

ПАРАМЕТРЫ МАГНИТОАКТИВНОГО СЛОЯ ЛИТОСФЕРЫ ДЛЯ ПРОФИЛЯ СИБИРСКАЯ ПЛАТФОРМА–ЗАБАЙКАЛЬЕ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ WDMAM 2.0

© 2019 г. А. И. Середкина^{1,2,*}, С. В. Филиппов^{2,**}

¹Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН), г. Иркутск, Россия

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

*e-mail: ale@crust.irk.ru

**e-mail: sfilip@izmiran.ru

Поступила в редакцию 26.02.2019 г.

После доработки 16.04.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

В работе представлены результаты определения глубин центра масс, верхней и нижней границ магнитоактивного слоя вдоль меридионального профиля, начинающегося на Сибирской платформе (60° N, 113° E) и заканчивающегося в Забайкалье (50° N, 113° E). Расчеты проводились на основании анализа азимутально-усредненных Фурье-спектров мощности литосферного магнитного поля Земли, заданного глобальной моделью WDMAM 2.0. Полученные оценки показали, что глубина верхней границы магнитоактивного слоя вдоль выбранного профиля составляет ~2.0 км, а глубины центра масс и нижней границы уменьшаются в южном направлении от 16.6 и 37.4 км до 13.6 и 25.0 км соответственно. Сопоставление параметров магнитоактивного слоя с глубинным строением литосферы исследуемой территории и распределением глубин гипоцентров землетрясений позволило установить, что для Северо-Муйского района Байкальского рифта магнитоактивный слой приблизительно совпадает с сейсмоактивным слоем. Магнитоактивный слой вдоль всего профиля расположен в пределах земной коры, а его мощность прямо пропорциональна толщине литосферы и обратно пропорциональна температуре верхней мантии. Полученные результаты согласуются с гипотезами пассивного образования Байкальского рифта и представляют интерес для дальнейших работ по геолого-геофизическому изучению данного региона, в частности, для определения теплового потока и построения обоснованных моделей эволюции литосферы.

DOI: 10.1134/S0016794019060099

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из геофизических полей, широко используемых для изучения глубинного строения Земли, является аномальное, или литосферное, геомагнитное поле. Так называют ту часть геомагнитного поля, источники которого расположены в коре и верхней мантии до глубин, где температура достигает температуры точки Кюри. С увеличением глубины и температуры ферромагнитные горные породы переходят в парамагнитное состояние [Яновский, 1978]. При этом температура точки Кюри существенно зависит от состава магнитных минералов. Так, для чистого магнетита она составляет 580°C [Hurt et al., 1995] и может уменьшаться до 150–200°C при увеличении содержания титана в титаномагнетите [Nozharov and Veljovich, 1983; Stacey and Banerjee, 1974] и увеличиваться до 620–1100°C в ультраосновных породах, подвергшихся частичной серпентинизации [Haggerty, 1978].

В последние десятилетия был накоплен большой объем данных разновысотных геомагнитных съемок и построены достаточно детальные глобальные модели литосферного геомагнитного поля [Dyment et al., 2015; Khorhonen et al., 2007; Lesur et al., 2016; Maus et al., 2009]. На основе ранее разработанных методов обработки и интерпретации геомагнитных данных [Bansal et al., 2011; Bouligand et al., 2009; Ravat et al., 2007; Spector and Grant, 1970; Tanaka et al., 1999 и др.] был проведен анализ этих и других региональных моделей и определены глубины центра масс, верхней и нижней границ магнитоактивного слоя (МАС) как для отдельных областей [Цветков и др., 2018; Bansal et al., 2013; Hsieh et al., 2014; Li and Wang, 2016; Salazar et al., 2017; Salem et al., 2014; Tanaka and Ishikawa, 2005; Trifonova et al., 2009; Tsvetkov et al., 2018 и др.], так и для всей Земли в целом [Li et al., 2017; Tanaka, 2017]. Результаты вышеперечисленных работ позволили установить зависимость

