008GC002107>
- Benoit M., Nyblade A., VanDecar J.* Upper mantle *P*-wave speed variations beneath Ethiopia and the origin of the Afar hotspot // Geology. 2006. V. 34. P. 329–332. <https://doi.org/10.1130/G22281.1>
- Bijwaard H., Spakman W.* Tomographic evidence for a whole-mantle plume below Iceland // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 166. P. 121–126. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00004-7)
- Darbyshire F., White R., Priestley K.* Structure of the crust and uppermost mantle of Iceland from a combined seismic and gravity study // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. 181. P. 409–428. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00206-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00206-5)
- Davies G.F.* Ocean bathymetry and mantle convection: 1. Large-scale flow and hotspots // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 10467–10480. <https://doi.org/10.1029/JB093iB09p10467>
- Forte A., Qu'ère S., Moucha R., Simmons N., Grand S., Mitrovica J., Rowley D.* Joint seismic-geodynamic-mineral physical modeling of African geodynamics: a reconciliation of deep-mantle convection with surface geophysical constraints // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. V. 295. P. 329–341. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.03.017>
- Fouch M., James D., Van Decar J., Van der Lee S., and the Kaapvaal Seismic Group.* Mantle seismic structure beneath the Kaapvaal and Zimbabwe cratons, // South Afr. J. Geol. 2004. V. 107. P. 33–44. <https://doi.org/10.2113/107.1-2.33>
- Foulger G., Anderson D.* A cool model for the Iceland hotspot // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2005. V. 141. P. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.10.007>
- Hansen S., Nyblade A., Benoit M.* Mantle structure beneath Africa and Arabia from adaptively parameterized *P*-wave tomography: Implications for the origin of Cenozoic Afro-Arabian tectonism // Earth Planet. Sci. Lett. 2012. V. 319–320. P. 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.023>
- Hansen S., Nyblade A.* The deep seismic structure of the Ethiopia/Afar hotspot and the African superplume // Geophys. J. Int. 2013. V. 194. P. 118–124. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt116>
- Hjartarson Á., Erlendsson Ö., Blischke A.* The Greenland–Iceland–Faroe Ridge Complex. In: G. Péron–Pinvidic, J.R. Hopper, T. Funck, M.S. Stoker, C. Gaina, J.C. Doornenbal, U.E. Ártung (Eds.) The NE Atlantic Region: a reappraisal of crustal structure, tectonostratigraphy and magmatic evolution / Geological Society. London. Special Publications. 2017. V. 447. P. 127–148. <https://doi.org/10.1144/SP447.14>
- Lei J., Zhao D.* A new insight into the Hawaiian plume // Earth and Planetary Sci. Lett. 2006. V. 241. P. 438–453. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.038>
- Li X., Kind R., Priestley K., Sobolev S., Tilmann F.* Mapping the Hawaiian plume conduit with converted seismic waves // Nature. 2000. V. 405. P. 938–941. <https://doi.org/10.1038/35016054>
- Loper D.E.* Mantle plumes // Tectonophysics. 1991. V. 187. P. 373–384. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90476-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90476-9)
- Mariyama Sh.* Plume tectonics // Geol. Soc. Japan. 1994. V. 100. (1). P. 24–34. <https://doi.org/10.5575/geosoc.100.24>
- Montelli R., Nolet G., Dahlen F.A., Masters G.* A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography // Geochem. Geophys. Geosyst. 2006. V. 7. Q11007. <https://doi.org/10.1029/2006GC001248>
- Morgan W.* Convection plumes in the lower mantle // Nature. 1971. V. 230. P. 42–43. <https://doi.org/10.1038/230042a0>
- Nataf H.* Seismic imaging of mantle plumes // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 2000. V. 28. P. 391–417. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.391>
- Pirajno F.* Ore deposits and mantle plumes. Kluwer Academic Publishers, 2004. 556 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-2502-6>
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P.* CHAMP mission status // Advances in Space Research. 2002. V. 30. № 2. P. 129–134. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4)
- Rickers F., Fichtner A., Trampert J.* The Iceland–Jan Mayen plume system and its impact on mantle dynamics in the North Atlantic region: Evidence from full-waveform inversion // Earth and Planet. Sci. Lett. 2013. V. 367. P. 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.02.022>
- Ritsema J., Allen R.* The elusive mantle plume // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. V. 207. P. 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01093-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01093-2)
- Ritsema J., van Heijst H., Woodhouse J.* Complex shear wave velocity structure beneath Africa and Iceland // Science. 1999. V. 286. P. 1925–1928. <https://doi.org/10.1126/science.286.5446.1925>
- Simmons N., Forte A., Grand S.* Thermochemical structure and dynamics of the African superplume // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. <https://doi.org/10.1029/2006GL028009>
- Sleep N.H.* Hotspots and mantle plumes: some phenomenology // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 6715–6736. <https://doi.org/10.1029/JB095iB05p06715>
- Wessel P., Smit W.H.F.* The generic mapping tools / Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. <https://doi.org/10.1029/98EO00426>
- Wilson J.* A possible origin of the Hawaiian icelands // Canadian Journal of Physics. 1963. V. 41. P. 863–870. <https://doi.org/10.1139/p63-094>
- Wolfe C.J., Bjarnason I.T., Van Decar J.C., Solomon S.C.* Seismic structure of the Iceland mantle plume // Nature. 1997. 385. P. 245–247. <https://doi.org/10.1038/385245a0>
- Wolfe C., Solomon S., Silver P., Van Decar J., Russo R.* Inversion of body-wave delay times for mantle structure beneath the Hawaiian islands: results from the PELENET experiment // Earth and Planet. Sci. Lett. 2002. V. 198. P. 129–145. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00493-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00493-4)

