

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНОМАЛЬНОЕ ЛИТОСФЕРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ИНДО-АЗИАТСКОЙ КОЛЛИЗИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА CHAMP

© 2022 г. Д. Ю. Абрамова^а, Л. М. Абрамова^б, *, И. М. Варенцов^б

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

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

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

Поступила в редакцию 29.08.2021 г.

Исследуется распределение литосферных магнитных аномалий над территорией Тибетско-Гималайского нагорья, Западного и Восточного Гималайских синтаксисов, а также части полуострова Индостан, полученных из измерений на германском спутнике Земли CHAMP в разные годы его миссии. Приведены карты литосферных магнитных аномалий модуля полного вектора T_a и горизонтальной компоненты X_a на разных уровнях полета спутника. Рассмотрено соответствие карт литосферных магнитных аномалий региональной геолого-тектонической обстановке и региональной геофизике. Объяснено изменение знака аномального магнитного поля над северной частью Индийской плиты как возможное последствие мантийного прогрева, подъема изотермы Кюри и потери исходной намагниченности низов земной коры. Сделано сравнение серии разноуровневых карт магнитных аномалий между собой, оценена степень их подобия. Для иллюстрации целесообразности выделения литосферных магнитных аномалий непосредственно из спутниковых измерений и демонстрации различия карт литосферных и приповерхностных аномалий, построена карта T_a по материалам базы данных EMAG2 модели WDMAM на высоте 4 км. Результаты работы показывают, что выделенные магнитные аномалии над областью Индо-Азиатской коллизии адекватно согласуются с имеющимися региональными геолого-тектоническими и геофизическими условиями.

Ключевые слова: литосферные магнитные аномалии, спутниковые измерения, Индо-азиатская зона коллизии, субдукция Индийской плиты, Тибет, Гималаи

DOI: 10.31857/S0205961422030022

ВВЕДЕНИЕ

Тектоносфера Земли состоит из блоков различных размеров и форм, окруженных зонами пониженной вязкости субстрата. Положение таких блоков в нижних частях земной коры очень часто не согласуется с видимыми на дневной поверхности геологическими структурами. Поэтому очень важной проблемой современной геологии является изучение генетических связей между поверхностными тектоническими структурами и структурами нижних слоев земной коры и верхней мантии, а также их взаимодействие.

В процессе построения прогностических комплексов карт скрытых месторождений необходимо глубинное картирование неоднородностей коры и верхней мантии, которое может быть осуществлено, в основном, с использованием геофизических методов (Шукин, 2005; Нургалиев и др., 2008).

Неоднородности литосферы на различных ее глубинных уровнях проявляются на поверхности

Земли в виде разного вида магнитных аномалий. Выявление и типизация их природы является актуальной задачей геофизики, поскольку магнитное поле является параметром, отражающим протекание геолого-тектонических процессов именно в настоящее время.

Магнитное поле земной коры и литосферы, в целом, индуцируется входящими в их состав намагниченными минералами, что позволяет использовать его как дополнительный параметр при определении структуры и состава земной коры в процессе изучения региональной тектоники (Nemant, Maus, 2005; Nemant et al., 2005).

Литосферные магнитные аномалии (ЛМА) генерируются как индуцированной, так и остаточной намагниченностью. На континентах их источником, в основном, является намагниченность индуцированная. Лабораторные и теоретические исследования показали, что в нижней коре, являющейся предметом изучения в настоящей

работе, остаточная намагниченность намного меньше индуцированной (Treloar et al., 1986) и, как правило, игнорируется при исследованиях магнитных аномалий континентальной коры (Nemant et al.; 2005; Nemant, Mitchell, 2009). Таким образом, при анализе магнитных аномалий мы постулируем, что нижняя кора изучаемых территорий имеет индуцированную намагниченность.

Исследования ЛМА показывают, что их источники являются по происхождению геологическими и лежат в литосфере Земли. Однако в некоторых регионах земного шара встречаются несоответствия между предсказанными и наблюдаемыми аномалиями, особенно при изучении древних дорифейских областей, погруженных под молодые платформы или осадочные слои, а также при исследованиях свойств земной коры в труднодоступных полярных и горных областях.

Эти проблемы помогает решать магнитная съемка, осуществляемая низколетящими околоземными спутниками, которая на сегодняшний день является наиболее дешевым и доступным геофизическим методом изучения глубинного строения нашей планеты. К настоящему времени спутниковые измерения позволили покрыть практически всю поверхность Земли достаточно равномерной сетью данных о геомагнитном поле и являются неоценимыми и незаменимыми источниками для получения такой информации.

Спутник CHAMP, материалы которого авторы постоянно используют для исследований аномального магнитного литосферного поля, завершил свою миссию, сгорев в атмосфере над Охотским морем 19 сентября 2010 г. после 10 лет, 2 мес. и 4 дней работы на орбите. Аппарат был спроектирован для измерения гравиметрического и магнитного полей Земли и оптического зондирования атмосферы. Можно с уверенностью утверждать, что CHAMP был одним из самых успешных и надежных проектов последних десятилетий, использовавшихся для получения новой информации о геофизических полях Земли. Его миссия показала, что спутниковые измерения остаются необходимыми и приоритетными при изучении магнитного поля Земли.

Развиваемые нами технологии выделения литосферной части из измеренного спутниковыми магнитометрами суммарного магнитного поля, позволяют использовать эти данные для адекватного определения положения региональных магнитных аномалий, обусловленных намагниченностью именно глубоко погруженных слоев земной литосферы (Абрамова Д., Абрамова Л., 2014; Абрамова и др. 2020а, 2020б, 2020в).

Структура и тектоника региона Индо-Азиатской коллизии обусловлены взаимодействием

трех тектонических плит: Тихоокеанской, Индийской и плиты Филиппинского моря. С востока Тихоокеанская и Филиппинская плиты субдуцируют под Евразийскую плиту, а с юго-запада погружение Индийской плиты под Евразию (Индо-Азиатская коллизия) приводит к сокращению и поднятию Тибетского плато. В последнем случае это является причиной образования мощных горных систем, таких как Гималаи, Памир и Гиндукуш. Граница погружения Индийской плиты постепенно продвигается к северу, и ее северный край в настоящее время достигает блока Квантанг (Huang, Zhao, 2006).

