

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОТРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ МАНТИЙНОГО ПЛЮМОВОГО МАГМАТИЗМА В ЛИТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА СНАМР

© 2021 г. Л. М. Абрамова^а, *, Д. Ю. Абрамова^б

^аЦентр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта,
Москва, Троицк, Россия

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

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

Поступила в редакцию 16.02.2021 г.

Проанализировано пространственное распределение спутникового литосферного магнитного поля как параметра, связанного с процессами плюмового магматизма, происходящими на территории крупных изверженных магматических провинций. Показано, что магнитные аномалии могут рассматриваться в качестве образов мантийных плюмов различного генезиса наряду с томографическими образами сейсмических скоростей. С использованием авторской методики по измерениям геомагнитного поля на спутнике СНАМР рассчитаны параметры аномального магнитного литосферного поля и построены карты пространственного распределения модуля полного вектора T_a и вертикальной компоненты Z_a разных масштабов и высот наблюдения в последние годы жизни спутника, когда его альтитуда была самой низкой. Магнитные образы плюмов проиллюстрированы на примере трех разновозрастных плюмов в порядке снижения их возраста: Таримского (возраст ~280 млн лет), Эфиопского (~60–30 млн лет) и Исландского (~0–5 млн лет). Проанализирована связь аномалий магнитного поля с процессами плюмового магматизма, протекающими на данных территориях. Выяснено, что магнитные образы для плюмов разного возраста различны: древний мантийный плюм отражается в литосферном магнитном поле как конформная положительная аномалия значительной амплитуды. Литосферное же магнитное поле сравнительно “молодого” Эфиопского и действующего поныне Исландского плюмов имеет пониженные значения. Сделано заключение, что спутниковые наблюдения литосферного магнитного поля в совокупности с другими геолого-геофизическими данными регионального масштаба добавляют ценную информацию в общую картину исследования тектонических процессов, позволяя анализировать степень намагниченности и температурное состояние литосферы.

Ключевые слова: литосферные магнитные аномалии, спутниковые измерения, изверженные магматические провинции, Таримский мантийный плюм, Эфиопский мантийный плюм, Исландский мантийный плюм

DOI: 10.31857/S0205961421040023

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы при исследовании геотектонических процессов большое внимание уделяется изучению крупных изверженных провинций LIP (*large igneous province*) и выяснению роли в их формировании мантийных плюмов, генерирующих процессы магматизма и эндогенного рудообразования (Loper, 1991; Maruyama, 1994; Ярмолюк и др., 2000; Pirajno, 2004; Добрецов, 2008; Mihalffy et al., 2008; Zhao, 2009; Добрецов и др., 2010).

Гипотеза мантийного плюма была предложена четыре десятилетия назад Уилсоном (Wilson, 1963) и Морганом (Morgan, 1971) для объяснения вулканических горячих точек, таких как Гавайи и

Исландия. Плюмы — это горячие мантийные потоки, продвигающиеся к поверхности Земли от основания мантии в виде “горячей струи” расплава и являющиеся важнейшими регуляторами термохимической машины Земли. Приведенная на рис. 1 схема иллюстрирует процесс прохождения мантийного вещества от границы ядро–мантия в литосферу с выходом далее на земную поверхность.

Поднимающийся по каналу мантийный материал плюма при подходе к тугоплавкому основанию литосферы не может ее проплавить и начинает растекаться вдоль основания литосферы. Расплав плюма растекается до тех пор, пока не начинает формироваться “медленный” вторич-

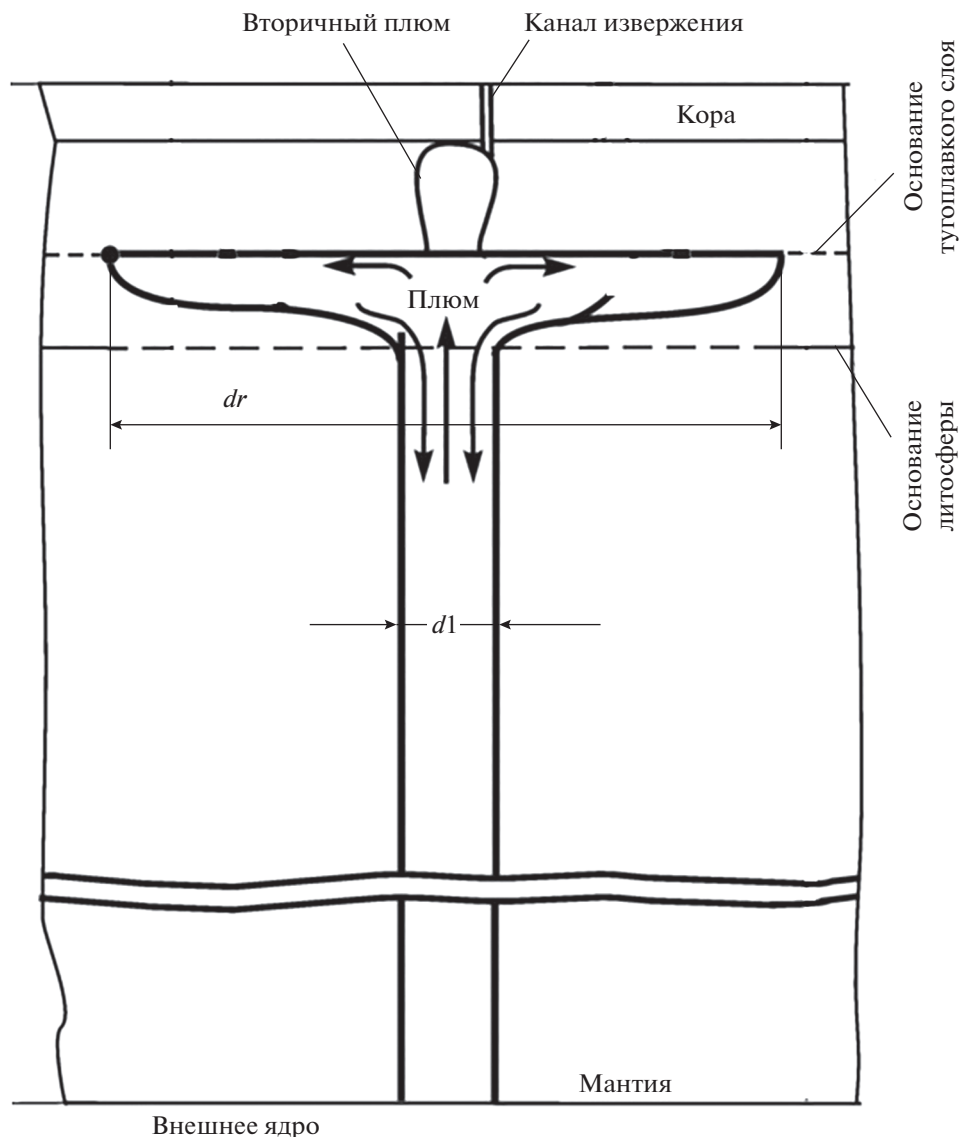


Рис. 1. Схема развития мантийного плюма (Добрецов, 2008). dr — положение границ сформировавшейся головы плюма, d_1 — диаметр канала плюма.