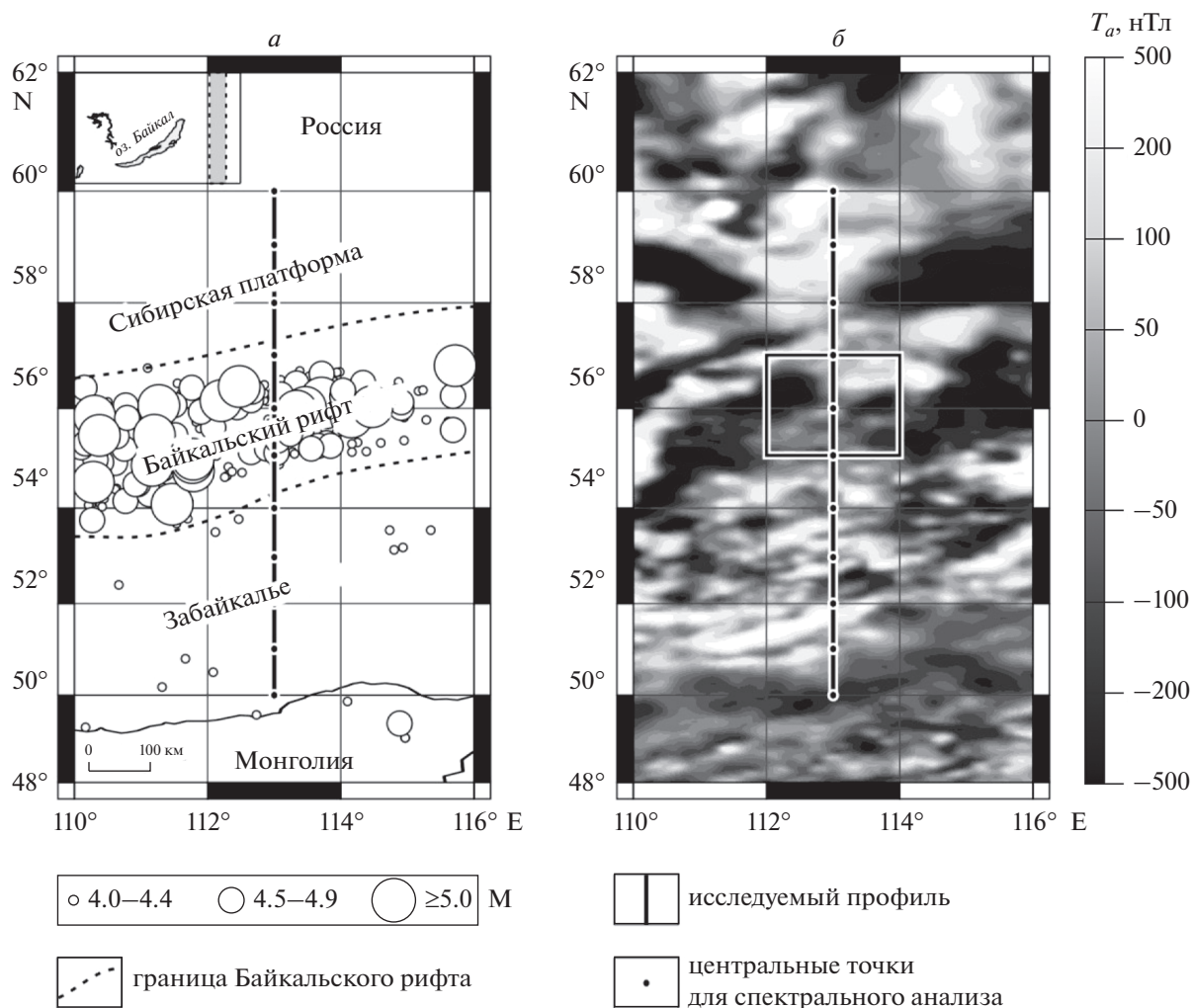


Рис. 1. (а) – положение выбранного для анализа профиля и сейсмичность рассматриваемой территории. Эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 4.0$ (2000–2018 гг.) приведены по данным агентства ISC (<http://www.isc.ac.uk>). Область исследования обозначена на врезке серым прямоугольником; (б) – литосферное геомагнитное поле исследуемой территории согласно модели WDMAM 2.0 [Dyment et al., 2015; Lesur et al., 2016] с примером окна, используемого для вычисления азимутально-усредненного Фурье-спектра мощности аномалий геомагнитного поля.

мощности MAC от поверхностного теплового потока [Tanaka et al., 1999; Salazar et al., 2017], мощности сейсмоактивного слоя [Idarraga-Garcia and Vargas, 2018; Tanaka, 2007; Tanaka and Ishikawa, 2005] и возраста океанического дна [Li et al., 2017]. Кроме того, были выявлены определенные тенденции в вариациях нижней границы MAC для структур, характеризующихся различным геологическим строением, степенью тектонической и сейсмической активности. Однако на территории Сибири подобные исследования в региональном масштабе ранее не проводились.

В связи с этим, в данной работе были поставлены следующие задачи.

1. Определить параметры MAC на основании глобальной модели литосферного магнитного поля Земли WDMAM 2.0 [Dyment et al., 2015; Lesur

et al., 2016] для меридионального профиля, начинающегося на стабильной докембрийской Сибирской платформе (60° N , 113° E), пересекающего северо-восточный фланг высокоактивного в сейсмическом отношении Байкальского рифта и заканчивающегося в Забайкалье (50° N , 113° E) (рис. 1а).

2. Сопоставить полученные результаты с известными данными о глубинном строении литосферы исследуемой территории (мощность земной коры и литосферы, распределением поперечных волн в верхней мантии [Seredkina et al., 2016]), ее температурным режимом [Artemieva, 2006] и рассмотреть их с точки зрения различных гипотез образования Байкальского рифта [Артюшков и др., 1990; Кожевников и др., 2014; Molnar and Tapponier, 1975; Zorin et al., 1990, 2003].

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходного материала для вычисления параметров МАС использовалась глобальная модель литосферного магнитного поля Земли WDMAM версии 2.0 [Dyment et al., 2015; Lesur et al., 2016], основанная по сравнению с ее предшествующими вариантами [Khorhonen et al., 2007; Maus et al., 2009], на большем объеме исходных данных и построенная с применением усовершенствованных процедур их интерполяции. В используемой модели литосферное геомагнитное поле приведено к высоте 5 км над уровнем моря и имеет горизонтальное разрешение 3 угловые минуты. WDMAM 2.0 включает в себя данные морских, аэромагнитных, наземных и спутниковых геомагнитных съемок. Из рисунка 1б видно, что модуль полного вектора литосферного геомагнитного поля (T_a) вдоль рассматриваемого профиля изменяется примерно от -100 до $+250$ нТл, а распределение аномалий не демонстрирует определенных корреляций с геологическим строением исследуемой области.

В настоящее время существует несколько различных подходов для оценки параметров МАС по азимутально-усредненным Фурье-спектрам мощности аномалий геомагнитного поля. Одни из них применяются для изучения изолированных намагниченных тел [Bhattacharyya and Leu, 1975a, b], другие — для описания их ансамблей с учетом случайного [Finn and Ravat, 2004; Okubo et al., 1985; Ravat, 2004; Ravat et al., 2007; Spector and Grant, 1970; Tanaka et al., 1999] или фрактального [Bansal et al., 2011; Bouligand et al., 2009; Li et al., 2017; Maus and Dimri, 1994; Maus et al., 1997] распределения намагниченности. В данной работе расчеты проводились в предположении случайного распределения намагниченности в МАС методом [Okubo et al., 1985; Tanaka et al., 1999], согласно которому глубина верхней границы МАС (Z_t) для длин волн хотя бы в два раза меньших, чем мощность коры, определяется следующим образом:

$$\ln \left[\Phi_{\Delta T} (|k|)^{1/2} \right] = \ln A - |k| Z_t,$$

где $\Phi_{\Delta T}$ — азимутально-усредненный Фурье-спектр мощности аномалий геомагнитного поля;

$A = \text{const}$; $|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ — модуль волнового числа.