Этой территории присущи очень сложная поверхностная топография, активные деформации земной коры (Wang et al., 2001) и мощная сейсмическая и вулканическая активность, сопровождаемая катастрофическими землетрясениями.

Геолого-тектонические процессы, связанные с погружением Индийской плиты под Тибетское плато давно привлекают огромное внимание ученых всего мира, они активно исследуются разными геологическими и геофизическими методами (Tapponnier et al., 1986; Molnar et al., 1987; Zhao et al., 1993; Nelson et al., 1996; Yin, Harrison, 2000).

Здесь мы приводим в качестве первого этапа результаты анализа карт литосферных магнитных аномалий над обширной территорией областей Гималаев, Тибетского нагорья и части полуострова Индостан, полученных по данным спутника CHAMP, с целью определения соотношения их размеров, границ и связи их пространственного положения с указанными тектоническими структурами.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Геомагнитное поле на спутниковых высотах является сложной функцией пространства и времени. Основная проблема при его анализе состоит в корректном разделении измеренного суммарного магнитного поля на входящие в него составляющие, связанные с различными физическими источниками. Измеренное поле является суперпозицией следующих составляющих:

- главного магнитного поля, генерируемого источниками магнитогидродинамической природы, расположенными в жидкой части земного ядра;
- поля литосферных магнитных аномалий, обусловленного намагниченностью горных пород, слагающих земную литосферу;
- внешних полей, источниками которых являются магнитосферно-ионосферные токовые системы;
- полей, обусловленных токами, возникающими в проводящих слоях земной коры и верхней мантии Земли.

Для выделения части, связанной с полем литосферных магнитных аномалий, нам необходимо исключить из измеренных значений все остальные составляющие, по возможности максимально адекватно описывая их с помощью существующих на сегодняшний день математических моделей. Такой подход к выделению литосферных данных, ставший классическим, усовершенствован авторами настоящей работы в части удаления из суммарного поля составляющей главного магнитного поля.

При решении такого рода задач общепринятым является представление главного магнитного поля международной аналитической моделью (IGRF), в основе которой лежит сферический гармонический анализ (СГА) среднегодовых значений геомагнитного поля. В этом случае для построения точной пространственной модели поля принципиальное значение имеет равномерное заполнение данными узлов расчетной сетки.

Однако, удачно заданные специальным образом параметры орбиты спутника *СНАМР* позволяют получать измерения геомагнитного поля ежесуточно с секундным разрешением в узлах практически равномерной сетки над всей поверхностью Земли. Это дает возможность с помощью разложения компонент поля, полученных в течение суток, по сферическим гармоникам до степени и порядка $n = m = 14$, построить среднесуточную сферическую гармоническую модель (ССГМ) главного магнитного поля для каждого конкретного дня, а не усредненную за длительный (годовой) интервал времени (Головков, и др., 2007). При этом для построения модели берутся все данные за сутки, включая полученные в области высоких широт, что значительно повышает равномерность покрытия сферы исходными данными. Далее, по полученным коэффициентам ССГМ главного поля на каждые конкретные сутки, синтезируются модельные значения, которые и используются для удаления соответствующей компоненты из измеренных именно в эти сутки значений суммарного магнитного поля. Учитывая, что при решении задачи выделения значений аномального магнитного поля главное поле Земли рассматривается как постоянная составляющая для конкретного промежутка времени, удаляемая из измеренных значений, использование коэффициентов ССГМ для синтеза значений главного поля в каждые конкретные сутки представляется предпочтительным. Существенным преимуществом ССГМ является универсальность расчета и полное отсутствие субъективизма, неизбежного при селекции данных.

Для редукции вклада внешнего электромагнитного поля, которое обычно аппроксимируется первой зональной гармоникой в сферическом гармоническом разложении для магнитосферных

токовых систем и линейными или параболическими трендами для ионосферных, нами применен упрощенный подход, заключающийся в тщательном отборе экспериментальных данных. Для анализа использованы измерения поля только для витков, совершаемых спутником в ночное время (от 22.00 до 6.00 ч локального времени) и только в спокойные в магнитном отношении дни (индексы магнитной активности $k_p \leq 1$ и $D_{st} \leq 10$). Проведенные нами оценки показали, что данный подход не приводит к понижению точности определения значений аномального поля и значительно сокращает время обработки.

По разработанным авторами методикам из данных измерений суммарного геомагнитного поля на спутнике *СНАМР* выделены параметры аномального литосферного поля над территорией Индо-Азиатской коллизии, сформирована обширная база данных этих параметров и построены карты модуля полного вектора T_a и горизонтальной компоненты X_a разных масштабов и для различных альтигуд спутника *СНАМР*.

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, свидетельствуя об адекватности построенного пространственного распределения поля.

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

Для построения карт аномалий над исследуемой территорией в базе данных имеется по ~ 12 тыс. измерений каждой компоненты поля. Пример изменения выделенного аномального поля вдоль отдельных витков спутника *СНАМР* показан на рис. 1 для трех отдельных участков территории Индо-Азиатской коллизии: Западного Гималайского синтаксиса (ЗГС), (вверху), Центральной части погружающейся плиты, (в центре), и Восточного Гималайского синтаксиса (ВГС), (внизу).

Примечание. Синтаксис (от греч. Syntaxis) – построение, порядок – резкое сокращение ширины складчатого пояса, отдельного орогена или складчатой зоны, сопровождающееся увеличением горизонтального сжатия.

