



Научная статья

УДК 550.3+550.8

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-119-136>



Результаты геолого-геофизического исследования глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов, их связь с месторождениями полезных ископаемых

Андрей Леонидович Харитонов^а

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

Резюме. Целью исследования являлось рассмотрение вопросов геолого-геофизической интерпретации данных аэростатных и спутниковых магнитных измерений вдоль регионального профиля, пересекающего территорию Ангаро-Байкальского региона. Для проведения научных исследований вдоль регионального транссибирского геолого-геофизического профиля А-В автором были использованы различные геолого-геофизические материалы (цифровые данные магнитного поля, измеренные на искусственном спутнике Земли MAGSAT и аэростате; данные значений удельного электрического сопротивления в мантии этого региона; геотермические данные; сейсмические данные о расположении гипоцентров землетрясений в районе прохождения профиля исследований). Методами исследования послужили многоуровневые измерения спутникового и аэростатного магнитных полей, что позволило значительно расширить возможности для геолого-геофизической интерпретации полученных данных. В результате проведенного исследования выявлено, что геолого-геофизическая интерпретация многоуровневых аэромагнитных данных позволяет достаточно точно определять координаты месторасположения и глубину проникновения в литосферу тектонических разломов, связанных с Ангарским и Забайкальским мантийными плюмами, которые представляют значительный интерес для поисков месторождений угля и урана. Полученные по аэростатным и спутниковым данным пространственные и глубинные характеристики тектонических разломов подтверждаются комплексом анализируемых независимых геофизических данных (магнитотеллурического зондирования, геотермии, сейсмологии и других геофизических методов). В качестве выводов можно заключить, что автором продемонстрирована возможность применения спутниковых и аэростатных магнитных съемок для исследования глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Необходимо также отметить, что по аэростатным и спутниковым магнитным данным могут быть выявлены крупные глубинные тектонические разломы литосферы (Баргузинский, Икатский, Туколамский, Тунгирский), которые по особым точкам магнитоактивных зон этих разломов также позволяют маркировать различные субгоризонтальные границы литосферных слоев в зоне расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Практическая значимость проведенной работы заключается в том, что была выявлена пространственная взаимосвязь расположения Ангарского мантийного плюма и месторождений угля Иркутского бассейна, а также месторождений урана в зоне расположения Забайкальского мантийного плюма.

Ключевые слова: Ангарский и Забайкальский мантийные плюмы, аэростатные и спутниковые магнитные исследования, разрез земной коры, комплекс геофизических методов, месторождения угля и урана

Для цитирования: Харитонов А. Л. Результаты геолого-геофизического исследования глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов, их связь с месторождениями полезных ископаемых // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 119–136. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-119-136>.

Original article

Results of geological and geophysical study of the deep structure of Angara and Trans-Baikal mantle plumes and their connection with mineral deposits

Andrey L. Kharitonov^a

^aPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the article is to consider the issues of geological and geophysical interpretation of the data of balloon and satellite magnetic measurements along the regional profile crossing the territory of the Angara-Baikal region.

© Харитонов А. Л., 2022



In order to conduct scientific research along the regional Trans-Siberian geological and geophysical profile A-B the author used various geological and geophysical materials including the magnetic field digital data measured by the MAGSAT artificial Earth satellite and a balloon; data on the values of the electrical resistivity in the mantle of this region; geothermal data; seismic data on the location of earthquake hypocenters in the area of the profile under investigation. The research methods involved multilevel measurements of satellite and balloon magnetic fields, which significantly expanded the possibilities of geological and geophysical interpretation of the data obtained. The conducted study revealed that the geological and geophysical interpretation of multilevel aeromagnetic data allows for a reasonably accurate determination of the location coordinates and lithospheric penetration depth of tectonic faults associated with the Angara and Trans-Baikal mantle plumes, which are of significant interest in terms of exploration of coal and uranium deposits. The spatial and depth characteristics of tectonic faults obtained from balloon and satellite data are confirmed by a set of analyzed independent geophysical data: magnetotelluric sounding, geothermy, seismology and other geophysical methods. In conclusion it should be noted that the author has demonstrated the application possibility of satellite and balloon magnetic surveys for the study of the deep structure of the Angara and Trans-Baikal mantle plumes. In addition, it was found out that according to balloon and satellite magnetic data, large deep tectonic faults in the lithosphere (Barguzinsky, Ikatsky, Tukolamsky, Tungirsky) can be identified, which also allow marking various subhorizontal boundaries of lithospheric layers in the location area of the Angara and Trans-Baikal mantle plumes using special points of the magnetically active zones of these faults. The practical significance of the conducted research is in the identification of the spatial relationship between the location of the Angara mantle plume and coal deposits of the Irkutsk basin, as well as uranium deposits in the zone of the Trans-Baikal mantle plume.