Для больших длин волн глубина центра масс МАС (Z_0) связана со спектром как

$$\ln \left[\Phi_{\Delta T} (|k|)^{1/2} / |k| \right] = \ln B - |k| Z_0,$$

где $B = \text{const}$.

Глубина нижней границы МАС (Z_b) выражается через найденные параметры как [Tanaka et al., 1999]:

$$Z_b = 2Z_0 - Z_t.$$

Расчет азимутально-усредненных Фурье-спектров мощности аномалий геомагнитного поля проводился с помощью пакета Fourpot 1.3b [Pirttijärvi, 2015]. Известно, что оптимальный размер окна, в котором вычисляется спектр, должен в 4–6 раз превышать исследуемые глубины [Blakely, 1996; Okubo et al., 1985]. В данной работе использовалось окно $2^\circ \times 2^\circ$ с центральной точкой, лежащей на выбранном для анализа профиле (рис. 1б). Такой размер окна, как было показано ранее, позволяет получать надежные оценки Z_b в различных тектонических провинциях [Bansal et al., 2013; Hsieh et al., 2014; Ravat et al., 2007; Tanaka and Ishikawa, 2005]. Для улучшения горизонтального разрешения результатов окно сдвигалось вдоль профиля на 50% от своего размера, т.е. на 1° .

На рисунке 2 приведен пример вычисления параметров МАС для окна с координатами центральной точки 56° N, 113° E (рис. 1б). Прямые, аппроксимирующие наблюдаемый спектр, рассчитывались методом наименьших квадратов. В данной работе Z_0 определялась в диапазоне волновых чисел от максимума спектра до 0.022 км^{-1} , а Z_t — приблизительно от 0.050 до 0.100 км^{-1} аналогично тому, как это предложено в работах [Tanaka, 2007, 2017; Tanaka et al., 1999]. В результате, для рассматриваемой области, соответствующей Северо-Муйскому району Байкальского рифта, были получены следующие значения глубин центра масс, верхней и нижней границ МАС: $Z_0 = 18.5 \text{ км}$ (рис. 2а), $Z_t = 1.9 \text{ км}$ (рис. 2б) и $Z_b = 35.1 \text{ км}$.

Погрешности вычисления параметров МАС рассчитывались согласно методикам, использованным в публикациях [Okubo and Matsunaga, 1994; Salazar et al., 2017]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{|k_2| - |k_1|},$$

где σ — среднеквадратичное отклонение линейной аппроксимации от наблюдаемого спектра; $|k_2|$ и $|k_1|$ — верхняя и нижняя границы диапазона волновых чисел, в котором определялись искомые параметры (рис. 2).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного спектрального анализа были получены следующие данные. Глубина верхней границы МАС (Z_t) вдоль выбранного профиля меняется мало и в среднем составляет $\sim 2.0 \text{ км}$ (рис. 3), при средней погрешности определения данного параметра, равной 0.5 км . Считается, что глубина верхней границы МАС приблизительно соответствует мощности осадочного слоя [Bouligand et al., 2009; Hsieh et al., 2014]. Для

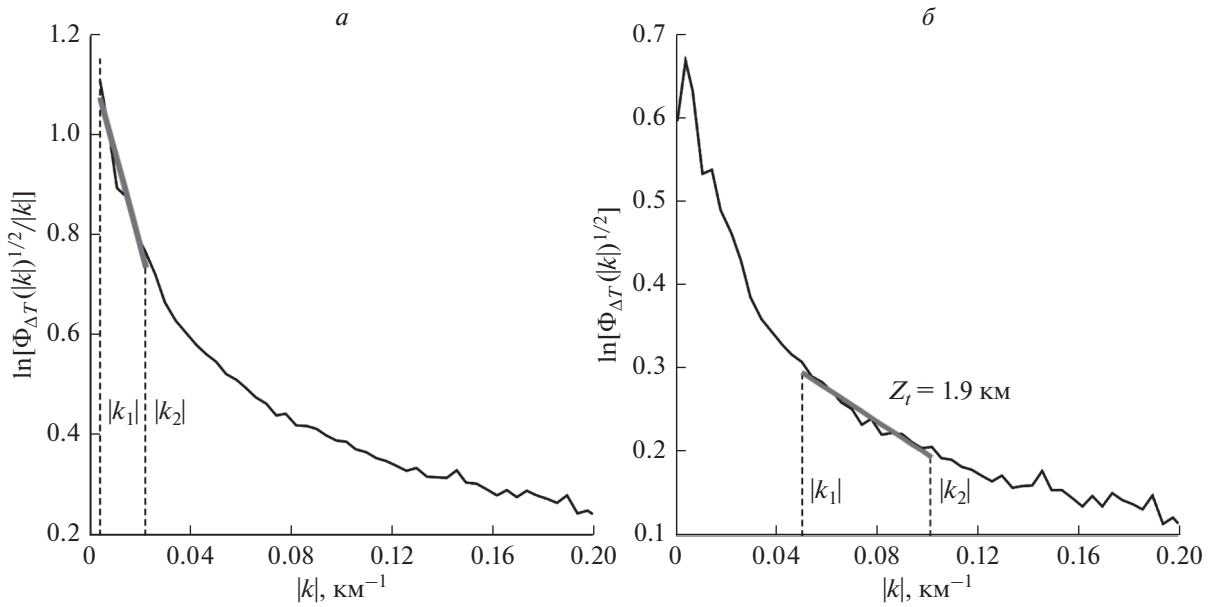


Рис. 2. Пример вычисления параметров МАС – центра масс (а) и верхней границы (б) – для окна $2^\circ \times 2^\circ$ с координатами центральной точки 56° N , 113° E (рис. 1б).