Comparison of the Images of Hot Spots and Mantle Plumes of Various Types in the Lithospheric Magnetic Anomalies Field

L. M. Abramova¹, D. Yu. Abramova²

¹*Geoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

²*Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

The spatial distribution of the lithospheric magnetic anomalies Maps of the spatial distribution of the lithospheric magnetic anomaly field for three hot spot areas: Hawaii, Afar and Iceland were analyzed in order to solve the interdisciplinary problem of the hot spots and mantle plumes impact on the lithosphere. To construct the plume and hot spot magnetic images the experimental data of the CHAMP satellite was used which were obtained in the last year of its operation, 2010, at a minimum level of 280–260 km. The database of the anomalous magnetic field parameters has been supplemented for areas where materials on these hot spots were already available, and new data has been obtained for the part of the Pacific Ocean where the Hawaiian hotspot is located. Maps of lithospheric magnetic anomalies have been constructed for the central Pacific Ocean, the East African rift zone and the North Atlantic. It is shown that magnetic images of the various types of hotspots: oceanic Hawaiian, continental Ethiopian and island Icelandic appear themselves in different ways, which reflect the consequences of tectonic processes that took place earlier and are currently developing in the territories under consideration. It is shown that the use of satellite observations of the lithospheric magnetic field in areas with mantle plume activity when being combined with other geological and geophysical regional data could add considerable information to the overall picture of the tectonic processes study.

Keywords: lithospheric magnetic anomalies, geomagnetic data, CHAMP satellite, mantle plume, hot spot, Hawaii, Afar, Iceland