Keywords: Angara and Trans-Baikal mantle plumes, balloon and satellite magnetic studies, section of the Earth's crust, combination of geophysical methods, coal and uranium deposits

For citation: Kharitonov A. L. Results of geological and geophysical study of the deep structure of Angara and Trans-Baikal mantle plumes and their connection with mineral deposits. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(2):119-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-119-136>.

Введение

Ангаро-Байкальский регион расположен в южной части территории Сибирского кратона (рис. 1). Сибирский кратон, расположенный между 84-м и 120-м градусами восточной долготы и севернее 50-го градуса северной широты, в свою очередь, является гигантской почти кольцевой чашеобразной тектонической структурой второго порядка (1500–2000 км) [1] с размерами 2230×2000 км, состоящей из множества «дочерних» кольцевых структур меньшего диаметра третьего порядка (1000–1500 км): Ангарской, Тунгусской, Анабарской, Алдано-Становой, Забайкальской, а также из структур меньших размеров, сформированных одноименными мантийными плюмами. Основная кольцевая чашеобразная структура Сибирского кратона имеет литосферные «корни», глубоко проникающие в нижележащую мантию Земли до 225 км в его центральной части [2] (рис. 2).

Почти кольцевая структура Сибирского кратона достаточно хорошо картируется по данным значений интенсивных аномалий магнитного поля (рис. 3).

Глубинная тектоническая структура Сибирского кратона, формирующего «дочерние» кольцевые структуры меньшего диаметра Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов

(см. рис. 3), непосредственно примыкающих с юга к территории основной почти кольцевой структуры Сибирского кратона, недостаточно охвачена региональными съемками глубинного сейсмического зондирования (с глубиной зондирования более 50–225 км) [3], что не позволяет надежно прогнозировать глубинное тектоническое строение данного района, изучать его современную геодинамику, а также надежно проводить поиски новых месторождений полезных ископаемых. В связи с этим мы считаем, что, учитывая очень сложный рельеф земной поверхности в пределах Ангаро-Байкальского региона, в условиях которого трудно проводить наземные сейморазведочные работы, сложно изучать глубинное тектоническое строение Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов без использования аэростатных [4] и спутниковых [5, 6] магнитных методов, не зависящих от пересеченного рельефа местности этого региона. При этом спутниковые магнитные [5, 6] и аэростатные магнитные методы [4, 7] исследования регионального глубинного строения сложно-построенных регионов являются одними из наиболее экологически чистых и относительно недорогих геофизических методов исследования глубинного строения литосферы.