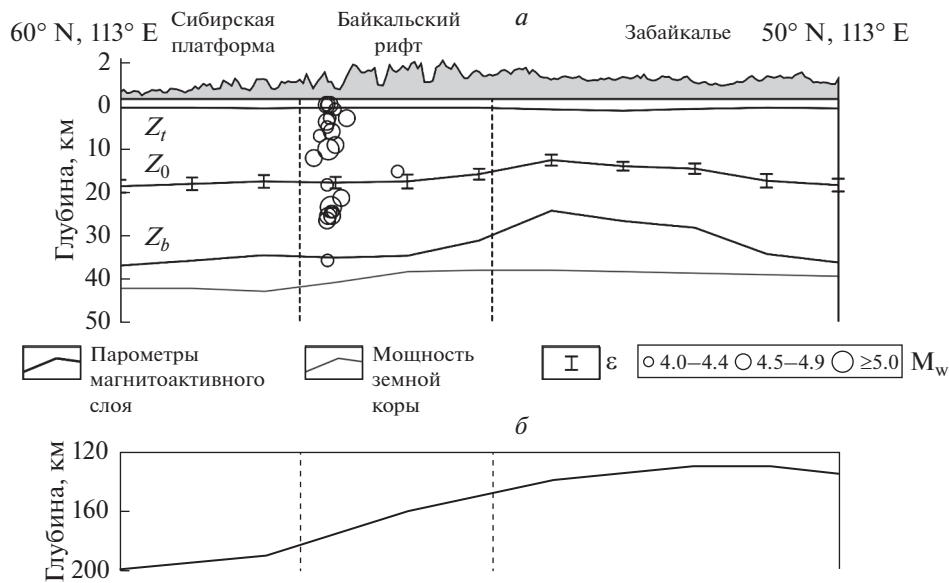


Рис. 3. (а) – результаты расчетов параметров МАС для исследуемого профиля (рис. 1а) и глубины очагов землетрясений с моментной магнитудой $M_w > 4.0$ (2007–2018 гг.) в Северо-Муйском районе Байкальского рифта [Seredkina and Melnikova, 2018]. Мощность земной коры приведена по результатам работы [Seredkina et al., 2016]. Рельеф отстроен согласно модели ЕТОРО1 [Amante and Eakins, 2009]. (б) – мощность литосферы по результатам Seredkina et al., [2016].

рассматриваемых структур мощность осадков надежно определена только для Северо-Муйского района Байкальского рифта, где по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) она составляет от 1 км под горными хребтами до 3 км под рифтовыми впадинами [Крылов и др., 1981]. С учетом горизонтального разрешения оценок параметров МАС, полученные нами значения Z_t (рис. 2, 3) хорошо согласуются с данными ГСЗ.

Расчет центра масс МАС (Z_0) для рассматриваемой территории показал, что его глубина изменяется от 13.6 до 19.6 км, с погрешностями в диапазоне 0.95–1.61 км (рис. 3). Эти значения, как и следовало ожидать, демонстрируют ту же общую тенденцию (уменьшение глубины Z_0 в южном направлении) и лежат в том же диапазоне глубин, как показано в работе [Tanaka, 2017], где исходными данными также являлась база данных

WDMAM 2.0. Однако в нашем случае меньший размер окна, в котором рассчитывался спектр аномалий геомагнитного поля, и его смещение на 50% от своих размеров вдоль профиля позволяет более детально проследить изменения глубины Z_0 под исследуемыми структурами, чем глобальная модель [Tanaka, 2017], имеющая горизонтальное разрешение ~ 300 км.

Наибольший интерес представляет глубина нижней границы МАС (Z_b), уменьшающаяся от 37.4 км под Сибирской платформой до 25.0 км в Забайкалье (рис. 3). Под северо-восточным флангом Байкальского рифта Z_b составляет ~ 35.0 км, т.е. принимает среднее по сравнению с окружающими областями значение. Согласно более ранним усредненным оценкам нижняя граница МАС под Забайкальем, Байкальским рифтом и Сибирской платформой расположена на глубинах 18.5, 19.5 и 32.5 км соответственно [Novoselova, 1978], что для первых двух структур существенно меньше глубин, полученных в данной работе. Причиной такого несоответствия может быть, во-первых, меньший объем и худшее разрешение исходных данных в предшествующих исследованиях, во-вторых, средний характер оценок, полученных для регионов, характеризующихся неоднородным строением литосферы [Крылов и др., 1981; Seredkina et al., 2016]. Кроме того, в пользу полученных нами результатов также свидетельствует использование более современных методов обработки и интерпретации геомагнитных данных.

Согласно глобальной модели распределения глубины изотермы точки Кюри [Li et al., 2017] глубина нижней границы МАС уменьшается от 25.0 км под Сибирской платформой до 13.0 км в Забайкалье. Данная модель была получена с учетом фрактального характера распределения намагниченности. Следует отметить, что такой подход, как правило, дает меньшие значения глубин, чем методы, в которых предполагается, что распределение намагниченности случайно [Bansal et al., 2011; Salem et al., 2014]. Для определения глубин верхней и нижней границ МАС с использованием метода, используемого в работе [Li et al., 2017], требуется предварительно задать отражающий фрактальность среды параметр β , поскольку, как показывают синтетические тесты, совместная инверсия Z_t , Z_b и β не дает устойчивых результатов [Bouligand et al., 2009]. При этом данный параметр может изменяться в широких пределах в зависимости от геологического строения области исследования [Bansal et al., 2013; Bouligand et al., 2009; Li and Wang, 2016]. Таким образом, задание единого фиксированного значения β для регионов с различным глубинным строением и степенью тектонической активности, как в работе

[Li et al., 2017], может привести к ошибочным результатам.