АНОМАЛЬНОЕ ЛИТОСФЕРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ИНДО-АЗИАТСКОЙ КОЛЛИЗИИ

Здесь мы представляем предварительные результаты построения мелкомасштабных карт литосферных магнитных аномалий, отражающих в магнитном поле последствия геолого-тектониче-

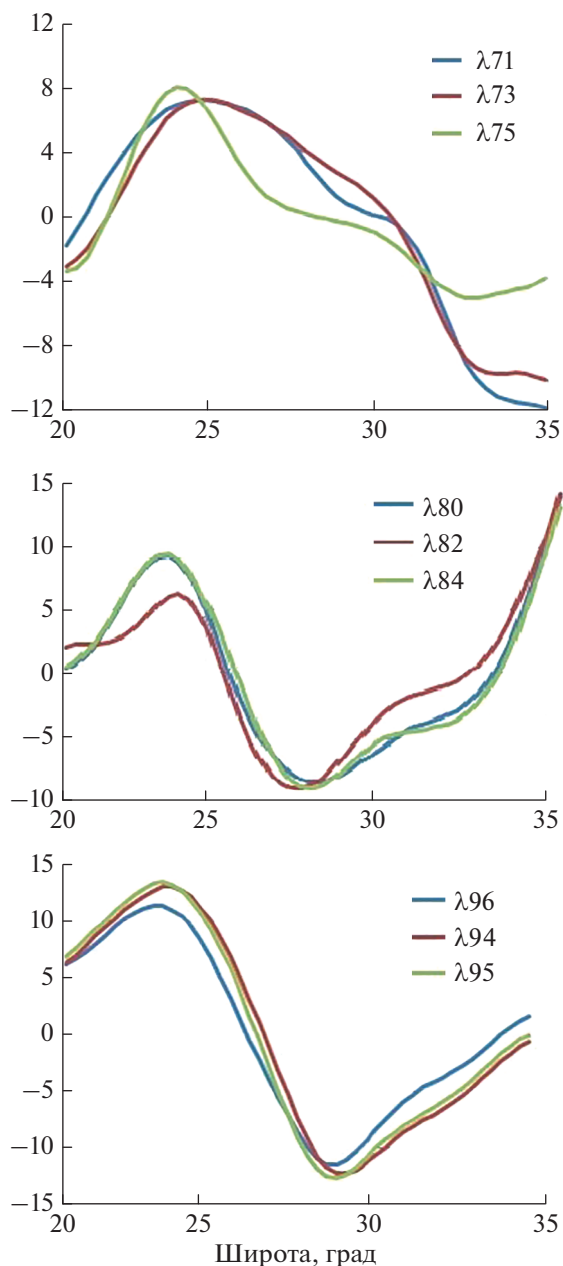


Рис. 1. Пример изменения аномального литосферного магнитного поля T_a вдоль витков спутника CHAMP над территорией Индо-Азиатской коллизии; параметры кривых – λ (долгота, градусы), вертикальная шкала – нТл.

ских процессов, сопровождающих движение Индийской плиты на северо-восток под Евразийский континент.

На рис. 2 приведены карты аномалий модуля полного вектора T_a (вверху) и горизонтальной компоненты X_a (внизу) на уровне 260 км над этой областью в последние месяцы жизни спутника CHAMP. Карты построены на планшете с координатами 68° – 100° в.д. и 20° – 36° с.ш. При по-

строении этих и других приводимых в работе карт использовано медианное осреднение по блокам размером 80×80 км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

Рисунки иллюстрируют хорошее подобие аномалий T_a и X_a , что является свидетельством высокого качества спутниковых данных и надежности применяемой методики обработки параметров магнитных компонент.

Обширная, занимающая значительную часть планшета, и достаточно однородная при использованных параметрах осреднения положительная ЛМА фиксируется на юге и юго-западе региона, географически она приурочена к погружающейся под Евразию Индийской плите (IP).

Индийская плита постепенно движется к северо-востоку, погружаясь под Тибет под небольшим углом до глубин 200–300 км, а ее северный край уже достиг блока Квантанг (QB) (Huang, Zhao, 2006).

Интенсивность ЛМА превышает 12 нТл, что свидетельствует о значительной намагниченности и однородности магнитоактивного слоя нижней части земной коры этой тектонической структуры.

Однако если рассматривать территорию Индийской плиты в целом, то положительное аномальное поле присуще только южной и юго-западной частям субдуцирующей Индийской плиты, граница которой показана на рис. 2 черной жирной линией. Над северной ее частью происходит смена знака аномального поля с положительного на отрицательное значение.

Объяснение этой трансформации состоит в следующем. Согласно имеющимся результатам исследований предполагается, что в верхней мантии над погружающейся частью Индийской плиты образуется крупный мантийный клин. Вследствие этого горячий мантийный поток, а также поток флюидов, образующихся при глубинной дегидратации погружающейся части, вызывают подъем горячего астеносферного материала, что приводит к утонению литосферы под этой территорией (Huang, Zhao, 2006). При этом возникают значительные аномалии геофизических полей: повышенные сейсмические скорости, высокие значения теплового потока, аномалии электропроводности литосферы и магнитного поля.

Повышенный тепловой поток вызывает прогрев нижней коры до температуры $\sim 580^\circ$, так называемой точки Кюри магнетита, когда исчезают его магнитные свойства (Lowe, 2007).

На широтах порядка 24° – 28° с.ш. (см. рис. 2) отчетливо наблюдается линейная зона высокого градиента магнитного поля. К югу от нее находится область со значительной исходной намагниченностью нижней коры, а при погружении

