_____ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ __ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНОМАЛЬНОЕ ЛИТОСФЕРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ГОРЯЧЕЙ ТОЧКИ ЭФИОПИЯ/АФАР (ПО ДАННЫМ МИССИИ СПУТНИКА СНАМР)

© 2022 г. Д. Ю. Абрамова^{*a*}, Л. М. Абрамова^{*b*, *}

^аИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, г. Троицк, Россия ^bЦентр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта,

промагнитных исслеоовании тнетитута физики Земли им. О.К Москва, г. Троицк, Россия *E-mail: labramova@mail.igemi.troitsk.ru Поступила в редакцию 13.05.2022 г.

Рассмотрена связь пространственного распределения литосферных магнитных аномалий, полученных по данным миссии германского спутника СНАМР, с проявлениями тектонических процессов, обусловленных движением Африканского суперплюма на территории Африки. В качестве источника данных в работе использованы измерения модуля полного вектора геомагнитного поля спутником СНАМР на высотах ~290-260 км для области с координатами 12°-44° Е и 30° S-16° N. Анализ построенных по этим данным карт показал, что простирание отрицательных магнитных аномалий согласуется с доминирующим северо-восточным вектором движения мантийного потока Африканского суперплюма. Вслелствие прогрева литосферы мантийным веществом суперплюма по лостижении значений температуры Кюри порядка 580°, намагниченные структуры нижней коры теряют магнитные свойства, и происходит "отслеживание" траектории мантийного потока. Проанализировано соответствие литосферных магнитных аномалий одной из двух версий местоположения плюма Эфиопия/Афар и его центральной части, горячей точки: на территории депрессии Афар, или в области Главного Эфиопского рифта. Магнитные образы определяющих отрицательных аномалий фиксируются именно над Главным Эфиопским рифтом и подтверждают вторую тектоническую гипотезу. Это также находится в соответствии с моделью Р-волн горячей точки, исследующей эту проблему. На малых (<~400 км) глубинах, самые низкие скорости сосредоточены под Главным Эфиопским рифтом, что согласуются с магнитными данными.

Ключевые слова: литосферные магнитные аномалии, спутник СНАМР, Африканский суперплюм, мантийный поток, плюм и горячая точка Эфиопия/Афар **DOI:** 10.31857/S0205961422050025

введение

По современным представлениям за возникновение траппов, внутриконтинентальных рифтов и горячих точек ответственными считаются мантийные потоки, продвигающиеся к поверхности Земли от основания мантии в виде "горячей струи" расплава, так называемые плюмы (Loper, 1991; Maruyama, 1994; Pirajno, 2004; Добрецов, 2008). Горячие точки — это поверхностные проявления мантийных плюмов, сфокусированные зоны плавления, для которых характерны высокий тепловой поток и активный вулканизм. Изучение мантийных плюмов и горячих точек. оценка их геолого-тектонических параметров весьма перспективны, поскольку позволяет выявлять специфические особенности зарождения и развития мантийных и мантийно-коровых рудообразующих систем, связанных с формированием крупных и уникальных рудных месторождений (Добрецов, 2008).

Плюмы и горячие точки эффективно изучаются геофизическими методами, однако пока еще не достаточно хорошо изучены. Основным методом исследования в настоящее время является сейсмическая томография, однако здесь успешность и эффективность результата определяет объем экспериментальных данных. К сожалению, большое количество горячих точек и мантийных плюмов расположены в океанических и труднодоступных континентальных регионах, таких как Африка, Южная Америка, Тибет, где возникают серьезные технические трудности при проведении сейсмических работ, и пока мало сейсмических станций.

Существенным преимуществом использования спутниковых геомагнитных данных является возможность анализа и интерпретации огромных массивов компонент поля и построения карт литосферных магнитных аномалий (ЛМА) в областях, где практически отсутствуют приземные измерения, таких, например, как полярные зоны, пустыни и высокогорные области.

Аномальное магнитное поле, полученное по измерениям спутников на высоте их орбит, можно рассматривать как некоторую региональную характеристику, указывающую на закономерности распределения различных типов крупных магнитных неоднородностей в литосфере, при этом происходит фильтрация локальных магнитных аномалий, связанных с намагниченными породами, находящимися в верхних слоях земной коры.