В настоящее время активно дискутируется вопрос о возможной намагниченности верхней части мантии. Первые исследования магнитных свойств мантийных ксенолитов позволили сделать предположение, что граница Мохо может приближенно рассматриваться в качестве нижней границы МАС [Wasilewski et al., 1979; Wasilewski and Mayhew, 1992], что в пределах точности расчетов согласуется с геомагнитными данными, полученными в различных регионах Земли [Bansal et al., 2011, 2013; Salem et al., 2014; Trifonova et al., 2009]. Однако результаты последующих аналогичных работ, основанные на большем количестве изучаемых образцов, показали, что магнетит входит в состав пород верхней мантии, и, соответственно, последняя может обладать магнитными свойствами [Ferré et al., 2013; Friedman et al., 2014]. При этом к регионам, в которых наиболее вероятно МАС превосходит мощность земной коры, относятся архейские и протерозойские щиты, зоны субдукции и старые океанические бассейны [Ferré et al., 2014]. Экспериментально такое предположение подтверждается во многих работах, использующих различные подходы к определению мощности МАС [Abound et al., 2016; Arnaiz-Rodriguez and Orihuela, 2013; Idarraga-Garcia and Vargas, 2018; Li and Wang, 2016].

По данным поверхностно-волновой томографии [Seredkina et al., 2016], мощность земной коры вдоль рассматриваемого профиля меняется от 42.7 до 38.5 км (рис. 3). Выбор данной модели был обусловлен отсутствием детальных исследований земной коры в рассматриваемых районах Сибирской платформы и Забайкалья и ее лучшей согласованностью с имеющимися региональными данными по глубинному строению восточной Евразии по сравнению с глобальными моделями, например, CRUST 1.0 [Laske et al., 2013]. Таким образом, из рис. 3 видно, что МАС вдоль всего профиля расположен в пределах земной коры. Такой результат является вполне закономерным ввиду того, что температура в подкоровом слое мантии под всеми исследуемыми структурами превышает 600°C [Artemieva, 2006], т.е. превышает температуру точки Кюри, которая на континентах в среднем составляет 580°C [Hurt et al., 1995]. Однако такое соотношение между мощностями МАС и земной коры может и не выполняться для внутренних районов Сибирской платформы, характеризующихся низкими значениями теплового потока [Голубев, 2007; Дучков и др., 1999] и температурами в литосфере [Artemieva, 2006].

Для рассматриваемых структур провести сопоставление определенных параметров МАС с мощностью сейсмоактивного слоя возможно

только для Северо-Муйского района Байкальского рифта, так как Сибирская платформа является практически асейсмичной [Голенецкий, 2001; Seredkina et al., 2015], а в Забайкалье, являющемся внутренней частью Амурской плиты [Bird, 2003], регистрируются лишь довольно редкие землетрясения умеренных магнитуд (рис. 1а) [Радзиминович и др., 2012; Melnikova et al., 2017]. В среднем для Байкальского рифта сейсмоактивный слой имеет мощность до 25 км [Гилева и др., 2000; Радзиминович, 2010]. Однако полученные в последнее время новые данные об очаговых параметрах, в том числе и о глубинах гипоцентров, землетрясений Прибайкалья [Seredkina and Melnikova, 2018] показывают, что в Северо-Муйском районе большинство сейсмических событий происходит на глубинах до 30 км с максимумом в верхней части коры (рис. 3). Для сопоставления были отобраны только те землетрясения, эпицентры которых расположены в пределах используемого для расчетов параметров МАС окна $2^\circ \times 2^\circ$ с координатами центральной точки 56° N , 113° E (рис. 1б). Аналогичные результаты были получены в ходе исследования сейсмической активизации 2014–2015 гг., когда в Северо-Муйском районе была развернута временная сеть сейсмических станций, что позволяло достаточно надежно определять глубины очагов [Мельникова и др., 2017]. Таким образом, учитывая погрешности определения глубин гипоцентров и нижней границы МАС, последняя приблизительно совпадает с мощностью сейсмоактивного слоя (рис. 3), что согласуется с данными предыдущих исследований в других сейсмоактивных регионах [Idaraga-Garcia and Vargas, 2018; Tanaka, 2007; Tanaka and Ishikawa, 2005].

Несмотря на то, что МАС вдоль рассматриваемого профиля расположен целиком в пределах земной коры, вариации его мощности тесно связаны с параметрами верхней мантии. Так, утонение МАС в южном направлении сопровождается увеличением температур в подкоровом слое мантии с 600 до 800°C [Artemieva, 2006], а также уменьшением мощности литосферы с 200 до 130 км [Seredkina et al., 2016]. Полученное распределение глубины нижней границы МАС с максимумом под Сибирской платформой, средними значениями под Байкальским рифтом и минимальными в Забайкалье, наряду с имеющимися данными о температурном режиме литосферы и ее глубинном строении, свидетельствует в пользу гипотез пассивного образования Байкальского рифта, которое может быть обусловлено как удаленным влиянием коллизии Индостана и Евразии [Molnar and Tarronier, 1975], так и процессами, протекающими на стыке Сибирской платформы и Амурской плиты [Артюшков и др., 1990; Кожевников и др., 2014; Крылов и др., 1981; Кузнецова и др., 2004]. В пользу такого предположения свиде-

тельствуют также результаты других исследований, использующих сейсмологические и гравитационные данные [Koulakov and Bushenkova, 2010; Nielsen and Thybo, 2009a, b; Petit and Déverchère, 2006; ten Brink and Taylor, 2002; Tiberi et al., 2003]. При этом отсутствие утонения МАС и повышения литосферной температуры под Байкальским рифтом противоречит существованию под ним мантийного плюма или астеносферного выступа, достигающего низов коры [Liu and Gao, 2006; Zhao et al., 2006; Zorin et al., 1990, 2003].