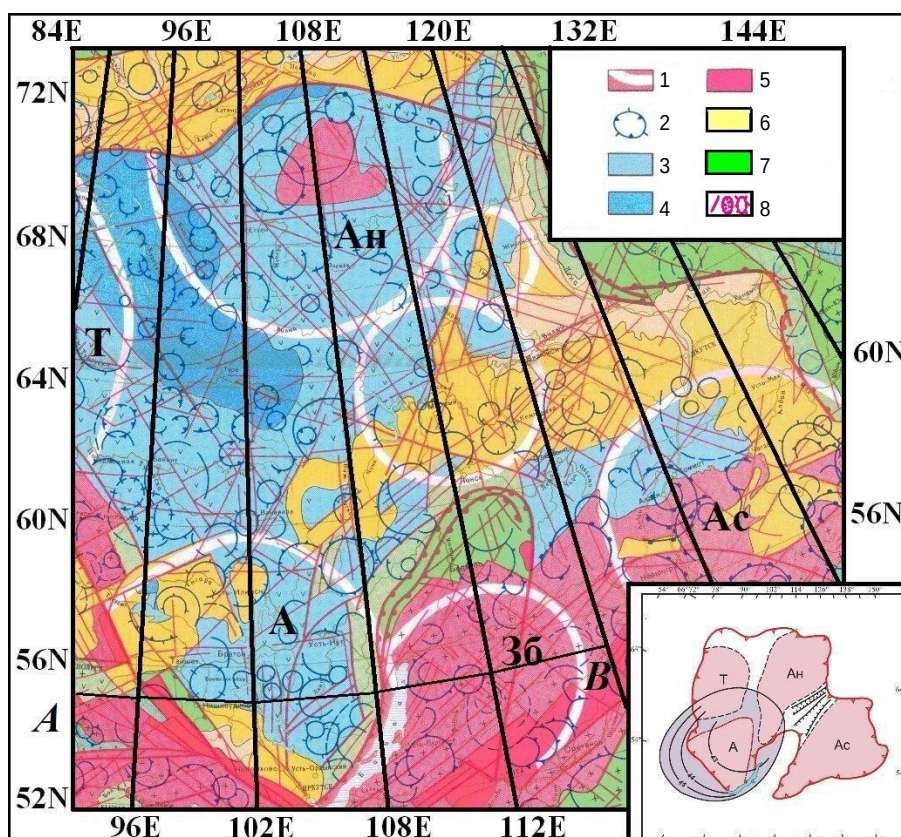


Рис. 1. Фрагмент карты космо-геологических объектов России на территорию Сибирского кратона¹:

1 – кольцевые объекты (нуклеары) – дешифрируемые геологические (морфологические) структуры центрального типа и их фрагменты: А – Ангарский, Зб – Забайкальский, Т – Тунгусский, Ан – Анабарский, Ас – Алдано-Становой; 2 – мелкие («дочерние») кольцевые морфологические структуры центрального типа (окружности синего цвета), сформированные вулкано-тектоническими объектами; 3–7 – преимущественный геохимический состав горных пород верхних слоев Сибирского кратона: 3 – преимущественно осадочные и туфогенные образования, слабо дислоцированные прерывистой складчатостью силурийского и ордовикского возраста, 4 – вулканогенные образования зон повышенной магматической проницаемости, переработанные тектоническими и денудационными процессами, 5 – отдельные крупные массивы интрузивных пород различного состава докембрийского возраста, 6 – области преимущественного расположения осадочных пород юрского возраста, 7 – области преимущественного расположения слабо метаморфизованных комплексов осадочных пород карбонового возраста, 8 – тектонические нарушения (тектонические разломы, сбросы, взбросы)
Врезка в нижней части карты – мезаблоки литосферы Сибирского кратона:
А – Ангарский, Т – Тунгусский, Ан – Анабарский, Ас – Алдано-Становой
А-В – линия, обозначающая месторасположение регионального профиля геолого-геофизических исследований

Fig. 1. Fragment of the map of cosmogeological objects of Russia on the territory of the Siberian craton¹:

1 – ring objects (nuclears) – deciphered geological (morphological) structures of the central type and their fragments:
А – Angara, Зб – Trans-Baikal, Т – Tunguska, Ан – Anabar, Ас – Aldano-Stanovoy; 2 – small ("daughter") ring morphological structures of the central type (blue circles) formed by volcanic-tectonic objects; 3–7 – predominant geochemical composition of rocks of the upper layers of the Siberian craton: 3 – mainly sedimentary and tuff formations weakly dislocated by the intermittent folding of the Silurian and Ordovician age; 4 – volcanogenic formations of zones of increased magmatic permeability processed by tectonic and denudation processes; 5 – separate large massifs of intrusive rocks of various compositions of the Precambrian age; 6 – areas of predominant location of Jurassic sedimentary rocks; 7 – areas of predominant location of weakly metamorphosed complexes of carboniferous sedimentary rocks; 8 – tectonic disturbances (tectonic faults, normal faults, thrust fault)
Inset at the bottom of the map – mega-blocks of the Siberian craton lithosphere:
А – Angara; Т – Tunguska; Ан – Anabar; Ас – Aldano-Stanovoy;
А-В – a location line of the regional profile of the geological and geophysical research