Карты литосферных магнитных аномалий (ЛМА), построенные по спутниковым данным, содержат информацию о современной намагниченности глубинных слоев литосферы, являясь образами региональных тектонических структур, и, кроме того, отражают геотермическую обстановку в их пределах (Gao et al., 2017). Параметры ЛМА, отражающие положение тектонических структур и их физические свойства, далее используются для комплексных исследований совместно с другими геолого-геофизическими методами.

Развиваемые нами технологии выделения параметров ЛМА из суммарного магнитного поля, измеренного на спутнике СНАМР, обеспечивают достаточно точное определение положения и параметров литосферных магнитных аномалий (Абрамова и др., 2019; 2020; Абрамова Л., Абрамова Д., 2021). Для построения карт ЛМА конкретных регионов из суммарных значений спутникового геомагнитного поля по специальным методикам выделяются необходимые характеристики аномального магнитного поля в узлах координатной сетки, равномерно покрывающей область исследования. Приоритетно используются данные 2008-2010 г., поскольку снизившаяся в этот период высота орбиты СНАМР позволяет получать повышенную (до 2-3 раз) величину амплитуды аномалий. Количество использованных для анализа значений каждой компоненты поля, как правило, составляет ~10000-12000.

Геомагнитное поле на спутниковых высотах является сложной функцией пространства и времени. Основная проблема при проведении его анализа состоит в корректном исключении из измеренного суммарного магнитного поля составляющих, связанных с другими физическими источниками: главного поля, генерируемого в жидкой части земного ядра; полей от токов в проводящих слоях земной коры и верхней мантии: внешних полей магнитосферно-ионосферных токовых систем. Эта проблема решается с использованием актуальных математических моделей, используемых для исключения из суммарного поля "лишних" полей. Причем, это происходит в рамках постоянно совершенствуемой оригинальной методики (Абрамова Д., Абрамова Л., 2014).

Плюм и горячая точка Эфиопия/Афар, о которых идет речь в данной работе, являются одними из самых известных геофизических и геохимических аномалий на Земле.

Задача работы — показать связь пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий (ЛМА), полученного по данным миссии спутника СНАМР, с проявлениями тектонических процессов, обусловленных Африканским суперплюмом на территории Африканского континента.

ЛИТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ АФРИКАНСКОГО КОНТИНЕТА

В данном разделе анализируются магнитные образы ЛМА, отражающие последствия геологотектонических процессов, сопровождающих движение мантийного потока, произведенного Африканским суперплюмом на Африканском континенте.

По современным представлениям, Африканский суперплюм (ASPL) - это крупномасштабная магматическая структура, расположенная у основания мантии, с центром под Южной Африкой. Согласно современным геолого-тектоническим представлениям, мантийный поток Африканского суперплюма продолжается из нижней мантии на северо-восток в виле широкого аномального апвеллинга (Ritsema et al., 1999; Ritsema, Allen, 2003; Simmons et al., 2007; Forte et al., 2010). Далее, по данным результатов исследований, например, (Hansen, Nyblade, Benoit, 2012), мантийный поток поднимается из нижней мантии в переходную зону, затем пересекает ее под северной Замбией, поднимается далее в верхнюю мантию и продолжается в северо-восточном направлении под Кению, Эфиопию, Афар и западную Аравию. Схематичное представление этого процесса иллюстрирует рис. 1.

Для рассмотрения целостной картины образов ЛМА, отражающих предполагаемое прохождение мантийного потока и его последующего влияния на территории Восточной Африки, была создана обширная база геомагнитных спутниковых данных этой территории. В зависимости от конкретных задач эти приведенные в удобную форму экспериментальные данные могут быть использованы для анализа ЛМА, как всей области, так и отдельных ее сегментов.

Карта пространственного распределения поля ЛМА на уровне 290 км, построенная на планшете с координатами $12^{\circ}-44^{\circ}$ Е и 30° S -16° N приведена на рис. 2 и являет собой пеструю картину, составленную положительными и отрицательными фрагментами магнитного поля. При построении использовано медианное осреднение по крупным

блокам размером 150 × 150 км по программе GMT (Wessel, Smith, 2007).

