

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОТРАЖЕНИЕ МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СПУТНИКОВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ АФРИКИ

© 2023 г. Л. М. Абрамова^а, *, И. М. Варенцов^а, Д. Ю. Абрамова^б

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

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

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

Поступила в редакцию 24.07.2022 г.

Пространственное распределение поля литосферных магнитных аномалий несет информацию о его источниках — глубинных тектонических структурах — и отражает процессы, протекающие на мантийных глубинах. По измеренным спутником CHAMP геомагнитным данным на высоте наблюдения ~290 км рассчитаны параметры литосферного магнитного поля над территорией Африканского континента. Построены серии карт литосферных магнитных аномалий модуля полного вектора поля T_d различных масштабов и степеней осреднения. Приведено распределение T_d над территориями Южной и Восточной Африки. Анализ карт литосферных магнитных аномалий над территориями влияния Африканского суперплюма показал хорошую согласованность с существующей гипотезой о прохождении мантийного потока суперплюма из нижней мантии в верхнюю и его дальнейшем продолжении под Восточно-Африканской рифтовой зоной в северо-восточном направлении. Полученные параметры аномального литосферного магнитного поля содержат информацию о намагниченности глубинных слоев литосферы, отражая магнитные свойства крупных региональных тектонических структур и топографию поверхности Кюри, которая связана с геотермическим режимом и тектонической обстановкой на разных уровнях литосферы. Работа показывает перспективность использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля при изучении тектоники активных зон и картировании глубинных неоднородностей литосферы на труднодоступных территориях.

Ключевые слова: литосферные магнитные аномалии, спутник Земли CHAMP, Африканский суперплюм, мантийный поток, горячая точка Эфиопия/Афар

DOI: 10.31857/S0205961423010025, **EDN:** MLOKBE

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы — изучение морфологии региональных литосферных магнитных аномалий (ЛМА) над Африканским континентом, выделенных непосредственно из спутниковых измерений германского спутника CHAMP, и анализ их связи с геотектоникой и другими геофизическими полями. Регион представляет интерес в связи с наличием крупных геолого-тектонических единиц различной природы и высокой тектонической активностью, а также ограниченным объемом научных исследований, использующих для этих целей параметры ЛМА.

При исследовании глобальной тектоники большое внимание уделяется изучению возникновения, развития и последствий деятельности мантийных плюмов, которые генерируют процессы магматизма и эндогенного рудообразования и считаются ответственными за возникнове-

ние траппов, внутриконтинентальных рифтов и горячих точек (Loper, 1991; Maruyama, 1994; Ярмолюк и др., 2000; Pirajno, 2004; Добрецов, 2008; Zhao, 2009).

Гипотеза мантийного плюма была предложена шесть десятилетий назад Уилсоном (Wilson, 1963). В дальнейшем Морган (Morgan, 1971) для объяснения существования вулканических горячих точек, таких как Гавайи и Исландия, ввел понятие плюмов (*plumes*).

Плюмы — это 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.

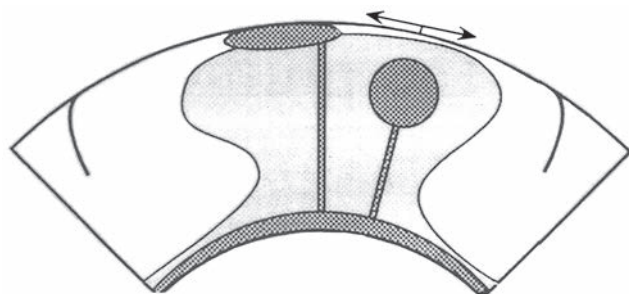


Рис. 1. Компьютерное моделирование геометрии суперплюма (Davies, Pribac, 1993).

Поднимающийся по каналу мантийный материал плюма при подходе к тугоплавкому основанию литосферы не может ее проплавить и начинает растекаться вдоль ее основания. Расплав плюма растекается до тех пор, пока не начинает формироваться “медленный” вторичный плюм, после чего на заключительной стадии процесса возникают центры прорыва магмы на земную поверхность, и происходит массовое (катастрофическое) излияние траппов (пикритов и базальтов) по периферии зоны излияния.

Диаметры приблизившихся к основанию литосферы “голов” плюмов могут достигать от 500 до 3000 км, в то время как “хвосты” плюмов как правило, имеют диаметр от 100 до 500 км.

Поверхностными проявлениями мантийных плюмов являются горячие точки, сфокусированные зоны мантийного плавления, для которых характерны высокий тепловой поток и активный вулканизм.

Плюмы и соответствующие им горячие точки в последние десятилетия активно изучаются геофизическими методами, поскольку позволяют выявлять специфические особенности зарождения и развития мантийных и мантийно – коровых рудообразующих систем, связанных с формированием крупных и уникальных рудных месторождений (Борисенко и др., 2006; Добрецов, 2008).

Основным методом исследования плюмов в настоящее время является сейсмическая томография. Достоверность результатов, полученных этим методом, как и всяким другим, определяется объемом полученных экспериментальных данных.

Большое количество мантийных плюмов и горячих точек расположено либо в океанических, либо в труднодоступных континентальных регионах. Здесь возникают технические трудности при проведении сейсмических работ, и пока мало стационарных сейсмических станций, в том числе, на территории Африканского континента, где расположен Африканский суперплюм (АСП).

В этой ситуации при исследовании процессов, связанных с плюмообразованием, локализацией мантийных плюмов и горячих точек, существен-

ным подспорьем оказывается использование измерений геомагнитного поля спутниками Земли, позволяющее обойти указанные трудности. В частности, возможным и эффективным представляется применение для анализа экспериментальных данных германского спутника CHAMP, что подтверждено результатами проведенных ранее авторами аналогичных исследований (Абрамова и др., 2019, 2020а, 2020б; Абрамова Л., Абрамова Д., 2021).

Уникальность более чем десятилетней миссии германского спутника CHAMP заключается в том, что им были получены огромные массивы высокоточных данных модуля полного вектора и компонент геомагнитного поля в узлах сетки, равномерно покрывающей практически всю поверхность Земли на высотах от 480 до 260 км.