4. ВЫВОДЫ

В результате спектрального анализа литосферного геомагнитного поля, заданного глобальной моделью WDMAM 2.0, и последующего расчета параметров МАС (центра масс, нижней и верхней границ) для меридионального профиля, пересекающего южную окраину Сибирской платформы, северо-восточный фланг Байкальского рифта и Забайкалье было установлено следующее.

1. МАС вдоль всего профиля расположен в пределах земной коры.

2. Для Северо-Муйского района Байкальского рифта МАС приблизительно совпадает с сейсмоактивным слоем.

3. Мощность МАС под рассматриваемыми структурами прямо пропорциональна толщине литосферы и обратно пропорциональна температуре верхней мантии.

Полученные результаты согласуются с гипотезами пассивного образования Байкальского рифта и представляют интерес для дальнейших работ по геолого-геофизическому изучению данного региона, в частности, для определения теплового потока и построения обоснованных моделей эволюции его литосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Артюшков Е.В., Летников Ф.А., Ружич В.В.* О разработке нового механизма формирования Байкальской впадины / Геодинамика внутриконтинентальных горных областей. Новосибирск: Наука. С. 367–378. 1990.
- *Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Девершер Ж.* Локализация землетрясений и средние характеристики земной коры в некоторых районах Прибайкалья // Геология и геофизика. Т. 41. № 5. С. 629–636. 2000.
- *Голенецкий С.И.* Землетрясения юга Сибирской платформы по инструментальным сейсмологическим наблюдениям // Вулканология и сейсмология. № 6. С. 68–77. 2001.
- *Голубев В.А.* Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академ. изд-во “Гео”, 222 с. 2007.
- *Дучков А.Д., Лысак С.В., Голубев В.А., Дорофеев Р.П., Соколова Л.С.* Тепловой поток и геотемпературное по-

- ле Байкальского региона // Геология и геофизика. Т. 40. № 3. С. 287–303. 1999.
- *Кожеевников В.М., Середкина А.И., Соловей О.А.* Дисперсия групповых скоростей волн Рэлея и трехмерная модель строения мантии Центральной Азии // Геология и геофизика. Т. 55. № 10. С. 1564–1575. 2014.
- *Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин П.Б., Мишенькина Р.З., Петрик Г.В., Селезнев В.С.* Недр Байкала (по сейсмическим данным). Новосибирск: Наука, 105 с. 1981.
- *Кузнецова К.И., Лукина Н.В., Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Кучай О.А.* Деформация земной коры и верхней мантии Восточной Сибири. К проблеме внутриконтинентального орогенеза // Физика Земли. № 7. С. 3–12. 2004.
- *Мельникова В.И., Гилева Н.А., Середкина А.И.* Анализ результатов сейсмических наблюдений в районе Северо-Муйского тоннеля трассы БАМ / Материалы XII Международной сейсмологической школы “Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных”. Алма-Ата, 11–15 сентября 2017 г. С. 217–219. 2017.
- *Радзиминович Н.А.* Глубины очагов землетрясений Байкальского региона: обзор // Физика Земли. № 3. С. 37–51. 2010.
- *Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Середкина А.И., Гилева Н.А., Радзиминович Н.А., Панкова А.А.* Землетрясение 6 января 2006 г. ($M_w = 4.5$): Редкий случай проявления сейсмической активности в Восточном Забайкалье // Геология и геофизика. Т. 53. № 10. С. 1430–1444. 2012.
- *Цветков Ю.П., Новиков К.В., Иванов А.А., Филиппов С.В., Брехов О.М., Бондарь Т.Н.* Глубины залегания источников аномального магнитного поля по наземным и аэрокосмическим магнитным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15. № 3. С. 80–87. 2018.
- *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. Л.: изд-во ЛГУ, 592 с. 1978.
- *Aboud E., Alotaibi A.M., Saud R.* Relationship between Curie isotherm surface and Moho discontinuity in the Arabian shield, Saudi Arabia // J. Asian Earth Sci. V. 128. P. 42–53. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.07.025>
- *Amante C., Eakins B.W.* ETOPO1. 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. 2009.
<https://doi.org/10.7289/V5C8276M>
- *Arnaiz-Rodríguez M.S., Orihuela N.* Curie point depth in Venezuela and the Eastern Caribbean // Tectonophysics. V. 590. P. 38–51. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.004>
- *Artemieva I.M.* Global $1^\circ \times 1^\circ$ thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution // Tectonophysics. V. 416. P. 245–277. 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.11.022>
- *Bansal A.R., Gabriel G., Dimri V.P., Krawczyk C.M.* Estimation of depth to the bottom of magnetic sources by a modified centroid method for fractal distribution of sources: an application to aeromagnetic data in Germany // Geophysics. V. 76. № 3. L11–L22. 2011.
<https://doi.org/10.1190/1.3560017>
- *Bansal A.R., Anand S.P., Rajaram M., Rao V.K., Dimri V.P.* Depth to the bottom of magnetic sources (DBMS) from aeromagnetic data of Central India using modified centroid method for fractal distribution of sources // Tectonophysics. V. 603. P. 155–161. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.024>
- *Bhattacharyya B.K., Leu L.-K.* Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to two-dimensional structures // Geophysics. V. 40. № 6. P. 993–1013. 1975a.
- *Bhattacharyya B.K., Leu L.-K.* Analysis of magnetic anomalies over Yellowstone national park: mapping of Curie point isothermal surface for geothermal reconnaissance // J. Geophys. Res. V. 80. № 32. P. 4461–4465. 1975b.
- *Bird P.* An updated digital model of plate boundaries // Geochem. Geophys. Geosy. V. 4. № 3. 1027. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- *Blakely R.J.* Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 441 p. 1996.
- *Bouligand C., Glen J.M.G., Blakely J.* Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization // J. Geophys. Res. V. 114. B11104. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2009JB006494>
- *Dyment J., Lesur V., Hamoudi M., Choi Y., Thebaud E., Catalan M.* World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.0. <http://www.wdnam.org/>. 2015.
- *Ferré E.C., Friedman S.A., Martín-Hernández F., Feinberg J.M., Conder J.A., Ionov D.A.* The magnetism of mantle xenoliths and potential implications for sub-Moho magnetic sources // Geophys. Res. Lett. V. 40. P. 105–110. 2013.
<https://doi.org/10.1029/2012GL054100>
- *Ferré E.C., Friedman S.A., Martín-Hernández F., Feinberg J.M., Till J.L., Ionov D.A., Conder J.A.* Eight good reasons why the uppermost mantle could be magnetic // Tectonophysics. V. 624–625. P. 3–14. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.01.004>
- *Friedman S.A., Feinberg J.M., Ferré E.C., Demory F., Martín-Hernández F., Conder J.A., Rochette P.* Craton vs. rift uppermost mantle contributions to magnetic anomalies in the United States interior // Tectonophysics. V. 624–625. P. 15–23. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.04.023>
- *Finn C.A., Ravat D.* Magnetic depth estimates and their potential for constraining crustal composition and heat flow in Antarctica / AGU Fall Meeting. San Francisco, USA, 13–17 December, 2004. № T11A-1236. 2004.
- *Haggerty S.E.* Mineralogical constraints on Curie isotherms in deep crustal magnetic anomalies // Geophys. Res. Lett. V. 5. P. 105–108. 1978.
- *Hsieh H.H., Chen C.H., Lin P.Y., Yen H.Y.* Curie point depth from spectral analysis of magnetic data in Taiwan // J. Asian Earth Sci. V. 90. P. 26–33. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.007>
- *Hurt C.P., Moskowitz B.M., Banerjee S.K.* Magnetic properties of rocks and minerals / Rock physics and phase relations. A handbook of physical constants / AGU Reference Shelf Series. V. 3. Washington DC, USA: AGU. P. 189–204. 1995.