¹ Карта космогеологических объектов России. М-б 1:10000000 / ред. А. И. Бурдэ, Н. В. Межеловский. М.: Изд-во КРФ ГИН «Геокарт», 1995.

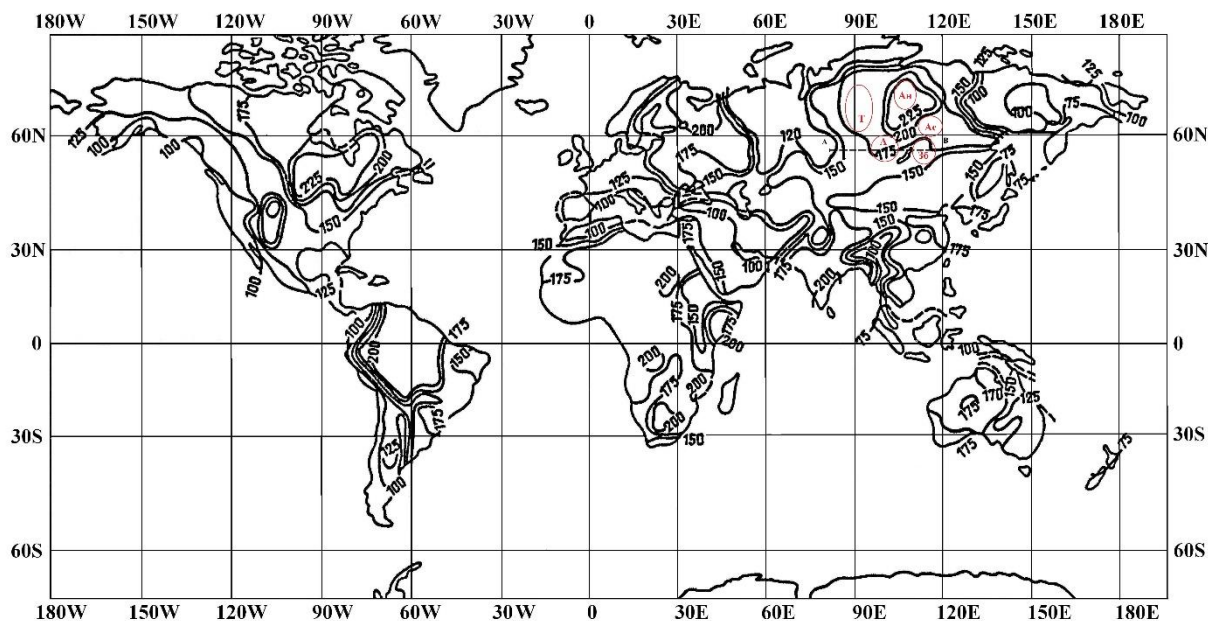


Рис. 2. Схема толщины литосферы, км, по данным поверхностных волн (по источнику [2] с дополнениями автора):

A-B – линия, обозначающая прохождение регионального геолого-геофизического профиля вдоль 55-го градуса северной широты

Зоны расположения мантийных плюмов (на территории Сибирского кратона):

A – Ангарского; 36 – Забайкальского; Т – Тунгусского; Ан – Анабарского; Ас – Алдано-Станового

Fig. 2. Diagram of the lithosphere thickness (km) based on the surface wave data (according to the source [2] with author's additions):

A-B – a line of the passage of the regional geological and geophysical profile along the latitude of 55°N

Location zones of mantle plumes (on the territory of the Siberian craton):