ный плюм, после чего, на заключительной стадии процесса, возникают центры излияния магмы на земную поверхность, и происходит массовое (катастрофическое) излияние траппов (пикритов и базальтов) по периферии зоны излияния.

Диаметр головы плюма (границы растекания под подошвой литосферы) зависит не только от длительности этого растекания, сопоставимого с временем подъема вторичного плюма, но и от его мощности. По этому параметру принято разделять плюмы на обычные и суперплюмы с диаметрами головы 600–1200 и 1800–3500 км соответственно. По-видимому, существует глобальная повторяемость активности плюмов через 30 млн лет и суперплюмов через 120 млн лет, которая, подобно “плюмовой капельнице”, определяет периодичность

геологических процессов на Земле (Добрецов, 2008).

В геотектонике мантийные плюмы считаются ответственными за возникновение траппов, внутриконтинентальных рифтов и горячих точек. Горячие точки — проявление мантийных плюмов на поверхности — являются сфокусированными зонами плавления, для них характерны высокий тепловой поток и активный вулканизм.

Проявления мантийных плюмов и оценка их параметров позволяют выявлять специфические особенности зарождения и развития мантийных и мантийно-коровых рудообразующих систем, поскольку их функционирование приводит к формированию крупных и уникальных рудных

месторождений (Борисенко и др., 2006; Добрецов, 2008).

При исследованиях процессов, связанных с плюмообразованием, существенную помощь в диагностике и локализации мантийных плюмов может оказать использование геофизических методов, в том числе данных измерений магнитного поля на спутниках Земли.

За период более чем десятилетней миссии германского спутника CHAMP были получены огромные массивы высокоточных данных модуля полного вектора и компонент геомагнитного поля, равномерно покрывающих практически всю поверхность Земли для уровней наблюдения от 480 до 250 км. Последнее стало возможным, поскольку спутник не прекращал измерения даже в период постепенного естественного снижения высоты орбиты в конце “жизни” аппарата (Reigber et al., 2002). Измерения более поздней мультиспутниковой миссии SWARM, к сожалению, малопригодны для задач исследования поля литосферных магнитных аномалий из-за больших альтитуд полета спутников.

Ранее в наших работах (Абрамова Д., Абрамова Л., 2014; Абрамова и др., 2019; 2020) было показано, что литосферное магнитное поле как параметр, обусловленный процессами, происходящими в тектоносфере Земли, может рассматриваться наряду с томографическими построениями сейсмических скоростей в качестве образов тектонических структур.

Здесь мы хотим рассмотреть магнитные аномалии как образы трех разновозрастных плюмов: Таримского, Эфиопского и Исландского, возрастные параметры которых приведены в работе (Добрецов, 2008), используя в качестве источника информации данные наблюдений германского спутника CHAMP.

Для тектонических областей, ограничивающих проявление указанных плюмов, построены карты литосферных магнитных аномалий на спутниковых высотах с целью определения соотношения их размеров, границ и пространственного положения. Свойства литосферных магнитных аномалий (ЛМА), расположенных над территориями указанных плюмов, их связь с областями плюмового магматизма рассмотрены в настоящей работе.

СПУТНИКОВЫЕ МАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Геомагнитное поле, измеренное на спутнике, является сложной функцией пространства и времени, и основная проблема при выделении его аномальной части, относящейся к магнитному полю литосферы, состоит в корректном разделении измеренного суммарного магнитного поля

на составляющие, связанные с различными физическими источниками. Для получения вклада ЛМА требуется удалить из экспериментальных данных “лишние” составляющие, максимально адекватно описывая их с помощью существующих на сегодняшний день математических моделей.

Методика выделения параметров литосферного магнитного поля из экспериментальных спутниковых измерений, усовершенствованная авторами в части удаления самой значительной составляющей — главного магнитного поля Земли (что позволило повысить надежность и точность выделения литосферной составляющей), подробно приводилась в наших работах (Абрамова и др., 2011, 2014).

Следует отметить, что материалы спутника CHAMP, полученные в последние годы работы на высотах ~300 км и ниже, приятно отличаются от данных предыдущих лет не только более значительными величинами полей, что обусловлено снижающейся высотой полета, но и качеством (по-видимому, усовершенствовалась методика предварительной обработки массива данных их собственниками). Тем не менее, для проверки надежности построений карт магнитных аномалий расчет всегда производился по нескольким независимым наборам спутниковых данных либо для разных компонент магнитного поля. Сравнение полученных вариантов подтвердило, что структура магнитных аномалий воспроизводится стабильно, что свидетельствует об адекватности построенного пространственного распределения поля.

Для анализа распределения поля ЛМА на спутниковых высотах были выделены и обработаны геомагнитные данные спутника CHAMP, равномерно покрывающие сектора земной поверхности, топографически относящиеся к Таримской изверженной провинции, Восточной Африке и региону о. Исландия. Количество значений, используемых при анализе каждой области, лежит в пределах от 1600 до 10000. Детальность построения карт аномального литосферного поля соответствует масштабу основных тектонических структур региона.

Территории развития плюмов рассмотрены ниже в порядке снижения их возраста: Таримский (возраст ~280 млн лет), Эфиопский (по разным данным ~60–30 млн лет) и Исландский (~0–5 млн лет).

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ЛИТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ РАЗВИТИЯ ПЛЮМОВ

Таримский плюм

Для анализа связи ЛМА с положением тектонических структур Тарима и окружающих областей создана база экспериментальных магнитных

данных, рассчитаны параметры модуля полного вектора T_a и вертикальной компоненты Z_a . Для этого использованы материалы измерений спутника CHAMP за 6 мес. 2008 г., когда высота полета спутника составляла ~300 км. Построены серии карт ЛМА для компонент Z_a и T_a различных масштабов и параметров осреднения над территорией данной коллизионной зоны в интервале $74^\circ\text{--}96^\circ\text{ E}$ и $33^\circ\text{--}48^\circ\text{ N}$.

На рис. 2 представлен пример пространственного распределения T_a и Z_a поля ЛМА, здесь применено медианное осреднение по блокам размером 80×80 км. Для построения этих и всех остальных представленных в данной статье карт использована программа GMT (Wessel, Smith, 2007).

Рисунок иллюстрирует хорошую согласованность компонент T_a и Z_a , что свидетельствует о надежности построений, высоком качестве спутниковых данных и применяемой методики (в средних широтах модуль полного вектора и вертикальная компонента магнитного поля близки по абсолютной величине).

В полученном распределении литосферного магнитного поля отчетливо проявляется мозаичная структура крупных положительных и отрицательных аномалий, свидетельствующая о неоднородной намагниченности глубинных структур. На картах обеих компонент положению Таримского и Джунгарского кристаллических массивов соответствуют изометрические положительные аномалии с интенсивностью, приближающейся к 12 нТл и положением центров $\sim 38^\circ\text{ N}/81^\circ\text{ E}$ и $\sim 45^\circ\text{ N}/86^\circ\text{ E}$ соответственно, что отражает значительную намагниченность и однородность магнитоактивного слоя этих тектонических структур в нижней части земной коры.