Причем даже в конце “жизни”, в период постепенного естественного снижения орбиты аппарата, магнитометры не прекратили работы, продолжая поставлять качественные данные на весьма низкой высоте ~260 км. Благодаря этому использование экспериментальных данных, полученных на более близких к источникам поля уровнях, где величины ЛМА возрастают примерно в 2 раза, дает возможность построить карты ЛМА с хорошим разрешением.

По современным представлениям, Африканский суперплюм (АСП) – это крупномасштабная тектоническая структура с центром под Южной Африкой, образовавшаяся у основания мантии Земли.

Согласно геолого-геофизическим исследованиям, мантийный поток, произведенный АСП, продолжается от Южной Африки на северо-восток в виде широкого аномального апвеллинга (Ritsema et al., 1999; Ritsema, Allen, 2003; Simmons, et al., 2007; Forte et al., 2010).

Как представляет построенная по данным сейсмических исследований модель (Hansen et al., 2012), 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, Эфиопию, Афар и западную Аравию. Схематичное представление этого процесса иллюстрирует рис. 2.

Далее мы представляем результаты анализа карт магнитных аномалий над Африканским континентом, которые во многом являются образами воздействия Африканского суперплюма на магнитные свойства земной литосферы.

МАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Геомагнитное поле, измеренное на спутнике, является сложной функцией пространства и времени, поэтому основная проблема при выделении его части, относящейся к литосферным магнитным аномалиям, состоит в корректном разделении измеренного суммарного магнитного поля на составляющие, связанные с различными физическими источниками. Для получения их вклада требуется удалить из экспериментальных спутниковых 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), неоднократно подробно приводилась ранее (Абрамова, Абрамова, 2014).

Следует отметить, что материалы миссии CHAMP, полученные в последние годы его 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).

Для анализа распределения поля ЛМА на высотах орбиты из базы данных спутника CHAMP над Африканским континентом были отобраны и обработаны геомагнитные данные, равномерно покрывающие область земной поверхности в пределах 12–44° E и 34° S–16° N.

По разработанным авторами методикам из данных измерений суммарного геомагнитного поля на спутнике CHAMP выделялись параметры аномального литосферного поля. Для исследуемой территории сформирована обширная база данных литосферных аномалий и построены карты модуля полного вектора T_a разных масштабов и высот наблюдения.

Для проверки надежности построений пространственного распределения поля расчет, как всегда, производился для нескольких независимых наборов спутниковых данных. Сравнение полученных вариантов подтвердило достаточно надежное воспроизведение структуры магнитных аномалий.

Количество экспериментальных точек, используемых при анализе каждой области, лежит в пределах 10000–12000.

Детальность построения карт аномального литосферного поля соответствует масштабу основных тектонических структур региона.

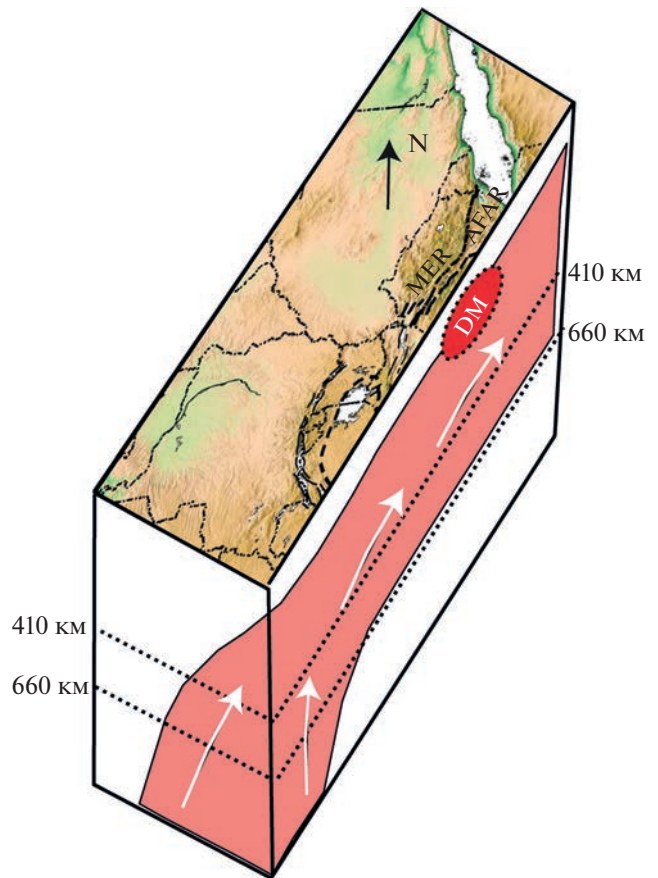


Рис. 2. Предполагаемая структура мантии под восточной частью Африканского континента. Розовая область и белые стрелки изображают поток материала суперплюма, MER — Главный Эфиопский Рифт, DM — зона повышенной степени плавления под горячей точкой Эфиопия/Афар (Hansen, Nyblade, 2013).

КАРТЫ ЛМА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ АФРИКАНСКОГО КОНТИНЕНТА

В настоящее время наиболее полным обобщенным источником глобального распределения магнитного поля является модель WDMAM (*World Digital Magnetic Anomaly Map*), созданная большим коллективом авторов (Maus et al., 2009), включающая в себя базу данных EMAG2, скомпилированную из материалов наземных, спутниковых, морских и аэромагнитных съемок для высоты над геоидом 4 км. Спутниковые магнитные данные брались для альтитуды 400 км.

Второй возможный источник магнитных параметров — непосредственное использование спутниковых данных на различных уровнях наблюдения.