REFERENCES

- Abramova D.Yu., Abramova L.M.* Lithospheric magnetic anomalies in the territory of Siberia (from measurements by the CHAMP satellite) // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55. № 7. P. 854–863. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.06.005>
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Filippov S.V.* Korreliatsiya litosfernih magnitnih anomalii i tektonicheskikh struktur v norvezhsko-grenlandskoy chasti Arktiki [Correlation of the lithospheric magnetic anomalies and tectonic structures of the Norway-Greenland part of the Arctic] // *Geodinamika i tektonofizika*. 2018. V. 9. № 4. P. 1163–1172. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0388> (In Russian).
- Abramova D.Yu., Filippov S.V., Abramova L.M.* Possible Use of Satellite Geomagnetic Observations in Geological and Tectonic Studies of Lithosphere Structure // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. № 12. P. 1695–1704. <https://doi.org/10.1134/S0001433820120324>
- Abramova L.M., Varentsov I.M., Abramova D.Yu.* Image of Mantle Plume Processes in the Satellite Magnetic Field over Africa // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023. V. 59. № 9. P. 1045–1054. <https://doi.org/10.1134/S0001433823090025>
- Allen R., Nolet G., Morgan W., Vogfjord K., Nettles M., Ekstrom G., Bergsson B., Erlendsson P., Foulger G., Jakobsdóttir S., Julian B., Pritchard M., Ragnarsson S., Stefánsson R.* Plume driven plumbing and crustal formation in Iceland // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № B8. P. ESE 4-1–ESE 4-19. <https://doi.org/10.1029/2001JB000584>
- Bastow I., Nyblade A., Stuar G., Rooney T., Benoit M.* Upper mantle seismic structure beneath the Ethiopian hot spot: Rifting at the edge of the African low-velocity anomaly // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2008. V. 9. № 12. <https://doi.org/10.1029/2008GC002107>
- Benoit M., Nyblade A., VanDecar J.* Upper mantle *P*-wave speed variations beneath Ethiopia and the origin of the Afar hotspot // *Geology*. 2006. V. 34. P. 329–332. <https://doi.org/10.1130/G22281.1>
- Bijwaard H., Spakman W.* Tomographic evidence for a whole-mantle plume below Iceland // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999. V. 166. P. 121–126. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00004-7)
- Darbyshire F., White R., Priestley K.* Structure of the crust and uppermost mantle of Iceland from a combined seismic and gravity study // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2000. 181. P. 409–428. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00206-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00206-5)
- Davies G.F.* Ocean bathymetry and mantle convection: 1. Large-scale flow and hotspots // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 10467–10480. <https://doi.org/10.1029/JB093iB09p10467>
- Dobretsov N.L.* Geologicheskie sledstviya termohimicheskoy modeli plyumov [Geological implications of the thermochemical plume model] // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49. № 7. P. 587–604. (In Russian).
- Forte A., Qu'ére S., Moucha R., Simmons N., Grand S., Mitrovica J., Rowley D.* Joint seismic-geodynamic-mineral physical modeling of African geodynamics: a reconciliation of deep-mantle convection with surface geophysical constraints // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 295. P. 329–341. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.03.017>
- Fouch M., James D., Van Decar J., Van der Lee S., and the Kaapvaal Seismic Group.* Mantle seismic structure beneath the