Эфиопский плюм

Для исследования отражения Эфиопского плюма в аномальном литосферном магнитном поле использованы данные измерений на спутнике CHAMP за 2010 г. На уровне ~280 км над Восточно-Африканской магматической провинцией на планшете в границах $24^\circ\text{--}44^\circ\text{ E}$ и $8^\circ\text{ S--}20^\circ\text{ N}$ построена серия карт модуля полного вектора магнитного поля T_a для разных степеней осреднения. В качестве примера на рис. 3 приведена одна из таких карт T_a . Медианное осреднение также выполнено по блокам размером 80×80 км.

Из рис. 3 видно, что практически все аномальное магнитное поле над территорией Восточно-Африканской рифтовой зоны к северу от экватора представляет собой область отрицательных значений различной интенсивности.

На этом отрицательном фоне выделяются две крупные амебообразные отрицательные магнитные

аномалии с центрами $8^\circ\text{ N}/38^\circ\text{ E}$ и $8^\circ\text{ N}/42.5^\circ\text{ E}$. Их амплитуды достигают 16 нТл.

Над западной частью Эфиопского плато наблюдается еще одна отрицательная аномалия T_a меньшей амплитуды, ~8 нТл.

К югу от экватора, напротив, значения амплитуды T_a постепенно возрастают и достигают на юго-западе территории значений более 10 нТл, образуя неоднородную область положительного аномального поля, тяготеющую центром к Танзанийскому кратону, а к востоку продолжающуюся в акваторию Индийского океана.

Исландский плюм

Для анализа аномального литосферного поля над территорией о. Исландия и прилегающих областей использованы экспериментальные данные спутника CHAMP за июль–август 2010 г., когда орбита находилась на самом низком (260 км) уровне перед завершением его миссии. Значения амплитуды модуля полного вектора аномального магнитного поля T_a рассчитаны для сектора $10^\circ\text{--}25^\circ\text{ W}$ и $60^\circ\text{--}70^\circ\text{ N}$ и приведены на рис. 4, при построении карты использовано медианное осреднение по блокам размером 30×30 км средствами GMT (Wessel, Smith, 2007).

На северо-западной и юго-восточной сторонах острова видны две положительные ЛМА, которые представляют собой частичное отражение пояса аномалий, проходящих от западного края центральной части Гренландии до шельфа Фарерских островов (Абрамова и др., 2019). Природа этих аномалий объясняется тем, что в областях, где при прохождении Исландского плюма происходили процессы мощной тектонической активизации, отдельные микроплиты разрушавшейся древней коры с высокими значениями намагниченности, были погружены под активные области, о чем и свидетельствует аномальное магнитное поле. На границах рассматриваемых аномалий наблюдаются зоны высокого градиента поля, что, по-видимому, обусловлено наличием поясов торошения и дробления вокруг отдельных блоков земной коры (Абрамова Д., Абрамова Л., 2014).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таримский плюм

Территория, на которой расположен Таримский плюм, является частью Центрально-Азиатского складчатого пояса с чрезвычайно сложной структурой литосферы, составленной группами складчатых поясов, террейнов и кристаллических массивов (микроконтинентов) с докембрийским фундаментом. Тектоническая активность здесь проявляется до сих пор, ее природа приписывается

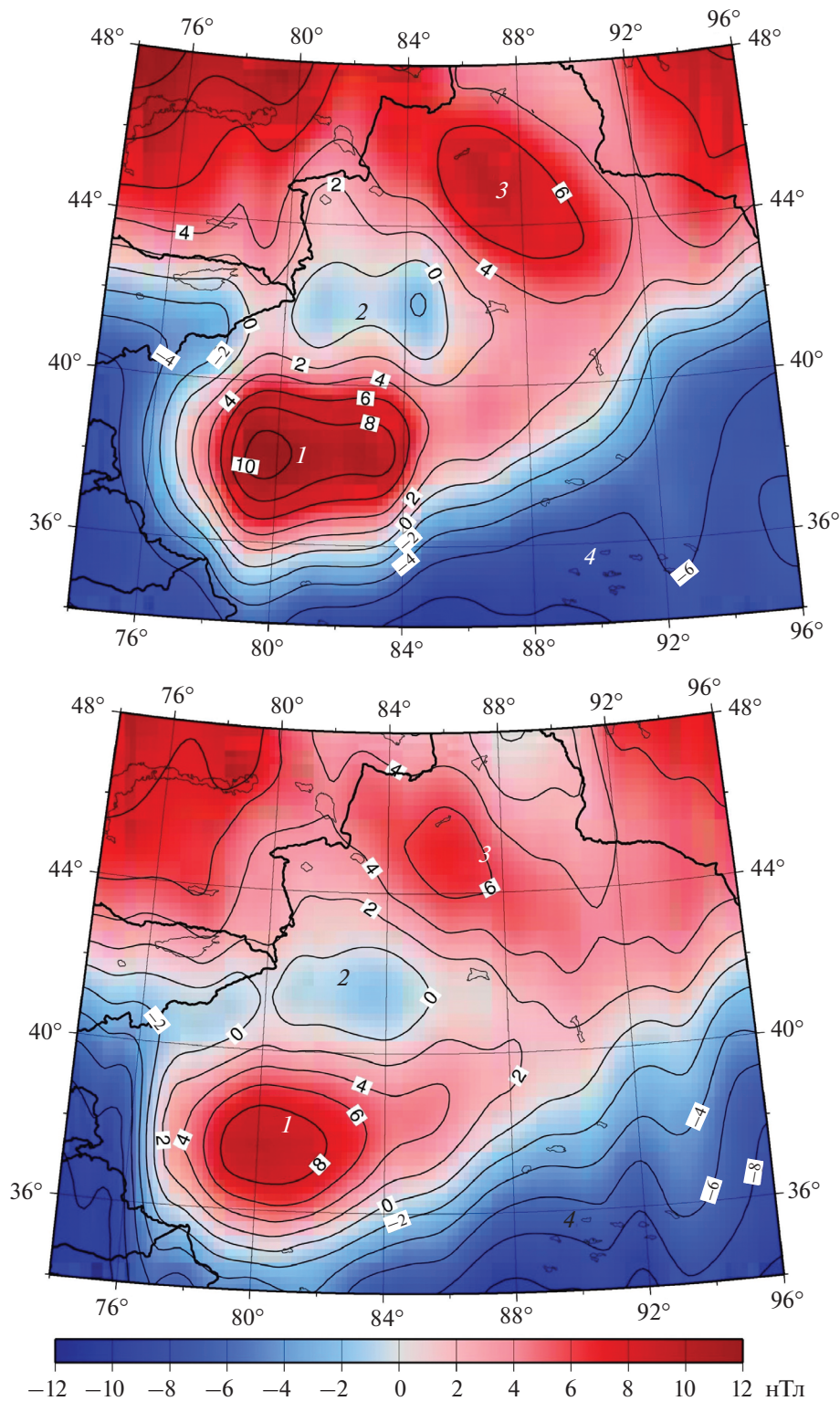


Рис 2. Карта ЛМА над западной частью Центрально-Азиатского складчатого пояса: аномалии T_a (вверху); аномалии Z_a (внизу). Цифрами обозначены: 1 – Таримский кристаллический массив; 2 – Тянь-Шань; 3 – Джунгарский массив; 4 – Тибетское плато.