Для выбора оптимального решения при построении карт ЛМА и оценки предпочтительности непосредственно измеренных спутниковых и скомпилированных данных, мы построили две карты распределения поля магнитных аномалий над Африканским континентом, используя мо-

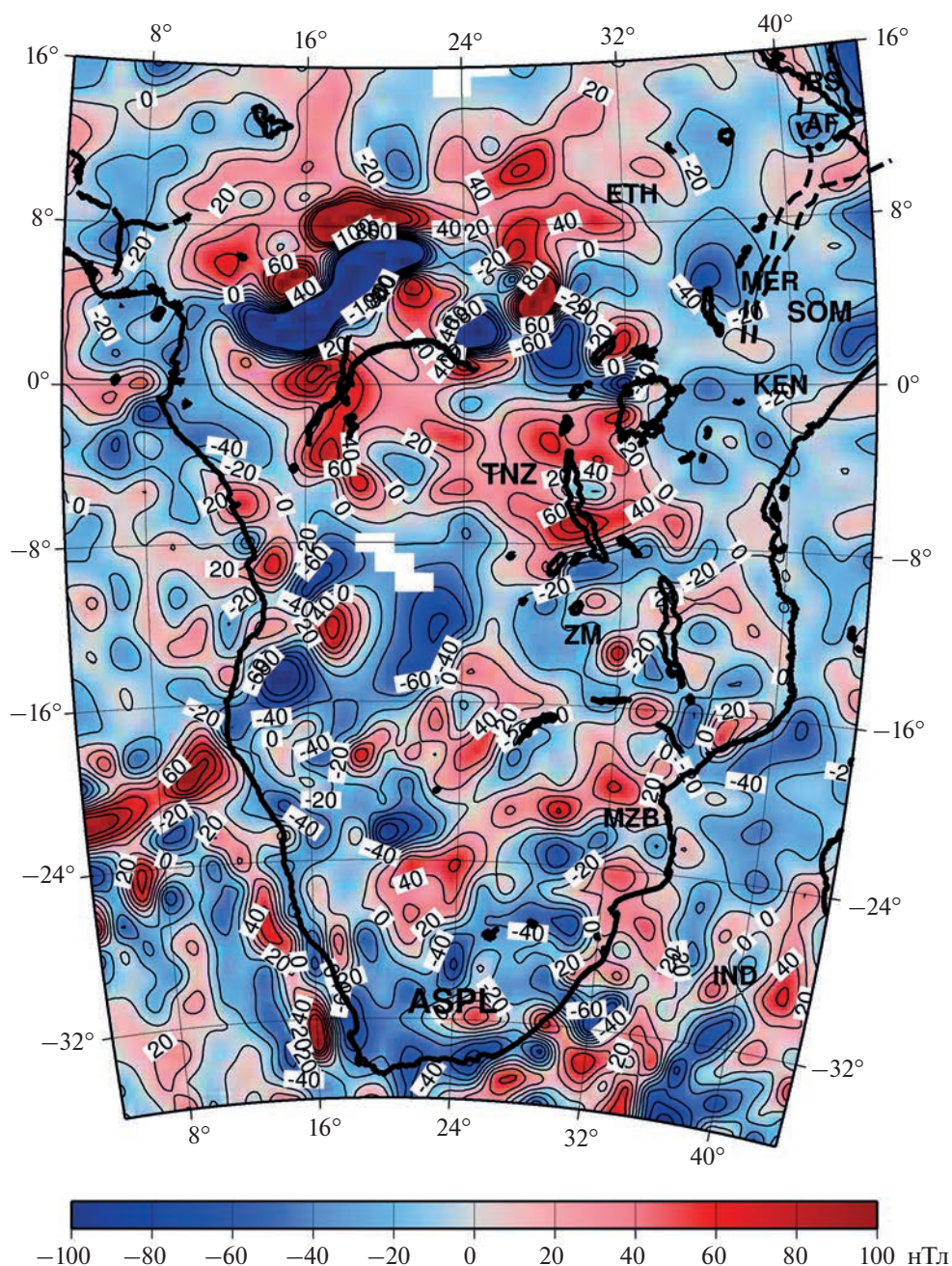


Рис. 3. Карта магнитных аномалий T_a территории Африки, построенная по данным базы EMAG2 (Maus et al., 2009). Высота над геоидом 4 км. Аббревиатуры: ASPL – Африканский суперплюм, IND – Индийский океан; RS – Красное море; государства: MZB – Мозамбик, ZM – Замбия; KEN – Кения; кратоны: KP – Каапваал, ZMB – TNZ Зимбабве; ETH – Эфиопский; SOM – кратон Сомали; AF – депрессия Афар; MER – Главный Эфиопский рифт. Данные используются с осреднением 100×100 км средствами GMT (blockmedian).

дельные данные EMAG2 на уровне 4 км над геоидом и выделенные по нашим технологиям спутниковые магнитные параметры на высоте 290 км.

На рис. 3 представлена карта аномалий модуля полного вектора магнитного поля T_a , построенная по данным базы EMAG2. “Белые пятна” на карте являются следствием ограниченности информации в данных EMAG2 для этих территорий.

Для построения карт литосферного магнитного поля использована программная система GMT (Wessel, Smith, 2007).

Карта ЛМА модуля полного вектора магнитного поля T_a на высоте ~ 290 км над изучаемым регионом представлена на рис. 4. Масштаб карты, параметры осреднения те же, что и на рис. 3.