A – Angara; 36 – Trans-Baikal; T – Tunguska; Ан – Anabar; Ас – Aldano-Stanovoy

Материалы и методы исследования

В ряде опубликованных статей [4, 7] показано, что для выделения тектонических разломов, обычно ограничивающих в бортовых зонах корневую структуру мантийных плюмов, могут быть использованы многоуровневые измерения потенциальных полей (магнитного, гравитационного), что значительно расширяет возможности для геолого-геофизической интерпретации полученных данных. Исследование глубинного тектонического строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов трудно проводить без использования региональных геофизических методов, поскольку изучение региональных неоднородностей глубинного строения земной коры и мантии может определять глубинные особенности Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов [4, 7]. В связи с этим в данной статье рассматриваются результаты решения обратной задачи по данным аэростатных и спутниковых измерений магнитных полей [5, 8–11].

В частности, нами было выполнено решение обратной задачи магнитного потенциала по данным аномального магнитного поля, измеренного на искусственном спутнике Земли MAGSAT, которое проводилось на основании методики, разработанной и описанной коллегами в источниках [5, 10, 11], для аппроксимации глубины залегания особых точек магнитоактивных тел $d(\phi, \lambda, h)$, связанных с тектоническими структурами литосферы. Основную формулу, используемую для оценки глубины $d(\phi, \lambda, h)$, в этой методике можно представить как

$$[InS(w)](\phi, \lambda, h) = [InC](\phi, \lambda, h) - [w \cdot d(\phi, \lambda, h)], \quad (1)$$

где $[InS(w)](\phi, \lambda, h)$ – логарифм амплитудного спектра магнитного поля для каждой точки профиля (ϕ, λ, h) ; $[InC](\phi, \lambda, h)$ – ордината линии регрессии, аппроксимирующей линейную часть логарифма спектра магнитного поля; w – круговая частота спектра; $d(\phi, \lambda, h)$ – глубина расположения особых точек магнитоактивных тел для каждой точки пункта (ϕ, λ, h)

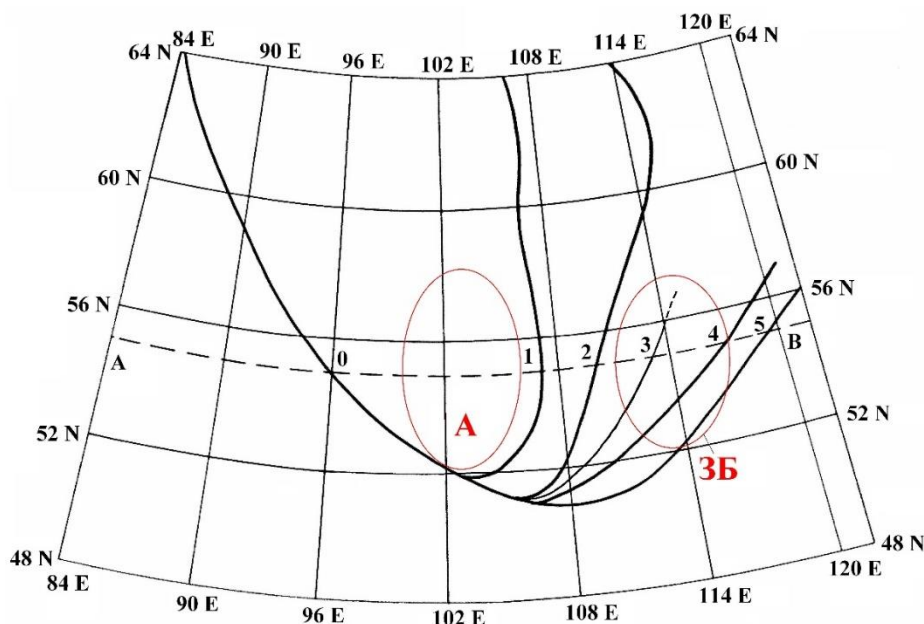


Рис. 3. Схема расположения осевых линий цепочек высокоамплитудных аномалий магнитного поля (0–5), связанных с кольцевыми структурами намагниченных магматических пород на территории Сибирского кратона (составлена на основе карты аномального магнитного поля территории Союза Советских Социалистических Республик²):