- Kaapvaal and Zimbabwe cratons // *South Afr. J. Geol.* 2004. V. 107. P. 33–44. <https://doi.org/10.2113/107.1-2.33>
- Foulger G., Anderson D. A cool model for the Iceland hotspot // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2005. V. 141. P. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.10.007>
- Golovkov V.P., Zvereva T.I., Chernova T.A. Metod sozdaniya prostranstvenno-vremennoy modeli glavnogo magnitnogo polya putem sovmestnogo ispol'zovaniya metodov sfericheskogo garmonicheskogo analiza i yestestvennykh ortogonal'nykh komponent [Method of creating a space-time model of the main magnetic field by using the methods of spherical harmonic analysis and natural orthogonal components] // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2007. V. 47. № 2. P. 272–278. (In Russian).
- Hansen S., Nyblade A., Benoit M. Mantle structure beneath Africa and Arabia from adaptively parameterized *P*-wave tomography: Implications for the origin of Cenozoic Afro-Arabian tectonism // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. V. 319–320. P. 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.023>
- Hansen S., Nyblade A. The deep seismic structure of the Ethiopia/Afar hotspot and the African superplume // *Geophys. J. Int.* 2013. V. 194. P. 118–124. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt116>
- Hjartarson Á., Erlendsson Ö., Blischke A. The Greenland–Iceland–Faroe Ridge Complex. In: G. Péron-Pinvidic, J.R. Hopper, T. Funck, M.S. Stoker, C. Gaina, J.C. Doornenbal, U.E. Árting (Eds.) *The NE Atlantic Region: a reappraisal of crustal structure, tectonostratigraphy and magmatic evolution* / Geological Society. London. Special Publications. 2017. V. 447. P. 127–148. <https://doi.org/10.1144/SP447.14>
- Jakovlev A., Bushenkova N., Koulakov I., Dobretsov N. Struktura verkhnei mantii Arkticheskogo regiona po dannym regional'noi seismotomografii [Structure of the upper mantle in the Circum - Arctic region from regional seismic tomography] // *Russian Geology and Geophysics.* 2012. V. 53. P. 1261–1272. (In Russian).
- Lei J., Zhao D. A new insight into the Hawaiian plume // *Earth and Planetary Sci. Lett.* 2006. V. 241. P. 438–453. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.038>
- Li X., Kind R., Priestley K., Sobolev S., Tilmann F. Mapping the Hawaiian plume conduit with converted seismic waves // *Nature.* 2000. V. 405. P. 938–941. <https://doi.org/10.1038/35016054>
- Loper D.E. Mantle plumes // *Tectonophysics.* 1991. V. 187. P. 373–384. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90476-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90476-9)
- Maruyama Sh. Plume tectonics // *Geol. Soc. Japan.* 1994. V. 100. (1). P. 24–34. <https://doi.org/10.5575/geosoc.100.24>
- Montelli R., Nolet G., Dahlen F.A., Masters G. A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2006. V. 7. Q11007. <https://doi.org/10.1029/2006GC001248>
- Morgan W. Convection plumes in the lower mantle // *Nature.* 1971. V. 230. P. 42–43. <https://doi.org/10.1038/230042a0>
- Nataf H. Seismic imaging of mantle plumes // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 2000. V. 28. P. 391–417. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.391>
- Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer Academic Publishers, 2004. 556 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-2502-6>
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // *Advances in Space Research.* 2002. V. 30. № 2. P. 129–134. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4)
- Rickers F., Fichtner A., Trampert J. The Iceland–Jan Mayen plume system and its impact on mantle dynamics in the North Atlantic region: Evidence from full-waveform inversion // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 367. P. 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.02.022>
- Ritsema J., Allen R. The elusive mantle plume // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 207. P. 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01093-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01093-2)
- Ritsema J., van Heijst H., Woodhouse J. Complex shear wave velocity structure beneath Africa and Iceland // *Science.* 1999. V. 286. P. 1925–1928. <https://doi.org/10.1126/science.286.5446.1925>
- Simmons N., Forte A., Grand S. Thermochemical structure and dynamics of the African superplume // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. <https://doi.org/10.1029/2006GL028009>
- Sleep N.H. Hotspots and mantle plumes: some phenomenology // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 6715–6736. <https://doi.org/10.1029/JB095iB05p06715>
- Wessel P., Smit W.H.F. The generic mapping tools /Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. <https://doi.org/10.1029/98EO00426>
- Wilson J. A possible origin of the Hawaiian islands // *Canadian Journal of Physics.* 1963. V. 41. P. 863–870. <https://doi.org/10.1139/p63-094>
- Wolfe C.J., Bjarnason I.T., Van Decar J.C., Solomon S.C. Seismic structure of the Iceland mantle plume // *Nature.* 1997. 385. P. 245–247. <https://doi.org/10.1038/385245a0>
- Wolfe C., Solomon S., Silver P., Van Decar J., Russo R. Inversion of body-wave delay times for mantle structure beneath the Hawaiian islands: results from the PELENET experiment // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 198. P. 129–145. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00493-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00493-4)