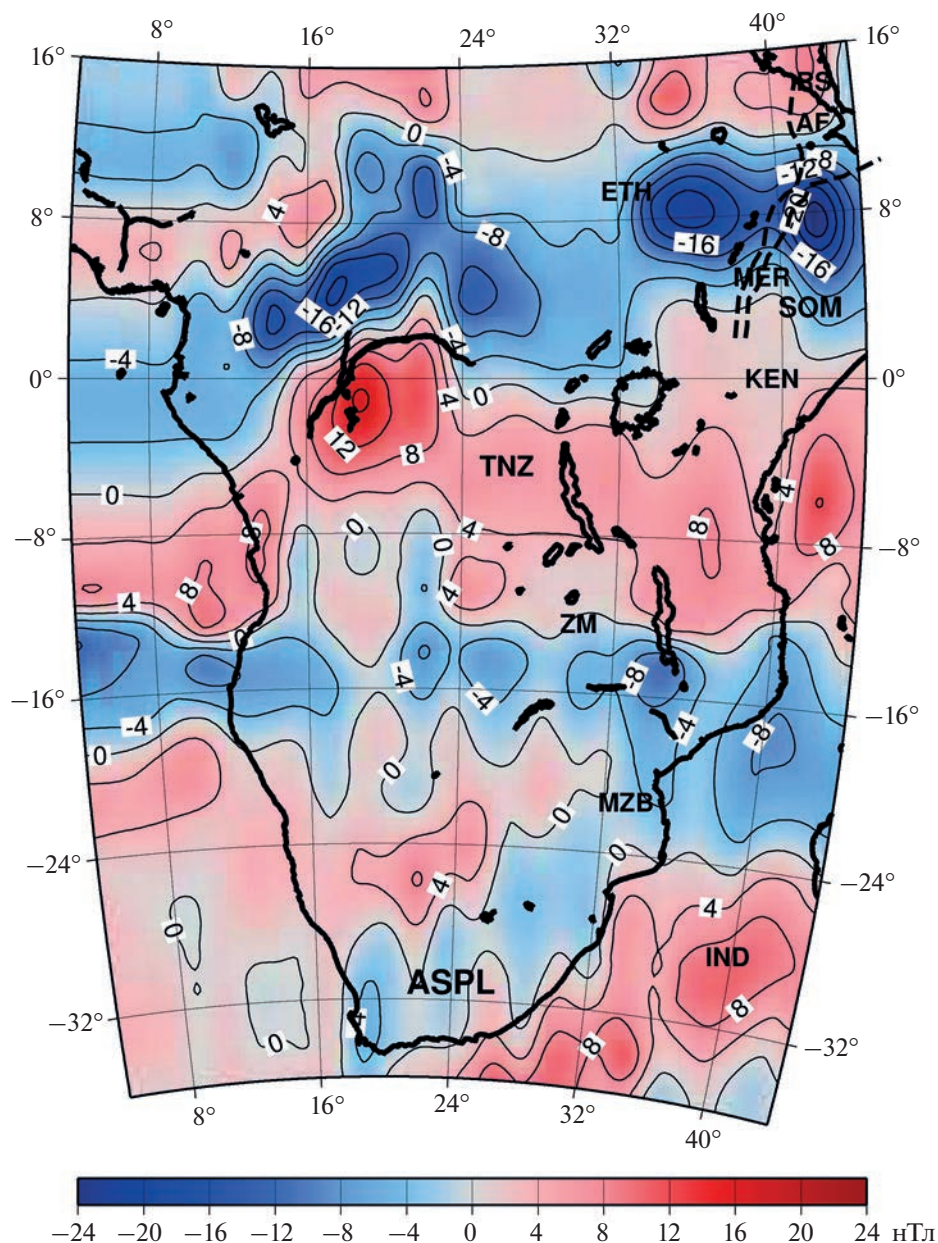


Рис. 4. Карта аномалий T_d над территорией Африканского континента по данным спутника CHAMP на высоте 290 км. Обозначения см. на рис. 3. Данные используются с осреднением 100×100 км средствами GMT (blockmedian).

Сравнение показывает существенное различие карт. На построенной по модельным данным карте наблюдается раздробленность поля на большое количество аномалий разного знака и размера в сравнении с картой ЛМА, построенной по измеренным данным на высоте спутника, рис. 4.

Здесь видны крупные аномалии со сглаженными формами, что представляется вполне логичным, поскольку геомагнитная съемка на спутниковых высотах фактически является пространственным фильтром низких частот, который

подавляет локальные аномалии и сохраняет региональные. Таким образом, на большой высоте в сглаженном виде сохраняются и могут быть выделены в основном аномалии, обусловленные крупными, залегающими на больших глубинах намагниченными структурами, которые и являются предметом изучения и использования при настоящих исследованиях.

Можно считать, что эти две карты, представляющие магнитные аномалии на разных высотах — 4 и ~290 км — отражают пространственное рас-