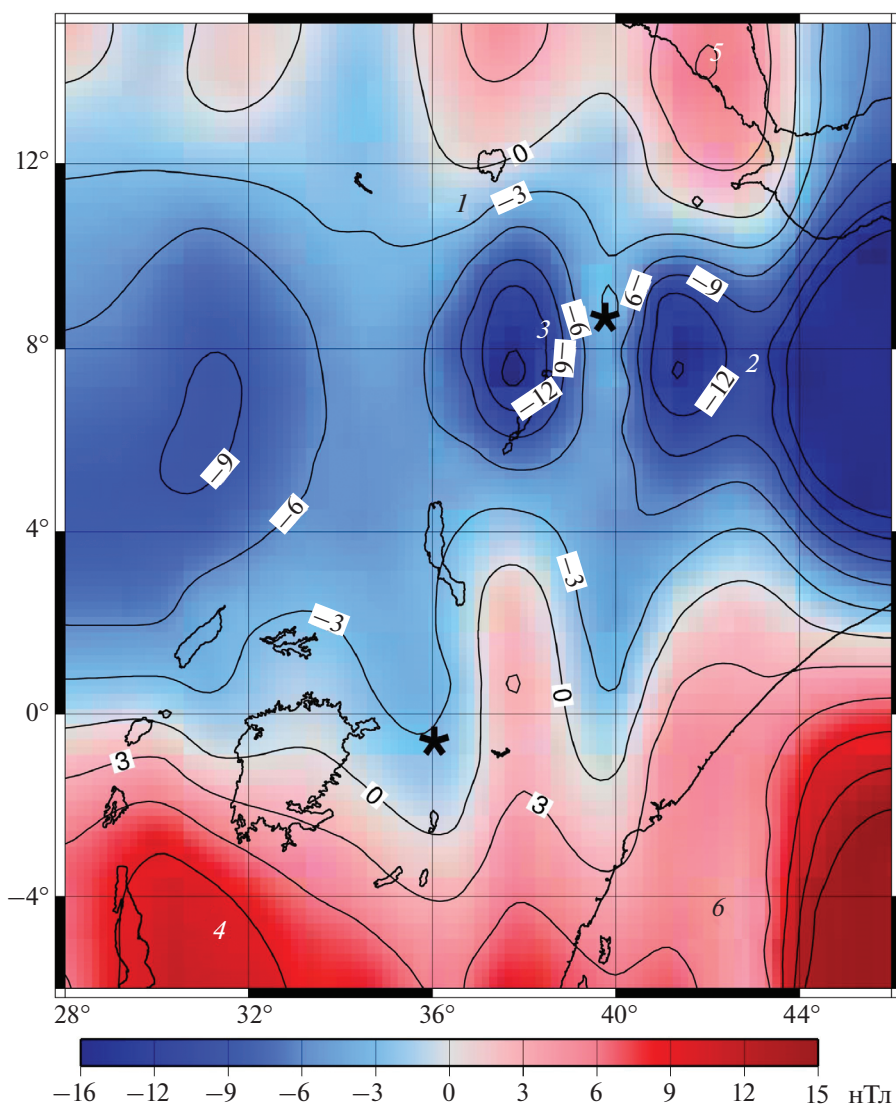


Рис. 3. Карта аномалий магнитного поля T_a над территорией Восточной Африки на высоте ~ 280 км. Цифрами обозначены: 1 – Эфиопское плато; 2 – Афарская низменность; 3 – Восточно-Африканская рифтовая зона; 4 – Танзанийский кратон; 5 – Красное море; 6 – Индийский океан. Звездочками обозначены условные положения горячих точек.

межплитному взаимодействию и (или) мантийным процессам.

Таримский кристаллический массив, расположенный на северо-западе Китая и занимающий площадь ~ 500 тыс. км², в плане напоминает двояковыпуклую линзу, вытянутую в широтном направлении. Обрамлена эта “линза” на севере горно-складчатыми структурами Тянь-Шаня, на юге – орогенами Куньлуня–Тибета. В пределах Тарима и рифтогенных структур Восточного Тянь-Шаня (Джунгарский массив) выявлены ареалы развития древнего пермского и триасового магматизма, обусловленные протеканием на их территории процессов развития мантийного плюма (Добрецов, 2005; Борисенко и др., 2006;

Zhang et al., 2005). Обзорная схема структур обрамления Таримского и Джунгарского массивов приводилась ранее на страницах этого журнала в статье (Абрамова и др., 2020).

Литосферные магнитные аномалии в пределах Таримского и Джунгарского массивов четко коррелируют с литосферными аномалиями сейсмических скоростей по результатам сейсмической томографии (Gao et al., 2000; Huang, Zhao, 2006; Kosarev et al., 1993). Тепловой поток в пределах Таримского и Джунгарского архейских блоков, входящих в одноименные массивы, имеет пониженные по сравнению со средними значения ~ 44 мВт/м², что предполагает низкое положение изотермы Кюри