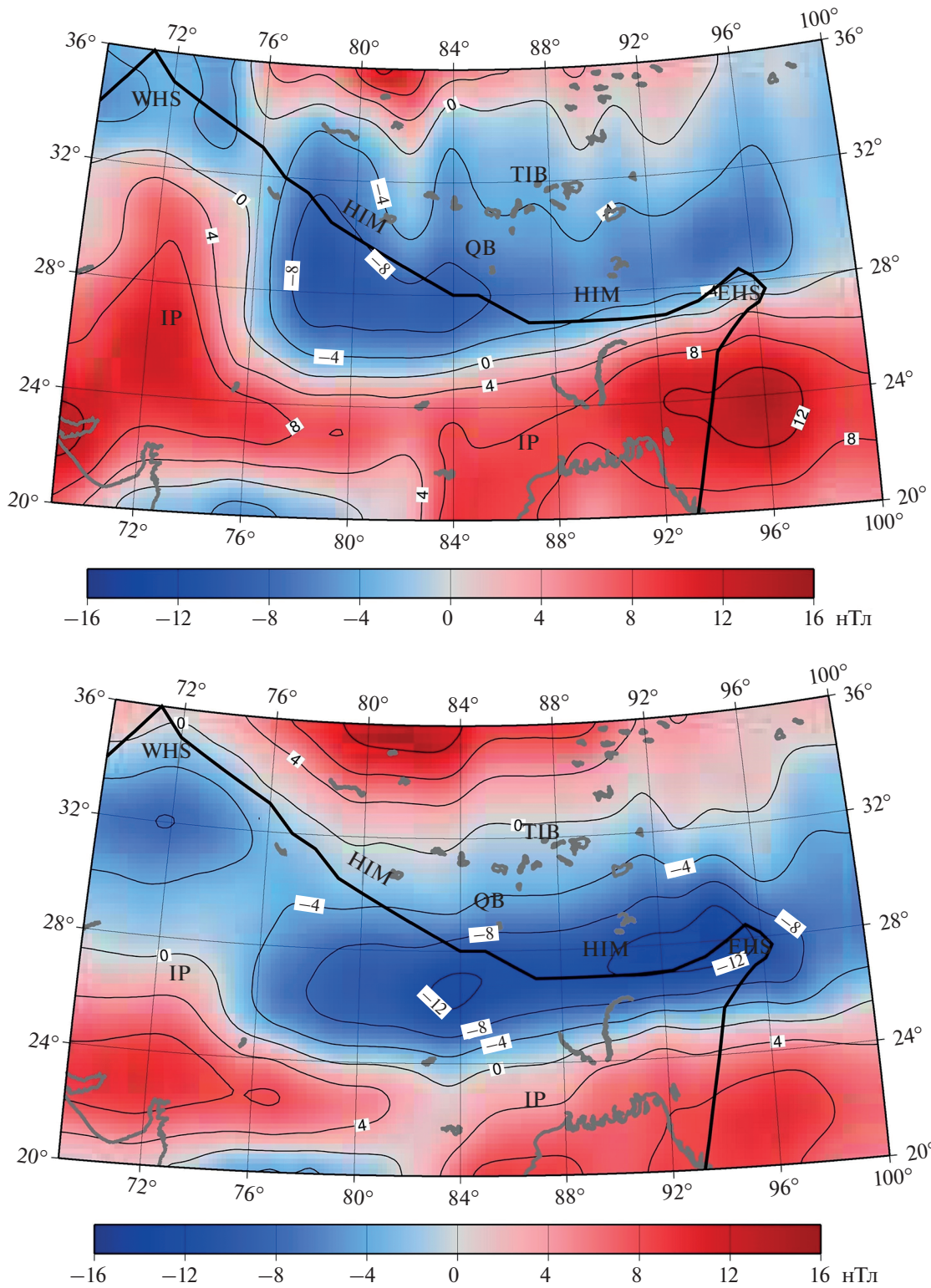


Рис. 2. Карты компонент ЛМА над Индо-Азиатской коллизией на высоте ~260 км, T_d сверху, X_d внизу. Аббревиатуры: IP – Индийская плита, HIM – Гималаи, TIB – Тибет, QB – Квантангский блок, WHS – Западный Гималайский синтаксис, EHS – Восточный Гималайский синтаксис. Черная жирная линия показывает границы субдицирующей Индийской плиты.

плиты к северу происходит ее прогрев, подъем поверхности Кюри и потеря магнитных свойств. Зона высокого градиента магнитного поля, разделяющая положительную и отрицательную части аномалий, является как бы индикатором разности температур в нижней части земной коры: выше и ниже 580°C.

Самое обширное пространство на картах занимает отрицательная ЛМА над территорией Тибета и окружающими его областями. Тектоносфера Тибето-Гималайского орогена, сложившаяся в результате сложных глобальных тектонических процессов, характеризуется существенной пространственной неоднородностью и рядом ярких аномалий геофизических полей. Здесь происходит прогрев литосферы, подъем поверхности Кюри и потеря магнитных свойств минералов, слагающих нижнюю часть земной коры

На северо-западной оконечности зоны субдукции расположен Западный Гималайский синтаксис (WHS на рис. 2), называемый также Памирским выступом, который является границей столкновения Индийской и Евразийской плит. Западный Гималайский синтаксис и прилегающие к нему области являются сложно построенными тектоническими структурами и характеризуются аномальными геофизическими полями (Lei et al., 2002; Tiwari et al., 2009; Yang et al., 2009; Negredo et al., 2007; Sobel et al., 2011). Западный Гималайский синтаксис и его окружение — одна из самых активных областей с мощной сейсмичностью с глубокими (более чем 100 км) эпицентрами землетрясений (Koulakov, Sobolev, 2006; Mechie et al., 2012).

Литосферное магнитное поле в этой области показывает отчетливую отрицательную аномалию над Западным Гималайским синтаксисом и севернее него, что свидетельствует о потере магнитных свойств нижней части земной коры вследствие активных корово-мантийных тектонических процессов, происходящих под ней.

Не менее важно для понимания процессов субдукции Индийской плиты и активное исследование тектонических деформаций Восточного Гималайского синтаксиса (EHS), восточной окраины Тибетского плато.

Для этой области также свойственны катастрофические землетрясения на этой густонаселенной территории Китая, уносящие тысячи человеческих жизней. Здесь наблюдается крупномасштабное движение поверхностных структур, которые активно изучаются различными методами геологии и геофизики (Royden et al., 1997; Yin, Harrison, 2000; Tarronnier et al., 2001; Vai et al., 2010), однако природа деформации геологических структур на больших глубинах пока далека от решения. В свете этого образы глубинных структур, отражаемые литосферными магнитными

аномалиями, могут успешно использоваться для определения положения и степени активности мантийных потоков в области восточного Тибета.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЛМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА СПУТНИКА

Вследствие торможения в атмосфере Земли спутника СНАМР и его постепенного снижения, измерения магнитного поля на нем проводились на разных уровнях над поверхностью планеты, что предоставляет возможность рассмотреть изменение магнитных аномалий над территорией Индо-Азиатской коллизии в зависимости от высоты наблюдения.

С этой целью совместно проанализированы карты литосферных аномалий на уровнях орбит спутника СНАМР в интервале 370–260 км. Построены и обсуждаются карты аномалий модуля полного вектора T_a для указанного интервала высот.

На рис. 2, вверху, и рис. 3 приведены карты магнитных аномалий T_a , построенные на одинаковых планшетах, но для разных уровней наблюдения: ~260, ~340 и ~370 км, за 2010, 2008 и 2006 гг., соответственно. Рисунки иллюстрируют изменение параметров ЛМА над Индо-Азиатской коллизией по мере удаления орбиты спутника СНАМР от поверхности Земли. Видно хорошее подобие измеренных аномалий, что подтверждает адекватность способа их выделения из суммарного магнитного поля Земли.