В южной части Африки (см. рис. 2) в зоне действия источника мантийного потока, Африканского суперплюма (ASPL), наблюдаются магнитные аномалии обоих знаков.

Над территориями складчатых поясов Хейсс (КН), Оква (ОКW), Лимпопо (LP), протянувшихся с юго-запада на северо-восток, в целом, наблюдается положительное магнитное поле. Значительная область положительных значений магнитного поля также приурочена к акватории Индийского океана (IND).

Практически параллельно поясу положительных магнитных аномалий, ближе к юго-восточному побережью Африки, расположена полоса отрицательных магнитных аномалий, также протягивающихся с юго-запада на северо-восток и свидетельствующих об отсутствии магнитных свойств у пород нижней части литосферы.

Для изучения проявлений ASPL в геофизических полях, был проведен масштабный сейсмический эксперимента SASE (James et al., 2001; Fouch et al., 2004), охватывающий территории кратонов Каапваал (КР) и Зимбабве (ZM), а также подвижный пояс Лимпопо. Исследования показали наличие в мантии областей с аномально низкими сейсмическими скоростями, особенно значительных у самой южной оконечности Африканского материка, свидетельствующих о присутствии здесь следов мантийного расплава.

Ланные по высокоскоростным сейсмическим аномалиям и оценке тепловой мощности литосферы на этой территории были дополнены результатами магнитотеллурических (МТ) работ. Модели проводимости, полученные на основе МТ данных, предоставили дополнительную информацию о свойствах литосферы и расширили возможности интерпретации сейсмических и геохимических подходов. Они показали, что астеносфера, окружающая кратон Каапваал, на удивление проводящая, что предполагает либо наличие потоков флюидов, образующихся при глубинной дегидратации, либо мантийный нагрев, либо и то, и другое (Evans et al., 2011), то есть, наблюдаются признаки воздействия на литосферу мантийного нагрева.

Выводы данных исследований подтверждаются результатами построенного распределения поля ЛМА над этой территорией. Происходит сильный прогрев литосферы мантийным веществом плюма, в результате которого, когда температура Кюри достигает значений порядка 580°, намагниченные породы нижней коры теряют магнитные свойства, что проявляется в свойствах аномального магнитного поля.

Простирание пояса отрицательных ЛМА над территорией Южной Африки и далее в северо-во-



Рис. 1. Предполагаемая структура мантии под восточной частью Африканского континента. Розовая область и белые стрелки изображают поток материала суперплюма; МЕR: Главный Эфиопский Рифт, DM: зона повышенной степени плавления под горячей точкой Эфиопия/Афар (Hansen, Nyblade, 2013).

сточном направлении четко согласуется с существующей гипотезой об аналогичном продвижении мантийного потока Африканского суперплюма.

Однако далее к северо-востоку, начиная от $\sim 12^{\circ}$ S и до экватора, наблюдается обширный пояс положительных ЛМА с весьма значительными амплитудами, демонстрирующий как бы отсутствие реакции в магнитном поле на воздействие мантийного потока.

Возможные источники этой, одной из самых выдающихся литосферных магнитных аномалий, зафиксированных на высоте спутника СНАМР, ранее обсуждалась Хемантом и Маусом (Hemant, Maus, 2005). Даже на значительно большей высоте наблюдения 400 км, на которой работал СНАМР в тот период, она имела значительную величину и труднообъяснимую природу. Следуя гипотезе о возможном размещении базальтов в нижней части коры в результате панафриканского горообразования (Pin, Poidevin, 1987; Clark, 1999), Xeмант и Маус предположили, что, возможно, в этой части центральноафриканского региона присутствует мошная нижняя кора, построенная железомарганцевыми минералами. Как следствие, магнитная восприимчивость этих пород должна иметь весьма высокие значения Состав такой коры критически отличается от данных, наблюдаемых поверхностной геологией. Приняв эти допущения и задавая параметры очень мощной коры, в построенной модели магнитной ано-



-14 -12 -10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10 12 14 нТл

32°

40°

24°

Рис. 2. Карта аномалий магнитного поля *T_a* над территорией Южной Африки. Аббревиатуры: ASPL Африканский суперплюм, IND — Индийский океан; RS Красное море; государства: MZB — Мозамбик, ZM Замбия; KEN Кения; складчатые пояса на территории Южной Африки: КН — Хейсс, OKW — Оква, LP — Лимпопо; кратоны: КР — Каапваал, ZMB — Зимбабве; ЕТН Эфиопский; SOM — кратон Сомали; AF депрессия Афар; MER — Главный Эфиопский рифт.