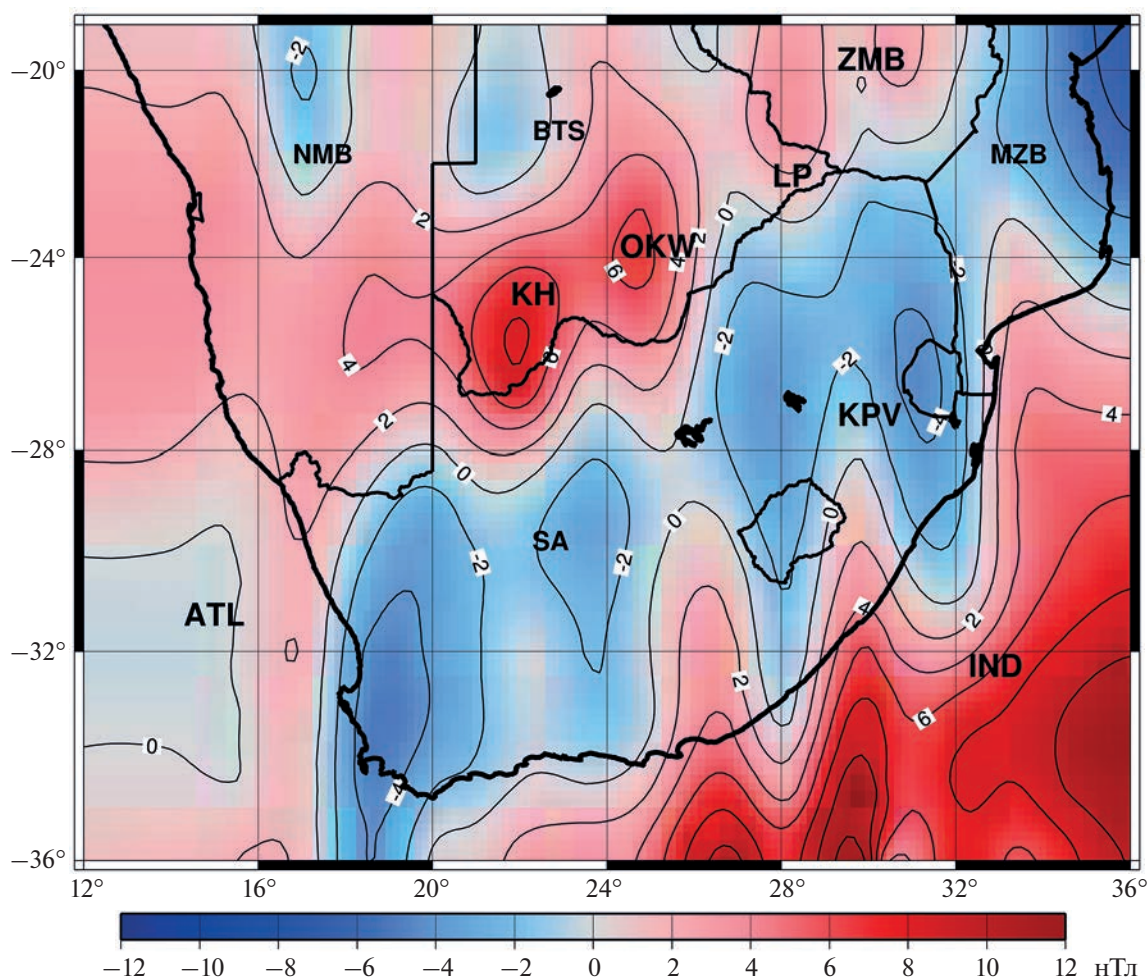


Рис. 5. Карта аномалий магнитного поля T_a над территорией Южной Африки. Аббревиатуры: NMB – Намибия, BTS – Ботсвана, MZB – Мозамбик, SA – ЮАР, ATL – Атлантический океан, IND – Индийский океан; складчатые пояса: KH – Хейсс, OKW – Оква, LP – Лимпопо; кратоны: KP – Каапваал, ZMB – Зимбабве.

пределение магнитных масс в поверхностных, неоднородно намагниченных структурах земной коры, и глубинных слоях литосферы соответственно.

В настоящей работе, анализируя ЛМА над территориями Южной Африки, Восточно-Африканской рифтовой зоны, Главного Эфиопского Рифта и области Эфиопия/Афар, мы будем использовать только непосредственно измеренные данные спутника CHAMP.

ЛМА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЮЖНОЙ АФРИКИ

Глобальные томографические исследования, проведенные на территории Африки в последние два десятилетия, показали наличие там крупных областей с пониженными сейсмическими скоростями поперечных S -волн в нижней и верхней

мантии (Ritsema, et al., 1999; Fouch et al., 2004; Simmons et al., 2007).

Пространственное распределение поля литосферных магнитных аномалий модуля полного вектора магнитного поля T_a , построенное по данным спутника CHAMP на уровне ~ 260 км для территории сектора, ограниченного координатами $20\text{--}36^\circ \text{ S}$ и $12\text{--}36^\circ \text{ E}$, приведено на рис. 5 и представляет собой картину ЛМА, составленную положительными и отрицательными фрагментами магнитного поля. При построении использовано медианное осреднение по блокам размером 60×60 км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

Значительная положительная аномалия T_a наблюдается на видимой части акватории Индийского океана.

Над территориями складчатых поясов Хейсс (KH), Оква (OKW), Лимпопо (LP), протянувшихся с юго-запада на северо-восток, в целом, наблюда-

ется положительное магнитное поле невысокой интенсивности, на фоне которого выделяются аномалии с центрами $26^{\circ}\text{ S}–22^{\circ}\text{ E}$ и $24^{\circ}\text{ S}–25^{\circ}\text{ E}$, соответственно, с более высокими значениями.

Между поясом складчатых поясов и аномалией акватории Индийского океана, практически параллельно поясу положительных аномалий, наблюдается цепь отрицательных магнитных аномалий, также протягивающихся с юго-запада на северо-восток и образующая как бы “коридор” над областью, под которой предполагается местоположение АСП.

Низкий уровень литосферного аномального магнитного поля над этой территорией объясняется тем, что под действием горячего мантийного вещества плюма происходят активные процессы разогрева астеносферы, поднимающие уровень глубины, на которой достигается температура Кюри для ферромагнитных минералов, когда исчезают их магнитные свойства, что ведет к сокращению мощности магнитоактивного слоя литосферы.

Простирание пояса отрицательных литосферных магнитных аномалий четко соответствует существующей гипотезе о предполагаемом направлении движения мантийного потока АСП в северо-восточном направлении.

ЛМА НАД ВОСТОЧНОАФРИКАНСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНОЙ

В качестве следующего шага была поставлена задача проверить соответствие распределения ЛМА гипотезе распространения мантийного потока АСП под территорией Восточной Африки.

Разумеется, следует отдавать себе отчет в том, что мантийный поток, направляющийся от АСП на северо-восток, как это иллюстрирует модель на рис. 2, идеализирован, поскольку он не отражает флуктуаций, которые могут возникнуть из-за гетерогенного строения земной литосферы.

Локальные изменения формы мантийного потока могут происходить, например, вокруг областей с мощной архейской литосферой, либо при подъеме потока под области с более тонкой литосферой, что, в свою очередь, должно продуцировать неоднородности в поведении геофизических полей. Тем не менее, несмотря на естественную неоднородность мантийного потока, томографические данные указывают на существование доминирующего северо-восточного вектора, достаточного, чтобы объяснить происхождение нагретого материала под всей территорией Восточной Африки (Bagley, Nyblade, 2013).

Для оценки степени воздействия мантийного потока, произведенного АСП на структуру литосферного магнитного поля на территории Восточной Африки, были построены и проанализиро-

ваны серии карт модуля полного вектора магнитного поля T_a на планшетах $6^{\circ}\text{ S}–14^{\circ}\text{ N}$, $28^{\circ}–46^{\circ}\text{ E}$ с различными параметрами осреднения. В качестве исходных данных использованы измерения геомагнитного поля спутником CHAMP за 2010 г. на высоте наблюдения ~ 290 км.

Пример одной из таких карт T_a приведен на рис. 6. Использовано медианное осреднение по блокам размером 80×80 км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

Из рис. 6 видно, что практически все аномальное магнитное поле над территорией Восточной Африки к северу от экватора представляет собой область отрицательных значений различной интенсивности.

На общем фоне пониженных значений поля выделяются изометричные области отрицательных магнитных аномалий с амплитудами от 6 до 21 нТл в области Главного Эфиопского рифта (MER) и в крайней северо-восточной части Восточно-Африканской рифтовой зоны (EARZ). Они расположены практически на одной широте и имеют центры в $7.5^{\circ}\text{ N}–38^{\circ}\text{ E}$; $7.5^{\circ}\text{ N}–47.5^{\circ}\text{ E}$, соответственно. Аномалии тяготеют к территории Главного Эфиопского рифта, обозначенного на карте пунктирными линиями.