A-B – линия, обозначающая прохождение аэростатного магнитного профиля через территорию, занимаемую Ангарским (0, 1) и Забайкальским (3–5) мантийными плюмами по 55-му градусу северной широты; 2 – линия, обозначающая положение центральной части приповерхностной грабен-образной зоны Байкальской рифтовой системы

Fig. 3. Location diagram of the axial lines of high-amplitude magnetic field anomaly chains (0–5) associated with the ring structures of the magnetized igneous rocks on the territory of the Siberian craton (the diagram is compiled on the basis of the map of the anomalous magnetic field of the territory of the USSR²):
A-B – a line of the passage of the balloon magnetic profile via the territory of the Angara (0, 1) and Trans-Baikal (3–5) mantle plumes at the latitude of 55°N; 2 – a location line of the central part of the near-surface graben-shaped zone of the Baikal rift system

на региональном геолого-геофизическом профиле A-B по широте $\phi = 55^\circ \text{N}$ в диапазоне долгот $\lambda = 80\text{--}120^\circ \text{E}$ и на высоте спутника $h = 450$ км и высоте аэростата $h = 30$ км.

Для определения глубины залегания особых точек магнитоактивных тел $d(\phi, \lambda, h)$, связанных с тектоническими структурами литосферы, измеренное на искусственном спутнике Земли MAGSAT в качестве суммарного магнитное поле модуля $B_s(\phi, \lambda, h)$ и вертикальной $Z_s(\phi, \lambda, h)$, горизонтальной $H_s(\phi, \lambda, h)$ составляющих полного вектора индукции, в которые входят магнитные поля, связанные с разными физическими источниками, было сначала разделено на части:

$$B_s(\phi, \lambda, h) = B_o(\phi, \lambda, h) + B_m(\phi, \lambda, h) + B_e(\phi, \lambda, h) + dT(\phi, \lambda, h); \quad (2)$$

$$Z_s(\phi, \lambda, h) = Z_o(\phi, \lambda, h) + Z_m(\phi, \lambda, h) + Z_e(\phi, \lambda, h) + Z_a(\phi, \lambda, h); \quad (3)$$

$$H_s(\phi, \lambda, h) = H_o(\phi, \lambda, h) + H_m(\phi, \lambda, h) + H_e(\phi, \lambda, h) + H_a(\phi, \lambda, h), \quad (4)$$

где $B_o(\phi, \lambda, h) + B_m(\phi, \lambda, h) + B_e(\phi, \lambda, h)$ – сумма дипольного $B_o(\phi, \lambda, h)$, недипольного $B_m(\phi, \lambda, h)$ и $B_e(\phi, \lambda, h)$ магнитных полей, которые образуют «нормальное» магнитное поле Земли (сформированное электромагнитными источниками, расположенными во внешнем ядре Земли), вычисленная по методике сферического гармонического анализа [5, 6]; $dT(\phi, \lambda, h)$, $Z_a(\phi, \lambda, h)$, $H_a(\phi, \lambda, h)$ – модуль и вертикальная и горизонтальная составляющие аномального магнитного поля в зависимости от географических широты ϕ и долготы λ , а также высоты полета спутника или аэростата h .

² Карта аномального магнитного поля территории СССР. М-б 1:2500000 / ред. З. А. Макарова. М.: Изд-во Мингео СССР, 1977.



Использованные методы интерпретации позволяют без привлечения априорной информации определять морфологические параметры магнитных зон от тектонических разломов: глубину залегания особых точек магнитоактивных тел $d(\phi, \lambda, h)$, горизонтальные размеры этих тел, а также глубину залегания точек изменения углов наклона магнитных зон от тектонических разломов с глубиной их проникновения в мантию. Высокая точность метода подтверждается не менее, чем 75 %-м совпадением выделенных вдоль исследуемого профиля А-В глубинных разломов по данным аномального магнитного поля с разломами, трассируемыми по наземным геолого-геофизическим данным на карте разломных структур³.