16°

малии ими было получено приемлемое согласие измеренных и модельных данных (Hemant, Maus, 2005).

При прохождении под такой мощной корой мантийного потока, для ее прогрева требуется длительное время и, по-видимому, ее породы пока сохраняют магнитные свойства. Это подтверждается более глубоким положением изотермы Кюри в этой области (Artemieva, Mooney, 2001).

В качестве следующего шага исследования была поставлена задача: рассмотреть, отвечает ли распределение ЛМА на территории Восточной Африки гипотезе прохождения мантийного потока Африканского суперплюма вплоть до Аравийского полуострова.

Разумеется, следует отдавать себе отчет в том, что траектория мантийного потока от ASPL, как это показано на рис. 1, идеализирована, поскольку на его пути могут возникнуть флуктуации, вызванные неоднородным строением астеносферы и литосферы. Локальные изменения формы и направления 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 несомненную гетерогенность мантийного потока, томографические данные указывают на существование доминирующего северовосточного вектора, достаточного, чтобы объяснить происхождение нагретого материала под всей территорией Восточной Африки (Bagley, Nyblade, 2013).

ПЛЮМ ЭФИОПИЯ-АФАР

В последние десятилетия активно обсуждаются происхождение и природа горячей точки Эфиопия/Афар — одной из самых ярких геофизических и геохимических аномалий на Земле. Считается, что своим происхождением она обязана продвижению разогретого мантийного материала Африканского суперплюма в верхнюю мантию и его массовым излияниям, произошедшим 30–37 млн лет назад (Ritsema, Allen, 2003; Simmons et al., 2012; Добрецов, 2008; Gao et al., 2010, Forte et al. 2010).

К настоящему времени существует две версии местоположения плюма Эфиопия/Афар и его центральной части, горячей точки: согласно первой — это территория котловины Афар, согласно второй — область Главного Эфиопского рифта.

Обе эти гипотезы получены посредством интерпретации данных продольных и поперечных сейсмических скоростей, но с использованием различных методов. Так при их интерпретации данных глобальных исследований, например, (Ritsema, Allen, 2003; Montelli et al., 2006; Simmons et al., 2012) получалось, что самые низкие сейсмические скорости выявляются под депрессией Афар (AF), что долгое время интерпретировалось как центр горячей точки. Однако при построении моделей регионального масштаба с более высоким разрешением, например, (Bastow et al., 2008; Benoit et al., 2006а, 2006b; Keranen et al., 2009) обнаруживалось, что наиболее ярко выраженные области с низкими сейсмическими скоростями находятся под Главным Эфиопским Рифтом (MER), к югозападу от депрессии Афар.

Кора под этой областью Эфиопского нагорья также характеризуется аномально высокими отношениями продольных/поперечных сейсмических Vp/Vs (Stuart et al., 2006), что интерпретируется как свидетельство присутствия расплава в литосфере.

Анализ карт литосферных магнитных аномалий, полученных по спутниковым данным, на наш взгляд, может внести дополнительную информацию при решении этого вопроса.

Для более детального рассмотрения параметров ЛМА были дополнительно обработаны массивы спутниковых измерений геомагнитного поля на минимальном уровне полета СНАМР ~260 км, что произошло при снижении орбиты перед завершением его миссии в 2010 г., в результате чего получен качественный материал для интерпретации. Карты строились на различных планшетах, для лучшего разрешения использовались значительно меньшие параметры осреднения аномального поля по площади.

На рис. 3 приведена карта магнитных аномалий T_a над территорией с координатами 3°–18° N и 34°–47° Е. Здесь использовано медианное осреднение по блокам размером 40 × 40 км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

На карте отчетливо выделяются расположенные практически на одной широте изометрические отрицательные аномалии с центрами 7.5° N -38° E; 7.5° N -41.5° E и 7° N -47.5° E. Левая (1) и центральная (2) аномалии расположены как раз над Главным Эфиопским рифтом (MER), который на карте схематически обозначен пунктирными линиями.