- *Idarraga-Garcia J., Vargas C.A.* Depth to the bottom of magnetic layer in South America and its relationship to Curie isotherm, Moho depth and seismicity behavior // *Geodesy and Geodynamics*. V. 9. P. 93–107. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.09.006>
- *Khorhonen J.K., Fairhead J.D., Hamoudi M. et al.* Magnetic anomaly map of the world – carte des anomalies magnétiques du monde. 1st Edition. Paris, France: Commission for Geological Map of the World. 2007.
- *Koulakov I., Bushenkova N.* Upper mantle structure beneath the Siberian craton and surrounding areas based on regional tomographic inversion of P and PP travel times // *Tectonophysics*. V. 486. P. 81–100. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.02.011>
- *Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M.* Update on CRUST1.0 A 1-degree global model of Earth's crust / European Geoscience Union General Assembly. Vienna, Austria, 7–12 April, 2013. № EGU2013-2658. 2013.
- *Lesur V., Hamoudi M., Choi Y., Dyment J., Thébault E.* Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) // *Earth Planets Space*. V. 68. № 1. P. 1–13. 2016.
- *Li C.-F., Lu Y., Wang J.* A global reference model of Curie-point depths based on EMAG2 // *Sci. Rep.* V. 7. 45129. 2017. <https://doi.org/10.1038/srep45129>
- *Li C.-F., Wang J.* Variations in Moho and Curie depths and heat flow in Eastern and Southeastern Asia // *Mar. Geophys. Res.* V. 37. № 1. P. 1–20. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11001-016-9265-4>
- *Liu K.H., Gao S.S.* Mantle transition zone discontinuities beneath the Baikal rift and adjacent areas // *J. Geophys. Res.* V. 111. B11301. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JB004099>
- *Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al.* EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements // *Geochem. Geophys. Geosy.* V. 10. Q08005. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- *Maus S., Dimri V.P.* Scaling properties of potential fields due to scaling sources // *Geophys. Res. Lett.* V. 21. P. 891–894. 1994.
- *Maus S., Gordon D., Fairhead D.J.* Curie temperature depth estimation using a selfsimilar magnetization model // *Geophys. J. Int.* V. 129. P. 163–168. 1997.
- *Melnikova V.I., Serechkina A.I., Radziminovich Y.B., Melnikov A.I., Gilyova N.A.* The February 1, 2011 M_w 4.7 earthquake: Evidence of local extension in western Transbaikalia (Eastern Siberia) // *J. Asian Earth Sci.* V. 135. P. 110–121. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.12.031>
- *Molnar P., Tapponnier P.* Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // *Science*. V. 189. P. 419–426. 1975. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>
- *Nielsen C., Thybo H.* No Moho uplift below the Baikal Rift Zone: Evidence from a seismic refraction profile across southern Lake Baikal // *J. Geophys. Res.* V. 114. B08306. 2009a. <https://doi.org/10.1029/2008JB005828>
- *Nielsen C., Thybo H.* Lower crustal intrusions beneath the Southern Baikal Rift Zone: evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data // *Tectonophysics*. V. 470. P. 298–318. 2009b. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.023>
- *Novoselova M.R.* Magnetic anomalies of the Baikal rift zone and adjacent areas // *Tectonophysics*. V. 45. P. 95–100. 1978.
- *Nozharov P., Veljovich D.* Paleomagnetic investigation of some rocks from the Carpatho-Balkanides on the territory of Bulgaria (rocks with normal and reversed magnetization) // *Bulg. Geophys. J.* V. 9. P. 130–138. 1983.
- *Okubo Y., Graf R.J., Hansen R.O., Ogawa K., Tsu H.* Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding areas, Japan // *Geophysics*. V. 50. P. 481–494. 1985.
- *Okubo Y., Matsunaga T.* Curie point depth in northeast Japan and its correlation with regional thermal structure and seismicity // *J. Geophys. Res.* V. 99. № B11. P. 22363–22371. 1994.
- *Petit C., Déverchère J.* Structure and evolution of the Baikal rift: A synthesis // *Geochem. Geophys. Geosy.* V. 7. Q11016. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GC001265>
- *Pirttijärvi M.* 2D Fourier domain operations, FOURPOT program. <https://wiki.oulu.fi/x/0oU7AQ/>. 2015.
- *Ravat D.* Constructing full spectrum potential-field anomalies for enhanced geodynamical analysis through integration of surveys from different platforms / AGU Fall Meeting. San Francisco, USA, 13–17 December, 2004. № G44A-03. 2004.
- *Ravat D., Pignatelli A., Nicolosi I., Chiappini M.* A study of spectral methods of estimating the depth to the bottom of magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data // *Geophys. J. Int.* V. 169. P. 421–434. 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03305.x>
- *Salazar J. M., Vargas C.A., Leon H.* Curie point depth in the SW Caribbean using the radially averaged spectra of magnetic anomalies // *Tectonophysics*. V. 694. P. 400–413. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.023>
- *Salem A., Green C., Ravat D., Singh K.H., East P., Fairhead J.D., Morgen S., Biegert E.* Depth to Curie temperature across the central Red Sea from magnetic data using the de-fractal method // *Tectonophysics*. V. 624–625. P. 75–86. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.04.027>
- *Serechkina A., Melnikova V., Gileva N., Radziminovich Y.* The M_w 4.3 January 17, 2014, earthquake: very rare seismic event on the Siberian platform // *J. Seismol.* V. 19. № 3. P. 685–694. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10950-015-9487-y>
- *Serechkina A., Kozhevnikov V., Melnikova V., Solovey O.* Seismicity and S-wave velocity structure of the crust and the upper mantle in the Baikal rift and adjacent regions // *Phys. Earth Planet. In.* V. 261. P. 152–160. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.10.011>
- *Serechkina A., Melnikova V.* Seismotectonic crustal strains of the Mongol-Baikal seismic belt from seismological data / Moment Tensor Solutions – A useful tools for seismotectonics. Dordrecht, Netherlands: Springer Nature. P. 497–517. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_22
- *Spector A., Grant S.* Statistical models for interpreting aeromagnetic data // *Geophysics*. V. 35. P. 293–302. 1970.