По мере увеличения высоты орбиты спутника, амплитуды аномалий снижаются. Например, на уровне 300 км по сравнению с 260 км, они уменьшаются более чем в полтора раза и показывают меньшую изменчивость и расчлененность аномального поля, отражающего намагниченность отдельных геологических структур. Интенсивность положительной аномалии на высоте 370 км уменьшается до единиц, что выглядит вполне реалистично, так как, кроме затухания поля при изменении расстояния от источника, происходит отражение более погруженных структур, намагниченность которых падает вследствие приближения к горячей мантии.

Анализ пространственного распределения магнитного поля показывает (Nemant, Maus, 2005; Nemant, et al., 2005; Абрамова и др., 2016; 2020с), что на спутниковых высотах высокочастотные аномалии сглаживаются, а низкочастотные региональные аномалии с размерами пространственных периодов 200–500 км (примерно эквивалентных высоте полета спутника) и интенсивностью порядка первых десятков нанотесла, остаются. Спутниковые наблюдения малочувствительны к мелкомасштабным структурам, и это позволяет надежно выделять региональные

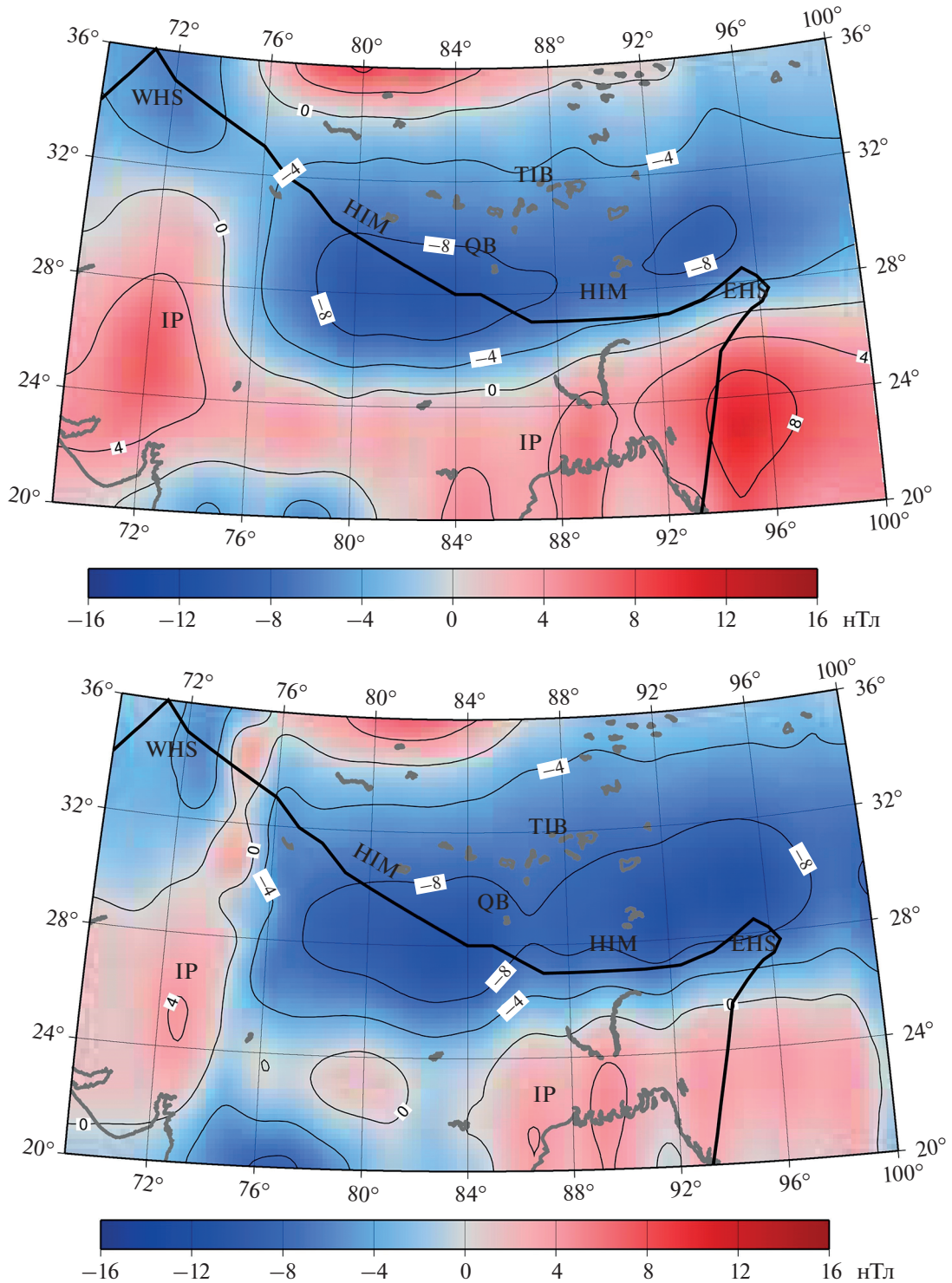


Рис. 3. Карты магнитных литосферных аномалий T_a на разных уровнях измерения спутником CHAMP над Индо-Азиатской коллизией: на высоте ~340 км, вверху, ~370 км, внизу. Обозначения см. на рис. 2.

литосферные аномалии, не осложненные локальной компонентой.