К югу от экватора, напротив, выделяется зона интенсивных положительных ЛМА T_a , образующих обширную неоднородную область со значениями более 10 нТл, тяготеющую в континентальной части своим центром к Танзанийскому кратону (TNZ). На акватории Индийского океана (IND) амплитуда положительной аномалии достигает значений 20–22 нТл.

Современная тектоника данной территории, включающей в себя Эфиопское плато, Восточно-Африканскую рифтовую зону и Танзанийский кратон, достаточно хорошо изучена различными сейсмическими методами.

Рис. 7 иллюстрирует результаты сейсмических исследований, обобщенные в виде модели PRI-S05. Цветом обозначены отклонения скоростей S-волн в большую или меньшую сторону от средней мантийной скорости соответственно (Montelli et al., 2006).

В результате анализа было сделано предположение, что зона аномальных сейсмических скоростей Афар является следствием плюмовой активности, так называемого, Эфиопского плюма, массовые излияния которого произошли 30–37 млн лет назад (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.

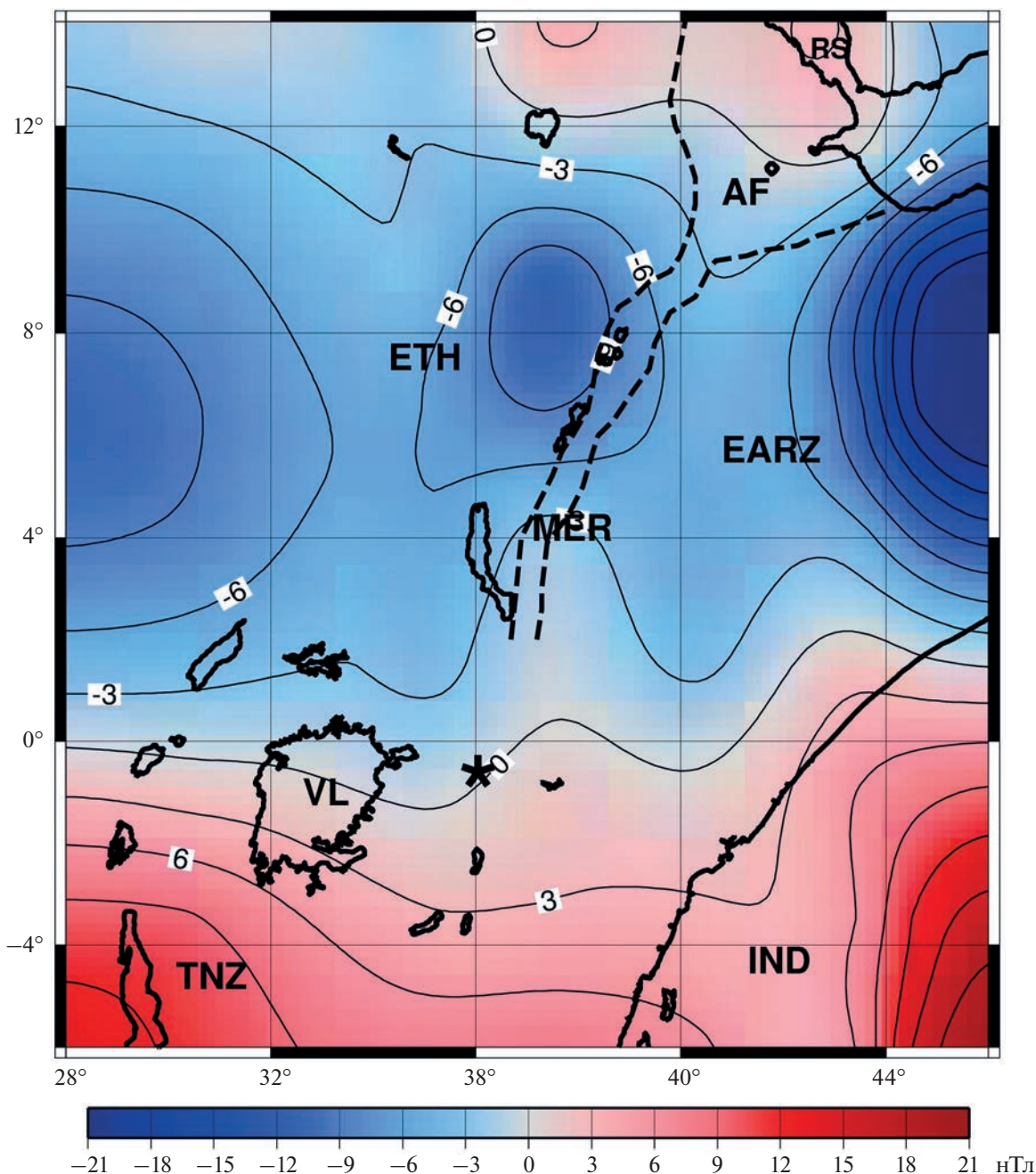


Рис. 6. Карта ЛМА T_a над территорией Восточной Африки на высоте 290 км. Аббревиатуры: ETH – Эфиопское плато; AF – депрессия Афар; MER – Главный Эфиопский рифт; EARZ – Восточно-Африканская рифтовая зона; TNZ – Танзанийский кратон; RS – Красное море; IND – Индийский океан; VL – озеро Виктория.

Наблюдаемая в этом регионе значительная область отрицательных величин литосферного магнитного поля вполне соответствует представлению о потере веществом нижней части земной коры магнитных свойств и соответствующему уменьшению мощности магнитоактивного слоя, произошедшим в результате длительного прогрева литосферы и поднятию изотермы Кюри магнетита.