Севернее, практически параллельно отрицательным аномалиям, находятся две положительные аномалии с меньшими значениями магнитного поля, причем одна из них расположена над депрессией Афар.

Нахождение над территориями Эфиопского и Сомалийского плато значительных по амплитуде отрицательных ЛМА, по-видимому, свидетельствует в пользу того, что именно там происходит наиболее сильный прогрев нижней части коры АНОМАЛЬНОЕ ЛИТОСФЕРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



Рис. 3. Карта *T_a* над территорией Главного Эфиопского рифта. ЕТН – Эфиопское плато; АF – депрессия Афар; MER – Главный Эфиопский рифт; SOM – кратон Сомали; RS – Красное море; ARV – Аравийский полуостров.

мантийным веществом, и по этой причине, намагниченные породы, входящие в ее состав, теряют магнитные свойства.

В поддержку такой интерпретации можно привести проведенные магнитотеллурические исследования, которые выявили на этой территории очень низкие уровни удельных сопротивлений $\dot{\rho}$ (~2 Ом м), в отличие от высоких (~100 Ом м) значений, обнаруженных недалеко под плато Сомали (Whaler, Hautot, 2006). Модели, полученные

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 5 2022



Рис. 4. *а* – Сейсмический образ аномалий скорости продольных волн (Hansen, Nyblade, 2013). Пунктирные линии – границы MER. Цветовая шкала ±3%; *б* – магнитная аномалия над Главным Африканским рифтом.

на основе МТ данных, показали, что геоэлектрические свойства астеносферы, скорее всего, предполагают мантийный нагрев.

Плавный переход от небольших отрицательных к слабположительным значениям поля над депрессией Афар (см. рис. 3), по-видимому, свидетельствует о неполной потере магнитных свойств вещества нижней части земной коры при латеральном перемещении мантийного вещества суперплюма. Прогрев астеносферы и подъем поверхности Кюри магнетита происходит здесь более медленно.

Таким образом, распределение поля магнитных аномалий указывает на то, что плюм и горячая точка Эфиопия/Афар находятся под Главным Эфиопским рифтом, а не под депрессией Афар.

Для сопоставления положения образов магнитных аномалий с образами зон пониженных скоростей на этой территории, мы взяли томографическую модель, приведенную в работе (Hansen, Nyblade, 2013), посвященной этой проблеме. При построении модели сейсмических скоростей авторы использовали метод глобальной томографической инверсии по набору данных, содержащих времена пробега от землетрясений, зарегистрированных большим количеством новых сейсмических станций в Эфиопии. Это обеспечило улучшенное разрешение по сравнению с прежними моделями. В работе представлены образы вариаций скорости мантийных продольных волн под территорией Эфиопия/Афар, на разных глубинах, показывающие важные особенности зоны низких скоростей под этой территорией. Согласно их данным, начиная с глубин ~200 км под Эфиопским плато, интенсивность низкоскоростной (плюмовой) аномалии, резко возрастает, что, по-видимому, обусловлено повышенной пластичностью мантийного расплава в верхней мантии.

Для иллюстрации образов магнитной и скоростной аномалии и их подобия на рис. 4, *а* показана панель площадных сейсмических образов аномалий скорости продольных волн как отклонения от эталонной модели ak135 (δ Vp) на глубине 150 км верхней мантии (Hansen, Nyblade, 2013), а на рис. 4, δ – образ магнитной аномалии над этой же территорией.

Наличие такой яркой аномалии пониженной сейсмической скорости объясняется, по мнению авторов, тем, что здесь происходит суммарное тепловое воздействие, произведенное непосредственно мантийным потоком и дополнительным декомпрессионным плавлением молодой литосферы посредством поднимающегося вертикально вверх вещества плюма, что и обусловливает сейсмическую аномалию именно в этой точке.

Под депрессией Афар сейсмические скорости выше по сравнению с MER.

Образы ЛМА на рис. 4, *б* хорошо соответствуют приведенной на рис. 4, *а* картине сейсмических скоростей.