Эти положения хорошо иллюстрируются при сопоставлении карт рис. 2 и 3 с картой рис. 4. На

последнем показана карта T_a этого же региона, построенная по материалам базы данных EMAG2 модели WDMAM (World Digital Magnetic Anomaly Map), являющейся наиболее полным источни-

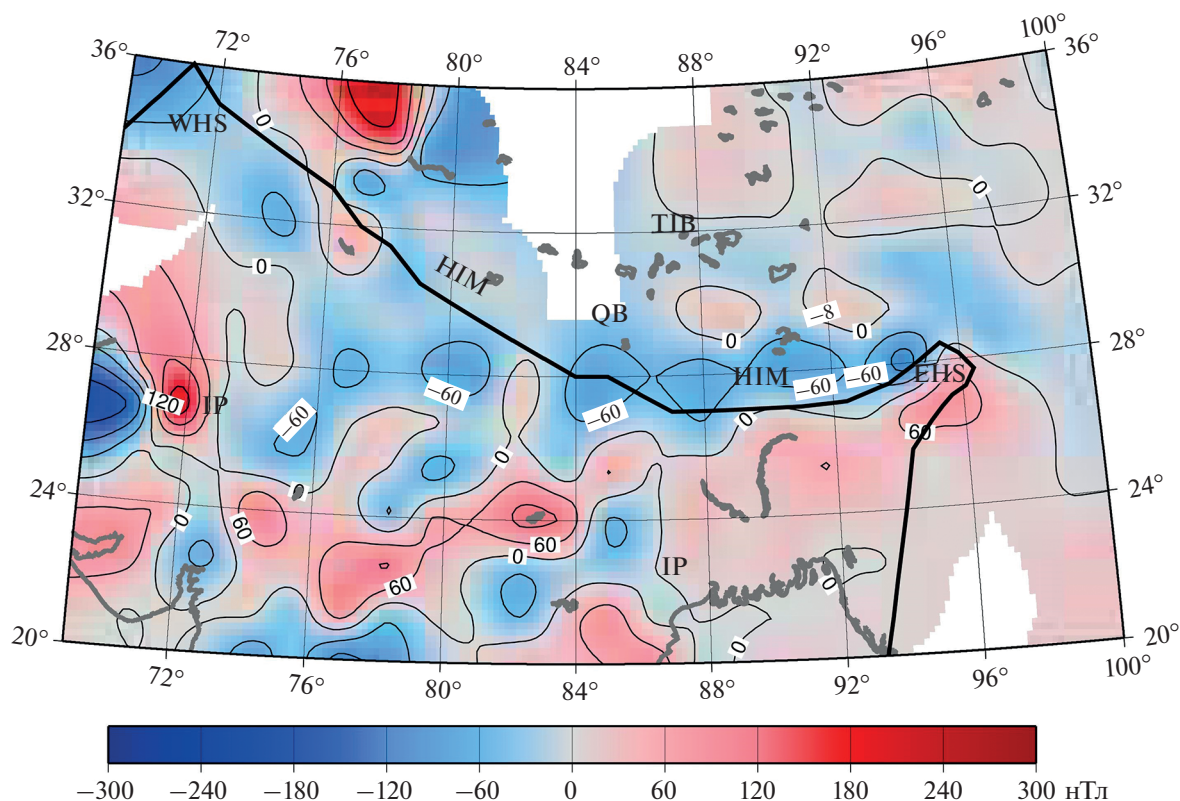


Рис. 4. Карта магнитных аномалий модуля полного вектора T_a на высоте 4 км, построенная по данным базы EMAG2 (Maus et al., 2009). Обозначения см. на рис. 2.

ком глобального распределения магнитного поля настоящее время (Maus et al., 2009). Высота над геоидом — 4 км, масштаб и осреднение данных те же, что и на рис. 2 и 3. “Белые пятна” на карте рис. 4 являются следствием ограниченности информации в данных EMAG2 для этих территорий.

Карты магнитных аномалий на высотах спутника и приземной высоте имеют совершенно разный вид. На уровне над поверхностью Земли 4 км наблюдается раздробленность поля на большое количество аномалий разного знака и размера в сравнении с полем на высоте спутника, что свидетельствует о неоднородной намагниченности верхних коровых структур. Этот факт имеет естественное объяснение: измерения магнитного поля на больших высотах работают как “фильтр низких частот”, т.е., локальные аномалии подавляются, а региональные длиннопериодные аномалии остаются в мало искаженном виде. Относительное уменьшение амплитуды аномалий с высотой зависит от параметров источников литосферных аномалий: чем больше глубина намагниченного тела и его горизонтальные размеры, тем медленнее затухают аномалии с высотой. Таким образом, в спутниковых наблюдениях сохраняются и могут быть непосредственно выделены анома-

лии, вызванные крупномасштабными структурами, залегающими на самых больших глубинах, которые как раз и являются предметом изучения и использования при региональных исследованиях.

Высота пересчета пропорциональна периоду фильтруемых аномалий, поэтому по набору карт магнитного поля, построенных по измерениям на различных высотах, можно проследить характер пространственных изменений поля и характер отражения в нем особенностей геологического строения намагниченных слоев литосферы на разных глубинах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы показали, что магнитные аномалии над областью Индо-Азиатской коллизии согласуются с имеющимися региональными геолого-тектоническими и геофизическими условиями.

Показано, что область высокого градиента ЛМА между южной и северной частями Индийской плиты является индикатором положения места, где вследствие мантийных процессов разогрева астеносферы, происходит потеря магнит-

ных свойств ферромагнитных материалов, составляющих нижнюю кору Земли.

Использование разновысотных спутниковых данных открывает дополнительные возможности применения градиентных методов при изучении степени затухания поля ЛМА.

Можно сделать заключения о целесообразности использования спутникового литосферного магнитного аномального поля при изучении тектоносферы сложно построенных и геодинамически активных областей на примере Индо-Азиатской коллизии в условиях труднодоступных высокогорных регионов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнялись в рамках темы госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН № 0144-2019-0021 и поддержаны текущим российско-китайским грантом РФФИ № 21-55-53041.