Наличие положительной магнитной аномалии в районе Танзанийского кратона (TNZ) (рис. 6) говорит о том, что литосфера в этой области мощная и холодная, а ее вещество обладает высокой намагниченностью. Это заключение вполне согласуется с существованием к юго-западу от озера Виктория (VL) зоны повышенных сейсмических скоростей (см. рис. 7), полученной по результа-

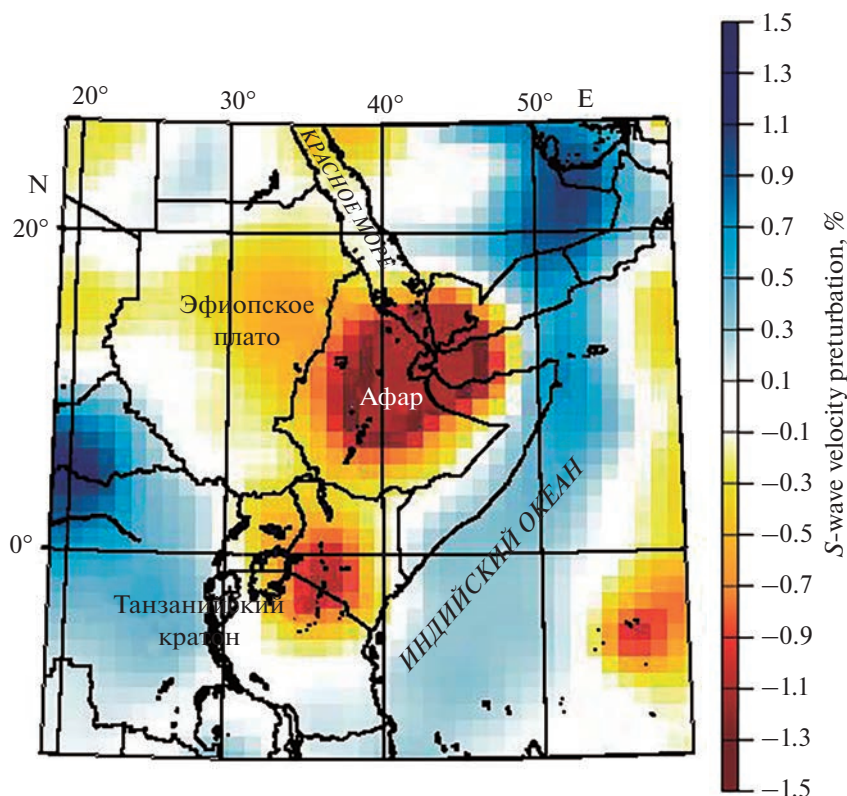


Рис. 7. Сечение скоростной модели S-волн PRI-S05 по данным томографии на глубине 300 км (Montelli et al., 2006).

там сейсмической томографии (Montelli et al., 2006).

Согласно сейсмическим данным, Танзанийский кратон по периметру окружен неоднородными зонами анизотропии сейсмической скорости. Такие особенности могут быть обусловлены обтеканием мантийного материала вокруг областей с более мощной литосферой, так называемых, астеносферных корней, которые обнаружены под кратоном Танзания (Bagley, Nyblade, 2013). Этим, по-видимому, и объясняется возникновение неоднородностей геофизических полей.

Область пониженных скоростей с центром 3°S — 37°E в восточной части Танзанийского кратона (рис. 7), которую принято обозначать как Танзанийский плюм, скорее всего, является следствием подобных локальных процессов. Здесь может происходить более сильный прогрев краевой части Танзанийского кратона мантийным веществом Африканского плюма, что и является причиной понижения сейсмических скоростей.

На карте поля литосферных магнитных аномалий (на рис. 6 эта область отмечена звездочкой) эта область достаточно хорошо визуализируется изолиниями, изменяющими направление на субмеридиональное в районе 2°S — 40°E , и характеризуется пониженными значениями T_a по отно-

шению к расположенным западнее и восточнее территориям. Однако отрицательные значения поля T_a здесь не достигают такого аномального уровня, как в области Эфиопия/Афар, что может свидетельствовать о меньшем объеме расплава, вовлеченного в процесс, либо о большей глубине протекания этого процесса.

ВЫВОДЫ

Анализ пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий, построенного по данным измерений геомагнитного поля на спутнике CHAMP над территорией Африканского континента, показал его адекватность существующей в настоящее время гипотезе о воздействии Африканского суперплюма на протекание мантийных процессов в Южной Африке и далее в северо-восточном направлении.

Положение и характеристики крупных литосферных магнитных аномалий, выделенных над территорией Южной Африки, в общем, согласуются с современными представлениями о геотектонических и геофизических процессах, вызванных воздействием на эту территорию Африканского суперплюма.

Показано, что существование в магнитном поле над территорией Восточной Африки аномалий

разных знаков с высокой долей вероятности может быть генетически связано с прохождением в данном регионе потока мантийного материала суперплюма в северо-восточном направлении.

В целом обнаружено хорошее соответствие положения магнитных образов наиболее значительных литосферных аномалий моделям томографических образов сейсмических скоростей, полученным на основе большого сейсмического эксперимента SASE.

Полученные параметры аномального литосферного магнитного поля содержат информацию о намагниченности глубинных слоев литосферы, отражая свойства крупных региональных тектонических структур, топографию поверхности Кюри, связанную с геотермическим режимом на разных уровнях литосферы, что свидетельствует о перспективности использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля при изучении тектоники активных зон литосферы в труднодоступных регионах.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Внешнее финансирование отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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. 2020а. № 2. С. 69–81.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420010029>
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н. Отражение тектоники Восточной Европы в литосферных магнитных аномалиях спутниковой миссии CHAMP // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 47-й сессии Межд. сем. им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Воронеж: Научная книга. 2020б. С. 3–7.
- Абрамова Л.М., Абрамова Д.Ю. Отражение процессов мантийного плюмового магматизма в литосферных магнитных аномалиях, полученных по данным спутника CHAMP // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 4. С. 3–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421040023>
- 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. Геологические следствия термохимической модели плюмов // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 587–604.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. 2000. № 6. С. 3–29.
- Bagley B., Nyblade A. Seismic anisotropy in eastern Africa, mantle flow, and the African superplume // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 1500–1505.
<https://doi.org/10.1002/grl.50315>
- Davies G., Pribac F. Mesozoic seafloor subsidence and the Darwin rise: past and present // American Geophys. Union Monograph. 1993. V. 77. P. 39–52.
- Forte A., Qu'ere 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.
- Fouch M.J., James D.E., Van Decar J., van der Lee S., the Kaapvaal Seismic Group. Mantle seismic structure beneath the Kaapvaal and Zimbabwe cratons // S. Afr. J. Geol. 2004. V. 107. P. 33–44.
<https://doi.org/10.2113/107.1-2.33>
- 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(1). P. 118–124.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggt116>
- Loper D.E. Mantle plumes // Tectonophysics. 1991. V. 187. P. 373–384.
- Maruyama Sh. Plume tectonics // Geol. Soc. Japan. 1994. V. 100. P. 24–34.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks P., Luhr H., Milligan P., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., The'bault E., Caratori Tontini F. EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosyst. 2009. V. 10 (8). Q08005.
<https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- 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 // *Advances in Space Research* 2002. V.30. P. 129–134. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4).
- Ritsema J., van Heijst H., Woodhouse J. Complex shear wave velocity structure beneath Africa and Iceland // *Science*. 1999. V. 286. P. 1925–1928.
- Ritsema J., Allen R. The elusive mantle plume // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 207. P. 1–12.
- Simmons N., Forte A., Grand S. Thermochemical structure and dynamics of the African superplume // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34(2). L02301. <https://doi.org/10.1029/2006GL028009>
- 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.
- Zhao Dapeng. Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // *Gondwana Research*. 2009. V. 15. P. 297–323.