На территории южной оконечности Аравийского полуострова аномальное магнитное поле понижено и также согласуется с данными сейсмических наблюдений.

выводы

Анализ карт магнитных аномалий, построенных по измерениям геомагнитного поля на спутнике CHAMP, показал, что простирание отрицательных ЛМА указывают на существование доминирующего северо-восточного вектора и соответствует гипотезе о предполагаемом движении мантийного потока Африканского суперплюма вплоть до Аравийского щита. Вследствие прогрева литосферы мантийным веществом и по достижении значений температуры Кюри порядка 580°, намагниченные структуры нижней коры теряют магнитные свойства, и происходит "отслеживание" траектории мантийного потока.

Магнитные образы самых значительных отрицательных магнитных аномалий над территорией Восточно-Африканской рифтовой зоны фиксируются именно над Главным Эфиопским рифтом и находятся в согласии с гипотезой о расположении горячей точки Эфиопия/Афар именно в регионе MER, а не на территории депрессии Афар.

Это предположение также находится в соответствии с моделью Р-волн горячей точки, приведенной в работе, исследующей эту проблему. На малых менее ~400 км) глубинах, зона наиболее низких скоростей сосредоточена под Главным Эфиопским рифтом (MER), что согласуются с положением ЛМА.

БЛАГОДАРНОСТИ

Все построения карт ЛМА производились с использованием программы GMT (Wessel, Smith, 2007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М. Литосферные магнитные аномалии на территории Сибири (по измерениям спутника СНАМР) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. С. 1081–1092.

Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов И.М., Филиппов С.В. Исследование литосферных магнитных аномалий Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса по данным измерений на спутнике СНАМР // 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 космоca. 2020. № 2. C. 69-81.

https://doi.org/10.31857/S0205961420010029

Абрамова Л.М., Абрамова Д.Ю. Отражение процессов мантийного плюмового магматизма в литосферных магнитных аномалиях, полученных по данным спутника СНАМР // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 4. С. 3–14.

https://doi.org/10.31857/S0205961421040023

Добрецов Н.Л. Геологические следствия термохимической модели плюмов // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 587–604.

Artemieva I.M., Mooney W.D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 16.387–16.414.

Bagley B., Nyblade A. Seismic anisotropy in eastern Africa, mantle flow, and the African superplume // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. № 8. P. 1500–1505.

Bastow I., Nyblade A., Stuart 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. N_{2} 12.

https://doi.org/10.1029/2008GC002107

Benoit M., Nyblade A., VanDecar J. Uppermantle *P*-wave speed variations beneath Ethiopia and the origin of the Afar hotspot // Geology. 2006a. V. 34. P. 329–332.

Benoit M., Nyblade A., Owens T., Stuart G. Mantle transition zone structure and upper mantle S velocity variations beneath Ethiopia: Evidence for a broad, deep-seated thermal anomaly // Geochem. Geophys. Geosyst. 2006b. V. 71. \mathbb{N}° 11.

https://doi.org/10.1029/2006GC001398

Clark D.A. Magnetic petrology of igneous intrusions: Implications for exploration and magnetic interpretation // Explor. Geophys. 1999. V. 30. P. 5–26.

Evans R.L., Jones A.G., Garcia X., Muller M., Hamilton M., Evans S., Fourie C.J.S., Spratt J., Webb S., Jelsma H., Hutchins D. Electrical lithosphere beneath the Kaapvaal Craton, Southern Africa // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. 1–16. B04105.

https://doi.org/10.1029/2010JB007883

Forte A., Qu'r'e S., Moucha R., Simmons N., Grand S., Mitrovica J., Rowle 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

Gao G., Kang G., Li G., Bai C., Wu Y. An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area // Acta Geod. Geoph. 2017. V. 52(3). P. 407–420.

https://doi.org/10.1007/s40328-016-0179-z.

Gao S., Liu K., Abdelsalam M. Seismic anisotropy beneath the Afar Depression and adjacent areas: implications for mantle flow // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. 1–15. https://doi.org/10.1029/2009JB007141

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 // Geo-

phys. J. Int. 2013. P. 118-124.

https://doi.org/10.1093/gji/ggt116

Hemant K., Maus S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. 1–23.