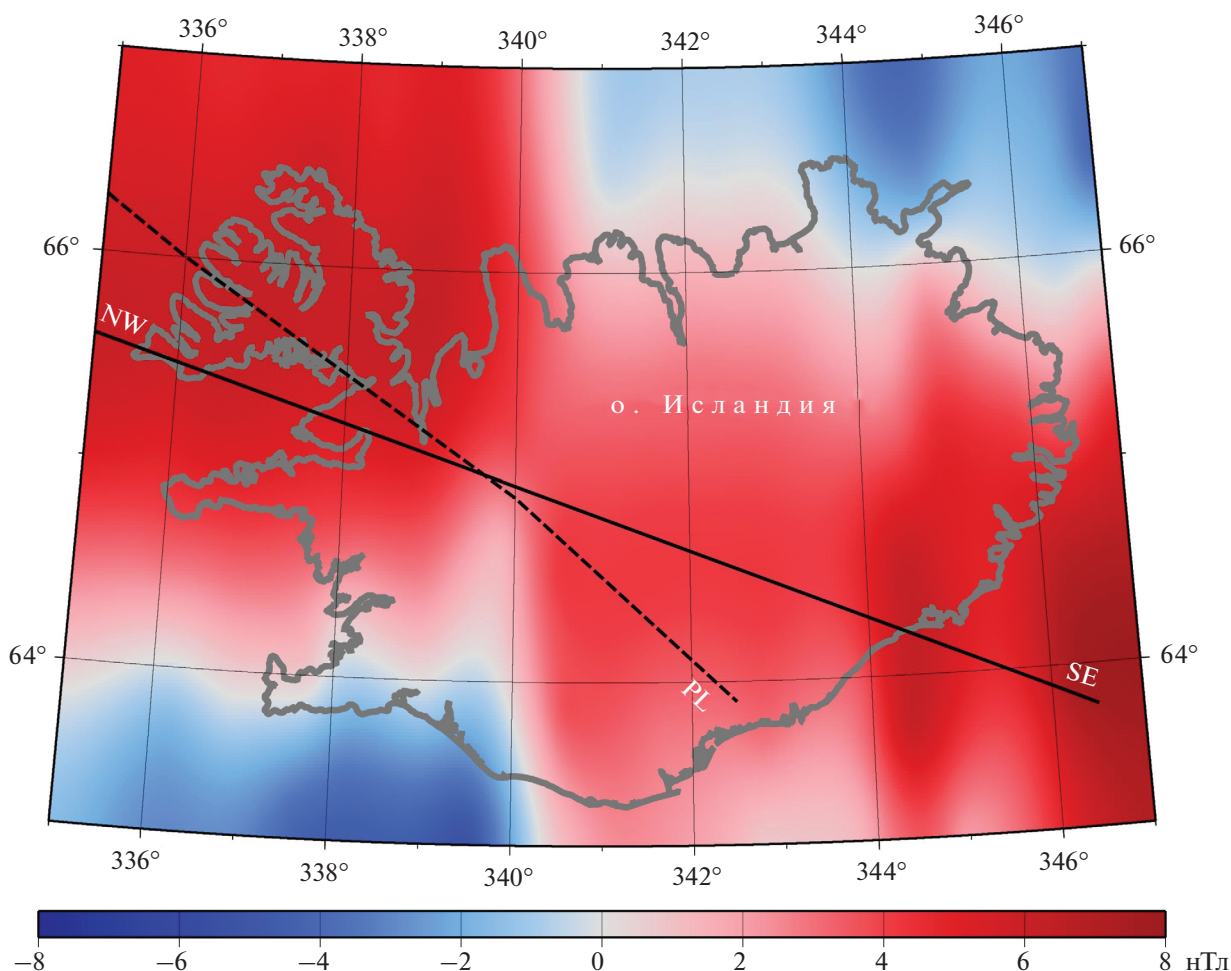


Рис. 4. Карта литосферных магнитных аномалий модуля полного вектора T_a над территорией о. Исландия; пунктир — предполагаемая траектория прохождения Исландского плюма; PL — современное положение Исландского плюма; NW–SE положение профиля к разрезу рис. 6.

(Лысак, 2009) и отсутствие влияния температуры на намагниченность вещества коры.

Схожесть приведенных геофизических параметров, характеризующих области расположения Таримского и Джунгарского массивов, дает повод предположить по аналогии, что аномалия литосферного магнитного поля, приуроченная к Джунгарскому массиву, также является следствием процессов плюмовой магматической активизации, протекавших одновременно с периодом действия Таримского плюма, а может быть и реликтом иного плюма.

Отрицательные аномалии литосферного магнитного поля на рис. 2 оконтуривают складчатые области гор Тянь-Шаня, Памира и Тибета, достигаая уровня -10 нТл. В целом, все складчатые области, где до сих пор наблюдаются процессы тектонической активизации, представлены в виде ареалов пониженного уровня магнитного поля. Это обусловлено, в первую очередь, уменьшени-

ем мощности магнитоактивного слоя, особенно резким в пределах Памира и Тибета в силу высокого, менее 32 км, положения поверхности Кюри магнетита (Gao et al., 2016).

Таким образом, можно констатировать, что древний раннепермский Таримский, равно как и Джунгарский, плюмы на картах аномального литосферного магнитного поля на высоте наблюдения ~ 300 км отражаются в виде значительных изометричных положительных аномалий.

Эфиопский плюм

Современная тектоника данной области, включающей в себя Эфиопское плато, Восточно-Африканскую рифтовую зону и Танзанийский кратон, достаточно хорошо изучена сейсмическими методами. Томографические исследования сейсмических скоростей на продольных и поперечных волнах обнаружили низкоскорост-

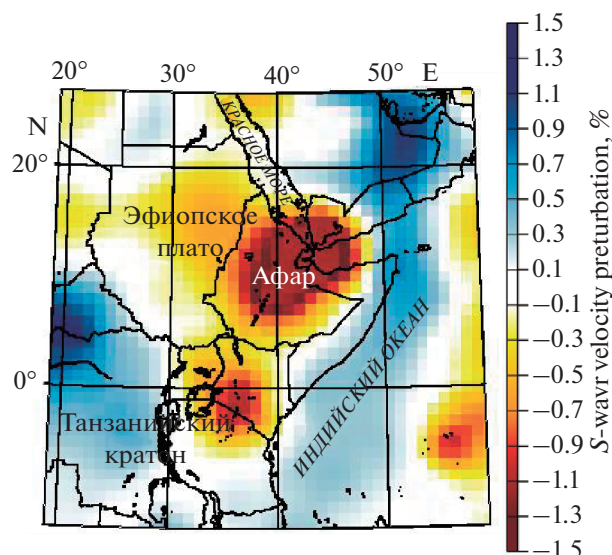


Рис. 5. Сечение скоростной модели S -волн PRI-S05 по данным томографии на глубине 300 км (Montelli et al., 2006).

ную аномалию значительных размеров, расположенную в верхней мантии под Восточно-Африканской рифтовой зоной с геометрическим центром под котловиной Афар, название которой получила находящаяся здесь горячая точка.

На модели PRI-S05 (рис. 5) выделены две интенсивные низкоскоростные аномалии: одна из аномалий расположена под Афарским тройным сочленением (42° E , 12° N), вторая находится под Танзанийским кратоном (32° E , 3° S) (Montelli et al., 2006). Цветом обозначены отклонения скоростей S -волн в большую или меньшую сторону от средней мантийной скорости соответственно.

Было высказано предположение, что аномальная зона Афар является следствием плюмовой активности так называемого Эфиопского плюма (Добрецов, 2008). Начиная с глубин ~ 200 км под Эфиопским плато, интенсивность низкоскоростной (плюмовой) аномалии сильно возрастает, что, по мнению авторов, обусловлено повышенной пластичностью мантийного расплава в верхней мантии. В течение указанного периода происходил длительный прогрев литосферы, в том числе нижней части земной коры, что привело к потере ею магнитных свойств. Наблюдаемая в этом регионе огромная область отрицательных значений литосферного магнитного поля T_a вполне согласуется с выдвинутым предположением и служит подтверждением его реалистичности.

Положительная магнитная аномалия в районе Танзанийского кратона (на рис. 3 обозначен цифрой 4) свидетельствует о том, что вещество литосферы в этой области обладает достаточной намагниченностью, соответственно литосфера здесь бо-

лее мощная и холодная и, следовательно, более вязкая. Это вполне согласуется с существованием по данным томографии зоны повышенных скоростей к юго-западу от оз. Виктория (рис. 5).