Результаты исследования и их обсуждение

Для проверки надежности методики дифференциальной магнитометрии [8, 9] как одного из методов исследования аэромагнитных данных приведем результаты математической обработки региональных аэроостатных и спутниковых магнитных измерений поля вдоль профиля А-В (см. рис. 3), пересекающего почти всю территорию Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов и соседних с ними регионов.

Использованные нами дифференциальные методы анализа магнитного поля позволяют без привлечения априорной информации определять положение особых точек некоторых геологических тел, близких по своим морфологическим параметрам к электромагнитным зонам, создаваемым глубинными тектоническими разломами литосферы в данном районе. Положение данных точек, в свою очередь, позволяет определять субгоризонтальные и субвертикальные размеры зон трещиноватости и дробления тектонических разломов и некоторые магнитные характеристики горных пород в пределах этих зон. Высокая надежность дифференциальных методов

анализа аэроостатных данных подтверждается почти 75 %-м совпадением выделенных по данным аномального магнитного поля электромагнитных зон глубинных разломов с разломами, трассируемыми по наземным геологическим материалам на карте разломных тектонических структур⁴.

Исследуемый транссибирский геолого-геофизический профиль А-В (см. рис. 3, рис. 4, а), имеющий значительную протяженность около 2500 км, является одним из серии профилей многоуровневых аэроостатных магнитных измерений и практически пересекает с запада на восток тектонические структуры в пределах расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Ко всему прочему, профиль А-В пересекает в пределах этих регионов целый ряд разновозрастных тектонических элементов, которые по-разному отражаются в пространственной структуре аномального магнитного поля, а также влияют на результаты его физико-математической обработки. Пересекающий Сибирский кратон геолого-геофизический разрез вдоль транссибирского профиля А-В (см. рис. 4, б), составленный на основе полученных результатов физико-математической обработки данных измерения многоуровневых значений аномального магнитного поля [4, 7–10] и дополненный материалами некоторых других работ⁵ [12–14], приведен на рис. 4.

Все сведения о тектонике фундамента земной коры вдоль рассматриваемого профиля А-В были получены путем совместной интерпретации материалов многоуровневой аэроостатной и спутниковой магнитных съемок (см. рис. 4, а) и других наземных геофизических данных⁶ [12–16]. При этом предполагалось, что региональная пространственная структура и амплитуда этих полей определяется в основном несколькими факторами:

1) рельефом поверхности консолидированного магнитоактивного фундамента земной коры (верхняя субгоризонтальная граница В) (см. рис. 4, б);

³ Схема зон глубинных разломов территории СССР. М-6 1:10000000 / сост. Е. М. Ананьева [и др.]; ред. Д. М. Мильштейн. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1977.

⁴ Там же.

⁵ Каталог Международного сейсмологического центра // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_ISC.ru.html (03.03.2022).

⁶ Там же.