V. 110. P. 1–23. James D.E., Fouch M.J., Van Decar J.C., van der Lee S., Kaapvaal Seismic Group. Tectospheric structure beneath southern Africa // Geophs. Res. Lett. 2001. V. 28. № 13. P. 2485–2488.

Keranen K., Klemperer S.L., Julia J., Lawrence J.L., Nyblade A. Low lower-crustal velocity across Ethiopia: Is the Main Ethiopian Rift a narrow rift in a hot craton? // Geochem., Geoph., Geosyst. 2009. V.10. Q0AB01.

https://doi.org/10.1029/2008GC002293

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.

Montelli R., Nolet G., Dahlen F., Masters G. A catalogue of deep mantle plumes: Newresults from finite-frequency to-mography // Geochem. Geophys. Geosyst. 2006. V. 7. https://doi.org/10.1029/2006GC001248

Pin C., Poidevin J.L. U-Pb Zircon evidence for a Pan-African granulite facies metamorphism in the central African Republic: A new interpretation of the highgrade series of the northern border of the Congo craton // Precambrian Res.

1987. V. 36. P. 303-312.

Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer Academic Publishers. 2004. 556 p.

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.

https://doi.org/10.1029/2006GL028009

Simmons N.A., Myers S.C., Johannesson G., Matzel E. LLN-LG3Dv3: Global P wave tomography model for improved regional and teleseismic travel time prediction // J. Geo-phys. Res. 2012. V. 117. B10302.

https://doi.org/10.1029/2012JB009525

Stuart G.W., Bastow I.D., Ebinger C.J. Crustal structure of the northern main Ethiopian Rift from receiver function studies / (Eds) *G. Yirgu, C.J. Ebinger*, P.K.H. Maguire. London. UK. 2006. P. 253–267.

Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools // Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. http://gmt.soest.hawaii.edu.

 $K_{L} = K_{L} = K_{L$

Whaler K.A., Hautot S. The electrical resistivity structure of the crust beneath the northern Main Ethiopian Rift / (Eds) G. Yirgu, C.J. Ebinger, P.K.H. Maguire. London. UK. 2006. P. 293–305.

Anomaly Lithospheric Magnetic Field of the Ethiopia/Afar Hotspot (According to the CHAMP Mission)

D. Yu. Abramova¹, and L. M. Abramova²

¹ Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia

² Geoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia

The relationship between the spatial distribution of lithospheric magnetic anomalies obtained from the German CHAMP satellite data and display of tectonic processes caused by the movement of the African superplume is considered. Measurements of the absolute geomagnetic field vector by the CHAMP satellite at altitudes of ~290–260 km for the area with coordinates 12° -44° E and 30° S–16° N were used as a data source. An analysis of the maps constructed from these data showed that the strike of negative magnetic anomalies is consistent with the dominant northeastern vector of the African superplume mantle flow. As a result of the heating by the mantle flow in the lower crust, the Curie temperatures are reached, the magnetized structures lose their magnetic properties, and the trajectory of the mantle flow is "tracked" by means of an anomalous magnetic field. Concordance of lithospheric magnetic anomalies to one of two versions of the location of the Ethiopia/Afar plume and its hot spot is analyzed: in the territory of the Afar depression, or in the area of the Main Ethiopian rift. Magnetic images of negative magnetic anomalies are fixed exactly above the Main Ethiopian Rift, which is a confirmation of the second tectonic hypothesis. This is also consistent with the hot spot P-wave model investigating this issue.

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

REFERENCES

Abramova D.Yu., Abramova L.M. Litosfernyye magnitnyye anomalii na territorii Sibiri (po izmereniyam sputnik 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 Iv.M., Filippov S.V. Issledovaniye litosfernykh magnitnykh anomaliy 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. N° 6. P. 5–18 (in Russian).

CA № 5 2022

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. 2020. № 2. P. 69–81 (in Russian).

Abramova L.M., Abramova D.Yu. Otrazheniye protsessov mantiynogo plyumovogo magmatizma v litosfernykh magnitnykh anomaliyakh, poluchennykh po dannym sputnika CHAMP [Reflection 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

Artemieva I.M., Mooney W.D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 16.387–16.414.