Согласно сейсмическим данным, Танзанийский кратон по периметру окружен зонами локального понижения скорости в соответствии с поверхностной структурой. Область пониженных скоростей с центром 37° E – 3° S (рис. 5) в его восточной части, которую принято обозначать как Танзанийский плюм, как раз является иллюстрацией этих данных.

На карте пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий (рис. 3) эта область (отмечена звездочкой) достаточно хорошо оконтуривается изолиниями, изменяющими в районе 35° E и 40° E свое направление на субмеридиональное, и характерна пониженными значениями T_a по отношению к расположенным западнее и восточнее территориям. Величина амплитуды аномалии здесь не такая значительная как в области Афар, что может свидетельствовать о меньшей мощности Танзанийского плюма по сравнению с Эфиопским и, соответственно, более мощной и холодной литосфере под ним.

Исландский плюм

Геолого-тектонические исследования о. Исландия и окружающих ее территорий показывают, что здесь происходят одновременно два мощных тектонических процесса: спрединг Срединно-Атлантического хребта и проявления молодого мантийного плюма (Allen et al., 2002; Hjartarson et al., 2017).

В нашей работе (Абрамова и др., 2019) были представлены и проанализированы карты региональных литосферных аномалий над территорией части Северо-Атлантической магматической провинции, одной из крупнейших магматических провинций в мире. Процессы тектонической активизации в данном регионе в целом согласуются с небольшими значениями амплитуды аномального литосферного магнитного поля, полученного из спутниковых измерений над этой территорией. Было показано, что происходящие здесь активные процессы разогрева астеносферы приводят к подъему глубины залегания поверхности, на которой достигается температура Кюри для ферромагнитных минералов, что ведет к сокращению мощности намагниченных слоев в литосфере.

Здесь построено и обсуждается детальное пространственное распределение поля литосферных магнитных аномалий T_a непосредственно для о. Исландия, на территории которого в настоящее время находится молодой Исландский ман-

тийный плюм, возраст которого оценивается в пределах 0–5 млн лет (Добрецов, 2008).

В центральной части острова амплитуда T_a существенно ниже в сравнении с его северо-западной и юго-восточной окраинами, что можно связать с деятельностью плюма.

Томографические исследования сейсмических скоростей (Allen et al., 2002) выявили наличие обширной системы, подпитывающей плюм, то есть подающей мантийный расплав в магматические камеры, расположенные в верхней коре. Вертикальный разрез относительных значений сейсмической скорости для трехмерной (3D) модели вдоль профиля NW–SE (положение профиля см. на рис. 4) на территории Исландии приведен на рис. 6 (Allen et al., 2002).

Зафиксированная этими исследованиями низкоскоростная аномалия в коре Исландии представляет собой сейсмический образ неоднородностей обширной системы мантийного плюма, обеспечивающей, как сказано, поступление расплава в верхние магматические камеры, где происходит современное формирование земной коры. Согласно 3D модели, в верхней части коры (0–15 км) низкоскоростная область расположена на всем протяжении современных вулканических зон. В нижней коре, глубже 15 км, низкоскоростная область представлена в виде вертикального цилиндра под центральной Исландией. Эта низкоскоростная структура интерпретируется как тепловой образ канала, который соединяет область образования расплава в самой верхней части мантии под центральной Исландией с зонами современных действующих вулканов. Аномалия имеет диаметр 150 км и сосредоточена под комплексом Бардар–Бунга–Гримсвотн, одним из наиболее активных вулканических регионов в Исландии. Этот комплекс спродуцировал самое большое извержение лавы, свидетелем которого, когда бы то ни было, был человек — извержение Лаки в 1783 г.

Область пониженной скорости в нижней коре находится именно там, где фиксируется самая мощная кора на территории Исландии, достигающая 46 км. Это стало следствием постоянного активного приращения первоначальной коры материалом, поступающим из мантии через зону расплава (Allen et al., 2002; Funck, Nopper, 2014). Скоростная аномалия в нижней коре также удовлетворительно соотносится с центром низкоскоростной аномалии в мантии, которая интерпретируется как мантийный плюм (Zverev et al., 1977; Wolfe et al., 1997; Allen et al., 2002).

Пространственное распределение аномально-го литосферного магнитного поля, полученное в наших исследованиях, хорошо согласуется с томографическими данными, что подтверждает приведенный на рис. 6 график модуля полного вектора T_a вдоль профиля NW–SE. Видно, что

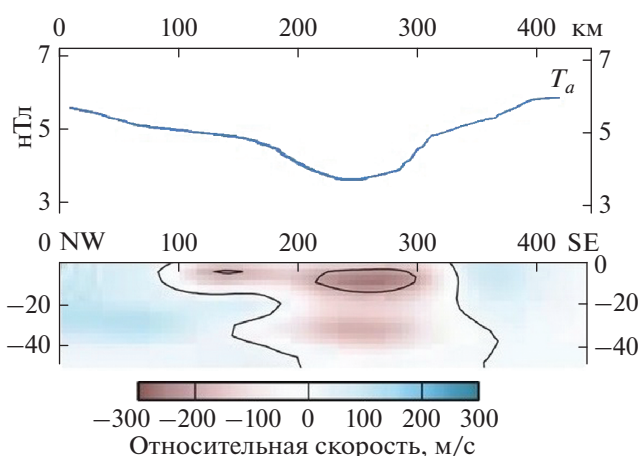


Рис. 6. Вертикальный разрез аномалий сейсмической скорости, вдоль профиля NW–SE (внизу) (Allen et al., 2002) и амплитуда модуля полного вектора аномального магнитного поля T_a (вверху).

пониженные значения амплитуды T_a приходится как раз на область положения канала поступления мантийного вещества, что свидетельствует о потере магнитных свойств материала земной коры под действием высоких температур.

Можно с уверенностью утверждать, что и низкоскоростная сейсмическая аномалия, и пониженные значения аномального 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 растекающейся из нижней коры в центральной Исландии вдоль рифтовой системы верхней коры. Следует отметить, что в отличие от выше рассмотренного Эфиопского плюма, где аномальное магнитное поле в горячих точках приобретает отрицательные значения, на территории Исландии значения поля, уменьшаясь по амплитуде, остаются положительными. Это, по-видимому, объясняется существенным различием в возрасте действующих на данных территориях плюмов: если в случае Эфиопского мантийного плюма вся кора Восточно-Африканской магматической зоны практически потеряла намагниченность вследствие длительного мощного прогрева, то в случае Исландского плюма кора все еще может обладать достаточными магнитными свойствами, отраженными в распределении аномального магнитного поля.

ВЫВОДЫ

В результате анализа пространственного распределения литосферного магнитного поля, полученного по данным геомагнитных наблюдений спутника CHAMP, показано, что аномалии литосферного магнитного поля тесно связаны с про-

цессами плюмового магматизма и, наряду с томографическими образами сейсмических скоростей, по-видимому, могут рассматриваться в качестве образов мантийных плюмов.