Image of Mantle Plume Processes in the Satellite Magnetic Field Over Africa Territory

L. M. Abramova¹, I. M. Varentsov¹, and 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 field carries information about its sources – deep tectonic structures – and reflects the processes occurring at mantle depths. Based on the geomagnetic data measured by the CHAMP satellite at an observation altitude of ~290 km, the lithospheric magnetic field parameters over the territory of the African continent were calculated. A lot of maps of the lithospheric magnetic anomalies field total intensity T_a based on various scales and degrees have been constructed. The distribution of T_a over the territories of South and East Africa is given. An analysis of lithospheric magnetic anomalies maps over the territories of African superplume influence showed good agreement with the existing hypothesis about the mantle superplume flow intrusion from the lower mantle to the upper mantle in the northeast direction and its further spread under the East African rift zone. The obtained parameters of the anomalous lithospheric magnetic field contain information about the magnetization of the lithosphere deep layers, reflecting the magnetic properties of large regional tectonic structures and the topography of the Curie surface, which is associated with the geothermal regime and tectonic setting at different levels of the lithosphere. The work shows the perspective of the geomagnetic field satellite observations using in the study of the active zones tectonics and mapping of deep lithosphere heterogeneities in hard-to-reach areas.

Keywords: lithospheric magnetic anomalies, CHAMP, African superplume, mantle flow, Ethiopia/Afar hotspot

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., Varentsov I.V., Filippov S.V. Issledovaniye litosfernykh magnitnykh anomalii Grenlandsko-Islandsko-Farerskogo vulkanicheskogo kompleksa po dannym izmereniy na sputnike CHAMP [Investigation of lithospheric magnetic anomalies of the Greenland-Iceland-Faroe 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 sputnikovykh geomagnitnykh nablyudeniy v issledovanii geologo-tektonicheskogo stroyeniya 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*. 2020a. № 2. P. 69–81. (in Russian).
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Varentsov I.V., Lozovsky I.N. Otrazheniye tektoniki Vostochnoy Yevropy v litosfernykh magnitnykh anomaliyakh sputnikovoy missii CHAMP [Image of the tectonics of Eastern Europe in the lithospheric magnetic anomalies of the CHAMP satellite mission] // *Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Proceedings of the 47th session of the D.G. Uspensky – V.N. Strakhov. Voronezh: Scientific book*. 2020b. P. 3–7.
- Abramova L.M., Abramova D.Yu. Otrazheniye protsessov mantiynogo plyumovogo magmatizma v litosfernykh magnitnykh anomaliyakh, poluchennykh po dannym sputnika CHAMP [Image of the Mantle Plume Magmatism Processes in the Lithospheric Magnetic Anomalies on the CHAMP satellite Data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2021. № 4. P. 3–14. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961421040023>
- Bagley B., Nyblade A. Seismic anisotropy in eastern Africa, mantle flow, and the African superplume, *Geophys. Res. Lett.*, 2013. V. 40. P. 1500–1505. <https://doi.org/10.1002/grl.50315>.
- 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 [Permian-Triassic mineralization of Asia and its relationship with the manifestation of plume magmatism] // *Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. № 1. P. 166–182. (in Russian).
- Davies G., Pribac F.*, Mesozoic seafloor subsidence and the Darwin rise: Past and Present, *American Geophys. Union Monograph*. 1993. V. 77. P. 39–52.
- 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).
- Forte A., Qu'ere 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.
- Fouch M.J., James D.E., Van Decar J., van der Lee S., the Kaapvaal Seismic Group.* Mantle seismic structure beneath the Kaapvaal and Zimbabwe cratons/ *S. Afr. J. Geol.*, 2004/ V. 107. P. 33–44.
<https://doi.org/10.2113/107.1-2.33>
- 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.
- Hansen S., Nyblade, A.* The deep seismic structure of the Ethiopia/Afar hotspot and the African superplume // *Geophys. J. Int.* 2013. V. 194(1). P. 118–124.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggt116>
- 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.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., Milligan P., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., The'bault E., Caratori Tontini F.* EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2009. V. 10(8). Q08005.
<https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- 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 // *Advances in Space Research* 2002. V. 30. P. 129–134.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4)
- Ritsema J., van Heijst H., Woodhouse J.* Complex shear wave velocity structure beneath Africa and Iceland // *Science*. 1999. V. 286. P. 1925–1928.
- Ritsema J., Allen R.* The elusive mantle plume // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 207. P. 1–12.
- Simmons N., Forte A., Grand S.* Thermochemical structure and dynamics of the African superplume // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34(2). L02301.
<https://doi.org/10.1029/2006GL028009>
- 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.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kuzmin M.I.* Severo-Aziatskiy superplyum v fanerozoie: magmatizm i glubinnaya geodinamika [North Asian superplume in the Phanerozoic: magmatism and deep geodynamics] // *Geotectonics*. 2000. № 6. P. 3–29. (in Russian).
- Zhao Dapeng.* Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // *Gondwana Research*. 2009. V. 15. P. 297–323.