Bagley B., Nyblade A. Seismic anisotropy in eastern Africa, mantle flow, and the African superplume // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. № 8. P. 1500–1505.

Bastow I., Nyblade A., Stuart 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. \mathbb{N} 12.

https://doi.org/10.1029/2008GC002107

Benoit M., Nyblade A., VanDecar J. Uppermantle *P*-wave speed variations beneath Ethiopia and the origin of the Afar hotspot // Geology. 2006a. V. 34. P. 329–332.

Benoit M., Nyblade A., Owens T., Stuart G. Mantle transition zone structure and upper mantle S velocity variations beneath Ethiopia: Evidence for a broad, deep-seated thermal anomaly // Geochem. Geophys. Geosyst. 2006b. V. 71. № 11. https://doi.org/10.1029/2006GC001398

Clark D.A. Magnetic petrology of igneous intrusions: Implications for exploration and magnetic interpretation // Explor. Geophys. 1999. V. 30. P. 5–26.

Dobretsov N.L. Geologicheskie sledstvija termohimicheskoj modeli pljumov [Geological implications of the thermochemical plume model] // Russian Geology and Geophysics. 2008. V. 49. № 7. P. 587–604 (in Russian).

Evans R.L., Jones A.G., Garcia X., Muller M., Hamilton M., Evans S., Fourie C.J.S., Spratt J., Webb S., Jelsma H., Hutchins D. Electrical lithosphere beneath the Kaapvaal Craton, Southern Africa // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. 1–16. B04105.

https://doi.org/10.1029/2010JB007883

Forte A., Qu'r'e S., Moucha R., Simmons N., Grand S., Mitrovica J., Rowle 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

Gao G., Kang G., Li G., Bai C., Wu Y. An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area // Acta Geod. Geoph. 2017. V. 52(3). P. 407–420.

https://doi.org/10.1007/s40328-016-0179-z.

Gao S., Liu K., Abdelsalam M. Seismic anisotropy beneath the Afar Depression and adjacent areas: implications for mantle flow // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. 1–15. https://doi.org/10.1029/2009JB007141 *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. P. 118–124.

https://doi.org/10.1093/gji/ggt116

Hemant K., Maus S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. 1–23.

James D.E., Fouch M.J., Van Decar J.C., van der Lee S., Kaapvaal Seismic Group. Tectospheric structure beneath southern Africa // Geophs. Res. Lett. 2001. V. 28. № 13. P. 2485–2488.

Keranen K., Klemperer S.L., Julia J., Lawrence J.L., Nyblade A. Low lower-crustal velocity across Ethiopia: Is the Main Ethiopian Rift a narrow rift in a hot craton? // Geochem., Geoph., Geosyst. 2009. V. 10. Q0AB01. https://doi.org/10.1029/2008GC002293

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.

Montelli R., Nolet G., Dahlen F., Masters G. A catalogue of deep mantle plumes: Newresults from finite-frequency to-mography // Geochem. Geophys. Geosyst. 2006. V. 7. https://doi.org/10.1029/2006GC001248

Pin C. Poidevin J.L. U-Pb Zircon evidence for a Pan-African granulite facies metamorphism in the central African Republic: A new interpretation of the highgrade series of the northern border of the Congo craton // Precambrian Res. 1987. V. 36. P. 303–312.

Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer Academic Publishers. 2004. 556 p.

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. \mathbb{N} 2.

https://doi.org/10.1029/2006GL028009

Simmons N.A., Myers S.C., Johannesson G., Matzel E. LLN-LG3Dv3: Global P wave tomography model for improved regional and teleseismic travel time prediction // J. Geo-phys. Res. 2012. V. 117. B10302.

https://doi.org/10.1029/2012JB009525

Stuart G.W., Bastow I.D., Ebinger C.J. Crustal structure of the northern main Ethiopian Rift from receiver function studies / (Eds) G. Yirgu, C.J. Ebinger, P.K.H. Maguire. London. UK. 2006. P. 253–267.

Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools // Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. http://gmt.soest.hawaii.edu.

Whaler K.A., Hautot S. The electrical resistivity structure of the crust beneath the northern Main Ethiopian Rift / (Eds) G. Yirgu, C.J. Ebinger, P.K.H. Maguire. London. UK. 2006. P. 293–305.