Построенные магнитные образы плюмов различного возраста: Таримского, Эфиопского и Исландского — продемонстрировали, что магнитные аномалии на территории проявления древних и молодых мантийных плюмов существенно различны: древние плюмы, отражаются в литосферном аномальном поле как конформные положительные магнитные аномалии значительной амплитуды, в то время как магнитное поле в регионе действия более молодых плюмов понижается. При этом в отличие от “средневозрастного” Эфиопского плюма, где аномальное магнитное поле вследствие разогрева материала земной коры и снижения мощности магнитоактивного слоя приобретает отрицательные значения, на территории Исландии, где молодой мантийный плюм действует в течение гораздо более короткого периода, значения поля, уменьшаясь по амплитуде, остаются положительными, поскольку кора все еще может обладать достаточными магнитными свойствами. Выявленные особенности могут быть использованы при классификации и определении возраста мантийных плюмов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Филиппов С.В., Фрунзе А.Х. О перспективах использования спутниковых измерений для анализа региональных магнитных аномалий // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 53–63.
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М. Литосферные магнитные аномалии на территории Сибири (по измерениям спутника CHAMP) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. С. 1081–1092.
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Филиппов С.В. Исследование литосферных магнитных аномалий Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса по данным измерений на спутнике CHAMP // Геофизические исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 5–18.
<https://doi.org/10.21455/gr2019.2-1>
- Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М. О возможностях использования спутниковых геомагнитных наблюдений в исследовании геолого-тектонического строения литосферы // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 2. С. 69–81.
- Борисенко А.С., Сотников В.И., Изох А.Э., Поляков Г.В., Оболенский А.А. Пермотриасовое оруденение Азии и его связь с проявлением плюмового магматизма // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 1. С. 166–182.
- Добрецов Н.Л. Крупнейшие магматические провинции Азии (250 млн лет): сибирские эмейшаньские траппы (платобазальты) и ассоциирующие гранитоиды // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 9. С. 870–890.
- Добрецов Н.Л. Геологические следствия термохимической модели плюмов // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 587–604.
- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1159–1187.
- Лысак С.В. Термальная эволюция, геодинамика и современная геотермальная активность литосферы Китая // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. С. 1058–1071.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. 2000. № 6. С. 3–29.
- Allen R., Nolet G., Morgan W., Vogfjord K., Nettles M., Ekstrom G., Bergsson B., Erlendsson P., Darbyshire F.A., White R.S., Priestley K.F. Structure of the crust and uppermost mantle of Iceland from a combined seismic and gravity study // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 181. P. 409–428.
- Funck T., Hopper J.R. Crustal structure. Tectonostratigraphic Atlas of the North-East Atlantic Region. Geological Surv. of Denmark and Greenland (GEUS). Copenhagen, Denmark, 2014. P. 69–128.
- Gao Guoming, Guofa Kang, Guangquan Li, Chunhua Bai, Yingyan Wu. An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area // Acta Geod. et. Geoph. 2016.
<https://doi.org/10.1007/s40328-016-0179-z>
- Gao R., Huang D., Lu D. Deep seismic reflection profile across the juncture zone between the Tarim basin and the west Kunlun mountains // Chin. Sci. Bull. 2000. V. 45. P. 2281–2286.
- Hjartarson A., Erlendsson O., Blisghke A. The Greenland–Iceland–Faroe Ridge Complex // Geological Society London Special Publications. April 2017. 21 p.
- Huang J., Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. 1–21.
- Kosarev G.L., Petersen N.V., Vinnik L.P., Roecker S.W. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: Contrasts in the evolution of structures across the Taltass-Fergana fault // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 4437–4448.
- Loper D.E. Mantle plumes // Tectonophysics. 1991. V. 187. P. 373–384.
- Maruyama Sh. Plume tectonics // Geol. Soc. Japan. 1994. V. 100. № 1. P. 24–34.

- Mihalfy P., Steinberger B., Schmeling H.* The effect of the large-scale mantle flow field on the Iceland hotspot track // *Tectonophysics*. 2008. V. 447. P. 5–18.
- 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.
- Pirajno F.* Ore deposits and mantle plumes. Kluwer Academic Publishers, 2004. 556 p.
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P.* CHAMP mission status // *Adv. Space Res.* 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)
- Wessel P., Smith W.H.F.* The generic mapping tools // Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. <http://gmt.soest.hawaii.edu>.
- Wilson, J.* A possible origin of the Hawaiian islands // *Canadian J. Physics*. 1963. V. 41. P. 863–870.
- Wolfe C.J., Bjarnason I.T., Van Decar J.C., Solomon S.C.* Seismic structure of the Iceland mantle plume // *Nature*. 1997. V. 385. P. 245–247.
- Zhang L., Xiao W., Qin K., Qu W., Du A.* Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tian-Shan, NW China, and its geological significance // *Miner. Depos.* 2005. V. 39. P. 960–969.
- Dapeng Z.* Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // *Gondwana Res.* 2009. V. 15. P. 297–323.
- Zverev S.M., Kosminskaya I.P., Krasil G.A., Mikhota G.G.* Deep structure of Iceland and the Iceland-Faeroe-Shetland region based on seismic studies (NASP-72) // *Int. Geol. Rev.* 1977. V. 19. P. 11–24.

Reflection of the Mantle Plume Magmatism Processes in the Lithospheric Magnetic Anomalies on the CHAMP Satellite Data

L. M. Abramova¹ and D. Yu. Abramova²

¹ *Geoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth, 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 satellite lithospheric magnetic field is analyzed as a parameter associated with plume magmatism processes occurring in the territory of large igneous magmatic provinces (LIP). It is shown that magnetic anomalies can be considered as images of mantle plumes of various genesis, along with tomographic images of seismic velocities. According to the methods developed by the authors, the parameters of the anomalous magnetic lithospheric field were extracted from the total geomagnetic field data on the CHAMP satellite. An database of lithospheric anomalies was formed, and maps of the modulus of the total vector T_a and the vertical component Z_a anomalies of various scales and observation heights were constructed when its altitude was the lowest. The magnetic images of plumes are illustrated by the example of three plumes of different ages in order of decreasing age: Tarim (~280 Ma), Ethiopian (~60–30 Ma), and Iceland (~0–5 Ma). The relationship between magnetic field anomalies and plume magmatism processes occurring in their territories is analyzed. It was found that ancient mantle plume is reflected in the lithospheric magnetic field as conformal positive anomalies of significant amplitudes. The lithospheric magnetic field of the comparatively “young” Ethiopian and still active Icelandic plumes is greatly reduced. It is shown that satellite observations of the lithospheric magnetic field, in combination with other geological and geophysical data of a regional scale, add valuable information to the overall picture of tectonic processes, allowing one to analyze their degree of magnetization and the temperature state of the lithosphere.