- *Stacey F.D., Banerjee S.K.* The physical principles of rock magnetism. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 195 p. 1974.
- *Tanaka A.* Magnetic and seismic constraints on the crustal thermal structure beneath the Kamchatka Peninsula / Volcanism and tectonics of the Kamchatka Peninsula and adjacent arcs / Geophysical Monograph Series. V. 172. Washington DC, USA: AGU. P. 100–105. 2007.
- *Tanaka A.* Global centroid distribution of magnetized layer from World Digital Magnetic Anomaly Map // Tectonics. V. 36. P. 3248–3253. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017TC004770>
- *Tanaka A., Ishikawa Y.* Crustal thermal regime inferred from magnetic anomaly data and its relationship to seismogenic layer thickness: The Japanese islands case study // Phys. Earth Planet. In. V. 152. P. 257–266. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2005.04.011>
- *Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O.* Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // Tectonophysics. V. 306. P. 461–470. 1999.
- *Ten Brink U.S., Taylor M.H.* Crustal structure of central Lake Baikal: Insight into intracontinental rifting // J. Geophys. Res. V. 107. B7. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JB000300>
- *Tiberi C., Diamant M., Déverchère J., Petit-Mariani C., Mikhailov V., Tikhotsky S., Achauer U.* Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology // J. Geophys. Res. V. 108. № B3. 2133. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JB001880>
- *Trifonova P., Zhelev Zh., Petrova T., Bojadgieva K.* Curie point depths of Bulgarian territory inferred from geomagnetic observations and its correlation with regional thermal structure and seismicity // Tectonophysics. V. 473. P. 362–374. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.03.014>
- *Tsvetkov Y.P., Novikov K.V., Ivanov A.A., Brekhov O.M.* Sources of the lithosphere magnetic field based on magnetic data obtained at different heights // Earth Planets Space. V. 70. 183. 2018. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0955-9>
- *Wasilewski P.J., Mayhew M.A.* The Moho as a magnetic boundary revisited // Geophys. Res. Lett. V. 19. № 22. P. 2259–2262. 1992.
- *Wasilewski P.J., Thomas H.H., Mayhew M.A.* The Moho as a magnetic boundary // Geophys. Res. Lett. V. 6. P. 541–544. 1979.
- *Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada A., Gao, S.S.* Deep structure and origin of the Baikal rift zone // Earth Planet. Sci. Lett. V. 243. P. 681–691. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.033>
- *Zorin Yu.A., Novoselova M.R., Turutanov E.Kh., Kozhevnikov V.M.* Structure of the lithosphere of the Mongolian-Siberian Mountainous Province // J. Geodynamics. V. 11. P. 327–342. 1990. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(90\)90015-M](https://doi.org/10.1016/0264-3707(90)90015-M)
- *Zorin Yu.A., Turutanov E.Kh., Mordvinova V.V., Kozhevnikov V.M., Yanovskaya T.B., Treussov A.V.* The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure // Tectonophysics. V. 371. P. 153–173. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00214-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00214-2)