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., Филиппов С.В., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н.* Изменения литосферных магнитных аномалий с высотой (по данным спутника CHAMP) // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 2. С. 254–264.
- 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., Филиппов С.В., Абрамова Л.М.* Литосферные магнитные аномалии восточной части Северного Ледовитого океана как образы тектонических структур // Исслед. Земли из космоса. 2020б. № 6. С. 24–33.
- 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. научн. семинара им. Д.Г. Успенского—В.Н. Страхова. Воронеж: Научная книга. 2020в. С. 3–7.
- Головков В.П., Зверева Т.И., Чернова Т.А.* Метод создания пространственно-временной модели главного магнитного поля путем совместного использования методов сферического гармонического анализа и естественных ортогональных компонент // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47. № 2. С. 272–278.
- Нургалеев Д.К., Равилова Н.Н., Щукин Ю.К.* Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов // Геофизический вестник. 2008. С. 5–10.
- Щукин Ю.К.* Проблемы глубинной геологии в региональных геофизических исследованиях. Сб. Вторая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли // М.: МАКС ПРЕСС. 2005. С. 21–30.
- Bai D., Unsworth M.J., Meju M.A., Ma X., Teng J., Kong X., Sun Y., Sun J., Wang L., Jiang C., Zhao C., Xiao P., Liu M.* Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging // Nature Geoscience Lett. 2010. V. 3. P. 358–362. :
<https://doi.org/10.1038/NGeo830SH>
- Hemant K., Maus S., Haak V.* Interpretation of CHAMP crustal field anomaly maps using a geographical information system (GIS) technique // Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit. 2005. P. 249–254.
- Hemant K., Mitchell A.* Magnetic field modeling and interpretation of the Himalayan-Tibetan Plateau and adjoining north Indian Plains // Tectonophysics. 2009. V. 487. P. 87–99.
- 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.
- Huang J., Zhao D.* High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. B09305,
<https://doi.org/10.1029/2005JB004066>
- Koulakov I., Sobolev S.* A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir-Hindukush region // Geophys. J. Int. 2006. V. 164. P. 425–440.
- Lei J., Zhou H., Zhao D.* 3-D velocity structure of P-wave in the crust and upper-mantle beneath Pamir and adjacent region // Chin J. Geophys. 2002. V. 45. P. 802–811.
- Lowes F.* Geomagnetism spectrum, spatial. In: *Gubbins D, Herrero-Bervera E* (eds) Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. 2007. Springer. Berlin. P. 350–353.
- 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., Lühr 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>
- Mechie J., Yuan X., Schurr B., Schneider F., Sippl C., Ratschbacher L., Minaev V., Gadoev M., Oimahmadov I., Abdybachev U., Moldobekov B., Orunbaev S., Negmatullaev S.* Crustal and uppermost mantle velocity structure along a profile across the Pamir and southern Tien Shan as derived from project TIPAGE wide-angle seismic data // Geophys. J. Int. 2012. V. 188. P. 385–407.
- Molnar P., England P., Martinod J.* Mantle dynamics, the uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon // Rev. Geophys. 1987. V. 31. P. 357–396.
- Negredo A., Replumaz A., Villasenor A., Guillot S.* Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region // Earth Planet Sci. Lett. 2007. V. 259. P. 212–225.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.04.043>
- Nelson K., Zhao W., Brown L.* Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results // Science. 1996. 274. P. 1684–1696.

- Royden L., Burchfiel B., King R., Wang E., Chen Z., Shen F., Liu Y. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet // *Science*. 1997. V. 276. P. 788–790.
- Sobel E., Schoenbohm L., Chen J., Thiede R., Stockli D., Sudo M., Strecker M. Late Miocene-Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: implications for Pamir orogenesis // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. 304: P. 369–378.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.012>
- Tapponnier P., Peltzer G., Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia // Geological Society, London. Special Publications. 1986. V. 19. P. 113–157.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.07>
- Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan plateau // *Science*. 2001. V. 294. P. 1671–1677.
- Treloar N.A., Shive P.N., Fountain D.M. Viscous remanence acquisition in deep crustal rocks // *Eos Trans. AGU*. 1986. V. 67. 266 p.
- Wang, Q., Zhang P., Freymueller J., Bilham R., Larson K. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements // *Science*. 2001. V. 294. P. 574–577.
- Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2, 2007.
<http://gmt.soest.hawaii.edu>.
- Yang H., Teng J., Zhang X., Sun R., Ke X. Features of the deep geophysical field beneath the west Himalayan syntaxis // *Progr. Geophys.* 2009. V. 24. P. 1975–1986.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2903.2009.06.007>
- Yin A., Harrison T. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2000. V. 28. 21 p.
- Zhang P., Wang M., Gan W., Burgmann R., Molnar P., Wang Q., Niu Z., Sun J., Wu J., Hanrong S., Xinzhao Y. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data // *Geology*. 2004. V. 32. P. 809–812.
<https://doi.org/10.1130/G20554.1>
- Zhao W., Nelson K., INDEPTH Project Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet // *Nature*. 1993. V. 366. P. 557–559.

Lithospheric Magnetic Anomalies over the India-Asia Collision on Measurements of the CHAMP Satellite

D. Yu. Abramova¹, L. M. Abramova², and I. M. Varentsov²

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia

² Geoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Troitsk, Russia

The distribution of lithospheric magnetic anomalies over the territory of the Tibetan-Himalayan highlands, the Western and Eastern Himalayan syntaxes, as well as a part of the Indian plate, obtained from measurements on the German satellite CHAMP in different years of its mission, is investigated. Maps of lithospheric magnetic anomalies for the total vector T_a and the horizontal component X_a at different levels of the satellite flight are presented. The accordance of lithospheric magnetic anomalies maps to the regional geological-tectonic setting and regional geophysics is considered. The change in the sign of the anomalous magnetic field in the northern part of the Indian plate is explained as a result of mantle heating, the rise of the Curie isotherm and the loss of the initial magnetization of the lower crust. A comparison of a series of different-level maps of magnetic anomalies with each other is made; the degree of their similarity is estimated. To illustrate the convenience and adequacy of identifying lithospheric magnetic anomalies in a pure form and to demonstrate the difference in the type of maps of lithospheric and near-surface anomalies, a map of the total vector T_a modulus was constructed and presented using the materials from the EMAG2 database of the WDMAM model at an altitude of 4 km. The results show that the identified magnetic anomalies over the India-Asia collision area are in adequate agreement with the existing regional geological-tectonic and geophysical conditions.