Keywords: lithospheric magnetic anomalies, satellite measurements, large igneous magmatic provinces, Tarim mantle plume, Ethiopian mantle plume, Iceland mantle plume

REFERENCES

- Abramova D.Yu., Abramova L.M.* Litosfernyye magnitnyye anomalii na territorii Sibiri (po izmereniyam sputnika CHAMP) [Lithospheric magnetic anomalies on the territory of Siberia (based on measurements from the CHAMP satellite)] // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55. P. 1081–1092 (In Russian).
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Filippov S.V., Frunze A.Kh.* O perspektivah ispolzovaniya sputnikovyykh izmereniy dlya analiza regionalnykh magnitnykh anomaliiy [On the prospects of using satellite measurements for the analysis of regional magnetic anomalies] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2011. № 6. P. 1–11 (In Russian).
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Varentsov I.V., Filippov S.V.* Issledovaniye litosfernykh magnitnykh anomaliiy Grenlandsko-Islandsko-Farerskogo vulkanicheskogo kompleksa po dannym izmereniy na sputnike CHAMP [Investigation of lithospheric magnetic anomalies of the Greenland-Iceland-Faeroe volcanic complex based on measurements on the CHAMP satellite] // *Geophysical research*. 2019. V. 20. № 6. P. 5–18 (In Russian).
- Abramova D.Yu., Filippov S.V., Abramova L.M.* O vozmozhnostyakh ispolzovaniya sputnikovyykh geomagnitnykh

- nablyudeniye v issledovanii geologo-tektonicheskogo stroeniya litosfery [On the possibilities of using satellite geomagnetic observations in the study of the geological and tectonic structure of the lithosphere] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2020. № 2. P. 69–81 (In Russian).
- Allen R., Nolet G., Morgan W., Vogtfjord K., Nettles M., Ekstrom G., Bergsson B., Erlendsson P., Foulger G., Jakobsdottir S., Julian B., Pritchard M., Ragnarsson S., Stefansson R. Plume-driven plumbing and crustal formation in Iceland // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № B8. P. 1–19. DOI: 10.1029/2001JB000584
- Borisenko A.S., Sotnikov V.I., Izokh A.E., Polyakov G.V., Obolensky A.A. Permotriasovoye orudneniye Azii i yego svyaz s proyavleniyem plyumovogo magmatizma [Permo-Triassic mineralization of Asia and its relation with plume magmatism] // *Russian Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. № 1. P. 166–182 (In Russian).
- Darbyshire F.A., White R.S., Priestley K.F. 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.
- Dobretsov N.L. Geologicheskie sledstviya termohimicheskoy modeli pljumov [Geological implications of the thermochemical plume model] // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49. № 7. P. 587–604 (In Russian).
- Dobretsov N.L. Krupneyshiye magmaticheskiye provintsii Azii (250 mln. let): sibirskiy emeyshanskiy trappy (plato-bazalty) i assotsiirovannyye granitoidy [Large igneous provinces of Asia (250 Ma): Siberian and Emeishan traps (plateau basalts) and associated granitoids] // *Russian Geology and Geophysics*. 2005. V. 46. № 9. P. 870–890 (In Russian).
- Dobretsov N.L., Borisenko A.S., Izokh A.E., Zhmodik S.M. Termokhimicheskaya model permotriasovykh mantiynykh plyumov Yevrazii kak osnova dlya vyyavleniya zakonomernostey formirovaniya i prognoza medno-nikelevykh, blagorodnykh i redkometallnykh mestorozhdeniy [A thermochemical model of Permian-Triassic mantle plumes of Eurasia as a basis for prediction and exploration for Cu–Ni–PGE and rare-metal ore deposits] // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. V. 51. № 9. P. 1159–1187 (In Russian).
- Funck T., Hopper J.R. Crustal structure. Tectonostratigraphic Atlas of the North-East Atlantic Region. Geological Surv. of Denmark and Greenland (GEUS). Copenhagen, Denmark, 2014. P. 69–128.
- Gao Guoming, Guofa Kang, Guangquan Li, Chunhua Bai, Yingyan Wu. An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area // *Acta Geod. et. Geoph.* 2016. DOI: 10.1007/s40328-016-0179-z
- Gao R., Huang D., Lu D. Deep seismic reflection profile across the juncture zone between the Tarim basin and the west Kunlun mountains // *Chin. Sci. Bull.* 2000. V. 45. P. 2281–2286.
- Hjartarson A., Erlendsson O., Blisghke A. The Greenland–Iceland–Faroe Ridge Complex. Geological Society London Special Publications. April 2017. 21 p. DOI: 10.21455/gr2019.2-1
- Huang J., Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. 1–21.
- Kosarev G.L., Petersen N.V., Vinnik L.P., Roecker S.W. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: Contrasts in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 4437–4448.
- Loper D.E. Mantle plumes // *Tectonophysics*. 1991. V. 187. P. 373–384.
- Lysak S.V. Termalnaya evolyutsiya, geodinamika i sovremennaya geotermalnaya aktivnost litosfery Kitaya [Thermal evolution, geodynamics and modern geothermal activity of the lithosphere in China] // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. V. 50. P. 1058–1071 (In Russian).
- Maruyama Sh. Plume tectonics // *Geol. Soc. Japan*. 1994. V. 100. № 1. P. 24–34.
- Mihalfy P., Steinberger B., Schmeling H. The effect of the large-scale mantle flow field on the Iceland hotspot track // *Tectonophysics*. 2008. V. 447. P. 5–18.
- 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. DOI: 10.1029/2006GC001248
- Morgan W. Convection plumes in the lower mantle // *Nature*. 1971. V. 230. P. 42–43.
- Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer Academic Publishers. 2004. 556 p.
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status. 2002. *Advances in Space Research*. V. 30(2). P. 129–134. DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00276-4
- Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools // *Technical reference and cookbook version 4.2*. 2007. <http://gmt.soest.hawaii.edu>.
- Wilson J. A possible origin of the Hawaiian islands // *Canadian J. Physics*. 1963. V. 41. P. 863–870.
- Wolfe C.J., Bjarnason I.T., Van Decar J.C., Solomon S.C. Seismic structure of the Iceland mantle plume // *Nature*. 1997. V. 385. P. 245–247.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kuzmin M.I. Severo-Aziatskiy superplyum v fanerozoey: magmatizm i glubinnaya geodinamika [North Asian superplume in the Phanerozoic: magmatism and deep geodynamics] // *Geotectonics*. 2000. № 6. P. 3–29 (In Russian).
- Zhang L., Xiao W., Qin K., Qu W., Du A. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tian-Shan, NW China, and its geological significance // *Miner. Depos.* 2005. V. 39. P. 960–969.
- Dapeng Z. Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // *Gondwana Res.* 2009. V. 15. P. 297–323.
- Zverev S.M., Kosminskaya I.P., Krasil G.A., Mikhota G.G. Deep structure of Iceland and the Iceland-Faroe-Shetland region based on seismic studies (NASP-72) // *Int. Geol. Rev.* 1977. V. 19. P. 11–24.