Keywords: lithospheric magnetic anomalies, satellite measurements, collisional India-Asia zone, subduction of the Indian plate, Tibet, Himalayas

REFERENCES

- Abramova D. Yu., Abramova L.M. Litosfernyye magnitnyye anomalii na territorii Sibiri (po izmereniyam sputnika CHAMP) [Lithospheric magnetic anomalies in Siberia (based on measurements from the CHAMP satellite)] // *Geology and Geophysics*. 2014. V. 55. P. 1081–1092. (In Russian). =
- Abramova D. Yu., Filippov S.V., Abramova L.M., Varentsov I.M., Lozovskiy I.N. Transformatsiya litosfernykh magnitnykh anomalii s vysotoy (po dannym sputnika CHAMP) [Changes of lithospheric magnetic anomalies with altitude (according to the CHAMP satellite)] // *Geomagnetizm I Aeronomiya*. 2016. № 2. P. 254–264. (In Russian)
- Abramova D. Yu., Filippov S.V., Abramova L.M. O vozmozhnostyakh ispol'zovaniya sputnikovyykh geomagnitnykh nablyudeniy v issledovanii geologo-tektonicheskogo stroeniya litosfery [On the possibilities of using satellite geomagnetic observations in the study of the geological and tectonic structure] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2020a. № 2. P. 69–81. (In Russian)
<https://doi.org/10.31857/S0205961420010029>
- Abramova D. Yu., Filippov S.V., Abramova L.M. Litosfernyye magnitnyye anomalii vostochnoy chasti Severnogo Ledovi-

- togo okeana kak obrazy tektonicheskikh struktur [Lithospheric magnetic anomalies of the eastern part of the Arctic Ocean as images of tectonic structures] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2020b. № 6. P. 24–33. (In Russian)
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Varentsov Iv.M., Lozovsky I.N.* Otrazheniye tektoniki Vostochnoy Yevropy v litosfernykh magnitnykh anomal'yakh sputnikovoy missii CHAMP [Reflection of tectonics of Eastern Europe in lithospheric magnetic anomalies of the CHAMP satellite mission] // Questions of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Proceedings of the 47th session of Int. seminar them. D.G. Uspensky–V.N. Strakhov. Voronezh: Scientific book. 2020c. P. 3–7. (In Russian)
- Hemant K., Maus S., Haak V.* Interpretation of CHAMP crustal field anomaly maps using a geographical information system (GIS) technique // Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit. 2005. P. 249–254.
- Hemant K., Mitchell A.* Magnetic field modeling and interpretation of the Himalayan-Tibetan Plateau and adjoining north Indian Plains // Tectonophysics. 2009. V. 487. P. 87–99.
- 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.
- Huang J., Zhao D.* High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. B09305.
<https://doi.org/10.1029/2005JB004066>
- Koulakov I., Sobolev S.* A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir-Hindukush region // Geophys J. Int. 2006. V. 164. P. 425–440.
- Lei J., Zhou H., Zhao D.* 3-D velocity structure of P-wave in the crust and upper-mantle beneath Pamir and adjacent region // Chin J Geophys. 2002. V. 45. P. 802–811.
- Lowes F.* Geomagnetism spectrum, spatial. In: Gubbins D, Herrero-Bervera E (eds) Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. 2007. Springer. Berlin. P. 350–353.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozana J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golyinsky S., Kucks R., Lu`hr 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>
- Mechie J., Yuan X., Schurr B., Schneider F., Sippl C., Ratschbacher L., Minaev V., Gadoev M., Oimahmadov I., Abdybachev U., Moldobekov B., Orunbaev S., Negmatullaev S.* Crustal and uppermost mantle velocity structure along a profile across the Pamir and southern Tien Shan as derived from project TIPAGE wide-angle seismic data // Geophys. J. Int. 2012. V. 188. P. 385–407.
- Molnar P., England P., Martinod J.* Mantle dynamics, the uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon // Rev. Geophys. 1987. V. 31. P. 357–396.
- Negredo A., Replumaz A., Villasenor A., Guillot S.* Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region // Earth Planet Sci. Lett. 2007. V. 259. P. 212–225.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.04.043>
- Nelson K., Zhao W., Brown L.* Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results // Science. 1996. 274. P. 1684–1696.
- Nurgaliev D.K., Ravilova N.N., Shchukin Yu.K.* Izmenyayushchayasya geologicheskaya sreda: prostranstvenno-vremennyye vzaimodeystviya endogennykh i ekzogennykh protsessov [Changing geological environment: spatio-temporal interactions of endogenous and exogenous processes] // Geophysical Bulletin. 2008. P. 5–10. (In Russian)
- Shchukin Yu.K.* Problemy glubinnoy geologii v regional'nykh geofizicheskikh issledovaniyakh. [Problems of the deep geology in regional geophysical researches] // The second Russian School-Seminar on Electromagnetic Sounding of the Earth M.: MAKS PRESS. 2005. P. 21–30. (In Russian)
- Sobel E., Schoenbohm L., Chen J., Thiede R., Stockli D., Sudo M., Strecker M.* Late Miocene-Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: implications for Pamir orogenesis // Earth Planet Sci. Lett. 2011. 304: P. 369–378.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.012>
- Tapponnier P., Peltzer G., Armijo R.* On the mechanics of the collision between India and Asia. Geological Society, London, Special Publications. 1986. V. 19. P. 113–157.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.07>
- Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y.* Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan plateau // Science. 2001. V. 294. P. 1671–1677.
- Treloar N.A., Shive P.N., Fountain D.M.* Viscous remanence acquisition in deep crustal rocks // Eos Trans. AGU. 1986. V. 67. 266 p.
- Golovkov V.P., Zvereva T.I., Chernova T.A.* Metod sozdaniya prostranstvenno-vremennoy modeli glavnogo magnitnogo polya putem sovmestnogo ispol'zovaniya metodov sfericheskogo garmonicheskogo analiza i yestestvennykh ortogonal'nykh komponent [The method of creating a space-time model of the main magnetic field by using the methods of spherical harmonic analysis and natural orthogonal components] // Geomagnetism and Aeronomy. 2007. V. 47. № 2. P. 272–278. (In Russian)
- Wang Q., Zhang P., Freymueller J., Bilham R., Larson K.* Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements // Science. 2001. V. 294. P. 574–577.
- Wessel P., Smith W.H.F.* The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2. 2007.
<http://gmt.soest.hawaii.edu>
- Yang H., Teng J., Zhang X., Sun R., Ke X.* Features of the deep geophysical field beneath the west Himalayan syntaxis. Progr. Geophys. 2009. V. 24. P. 1975–1986.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2903.2009.06.007>
- Yin A., Harrison T.* Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2000. V. 28. 21 p.
- Zhang P., Wang M., Gan W., Burgmann R., Molnar P., Wang Q., Niu Z., Sun J., Wu J., Hanrong S., Xinzhao Y.* Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data // Geology. 2004. V. 32. P. 809–812.
<https://doi.org/10.1130/G20554.1>
- Zhao W., Nelson K., INDEPTH Project Team.* Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet // Nature. 1993. V. 366. P. 557–559.