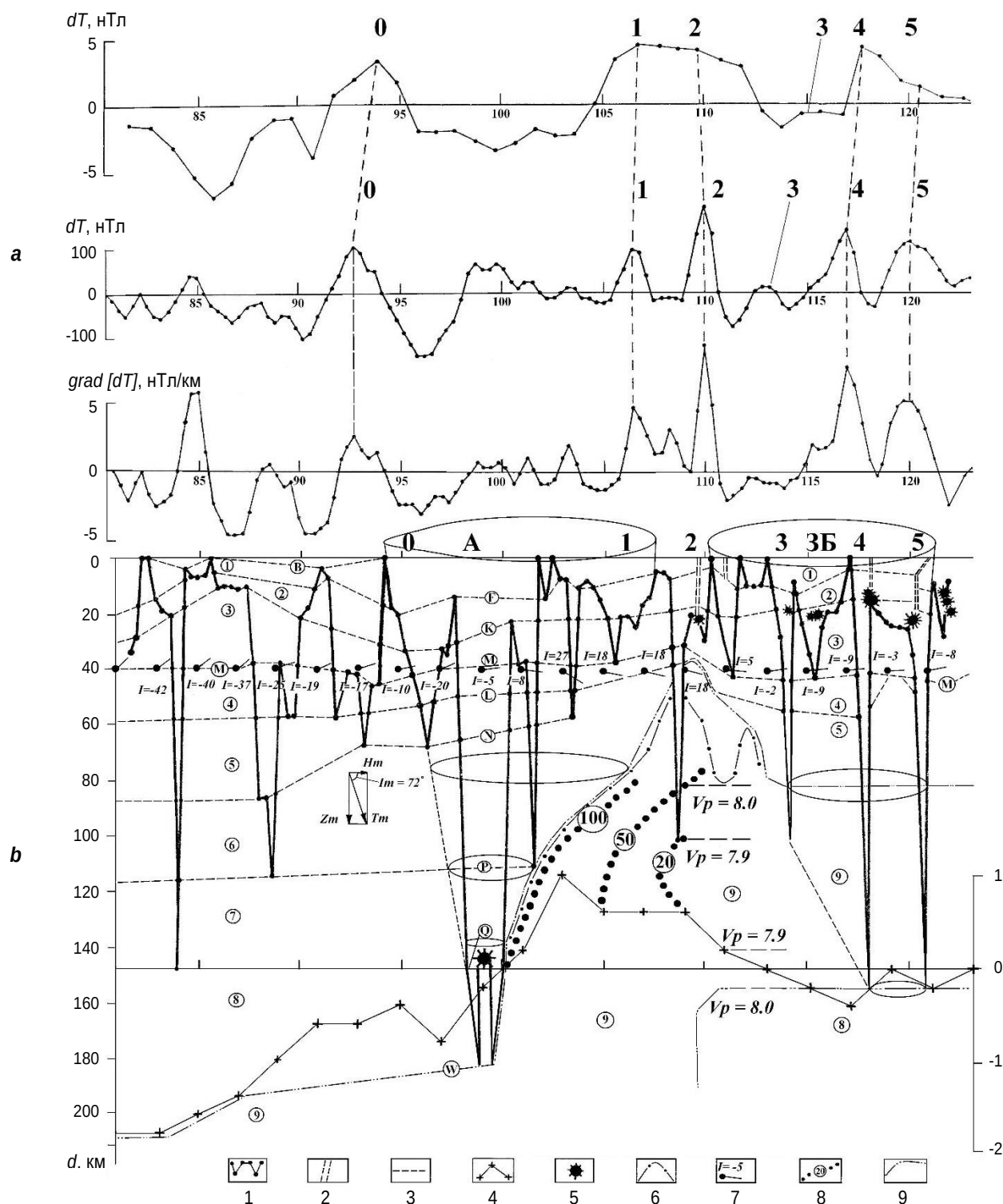


Рис. 4. Результаты геолого-геофизической интерпретации аэроэлектронной и спутниковой магнитной съемки вдоль профиля А-В, пересекающего территорию расположения Ангарского (А) и Забайкальского (ЗБ) мантийных плюмов, а также Байкальской рифтовой зоны (2) по 55-му градусу северной широты:
а – графики значений аномального магнитного поля $dT(\phi, \lambda, h)$, измеренного на высотах спутника MAGSAT ($h = 450$ км – верхняя кривая) и высотах аэростата ($h = 30$ км – средняя кривая), и график градиента ($grad dT$) аномального магнитного поля, измеренного на аэростате ($h = 30$ км – нижняя кривая)
По горизонтальным осям графиков приведены значения географической долготы λ ;
б – геолого-геофизический разрез земной коры и литосферы, построенный в результате физико-математической обработки аэроэлектронных и спутниковых данных аномального магнитного поля и других геофизических данных [12, 13]: 1 – границы (особые точки) электромагнитных зон, связанных с глубинными тектоническими разломами; 2 – местоположение субвертикальных глубинных тектонических разломов



(Баргузинский, Икатский, Каларский, Олекминский и др.), выделенных по наземным геолого-геофизическим данным [12]; 3 – расположение субгоризонтальных глубинных границ (В – нижняя граница осадочного слоя, F – граница Форша, К – граница Конрада, М – граница Мохоровичича) и других границ (L, N, P, Q, W) различных магнитоактивных слоев литосферы (название по [13]), рассчитанных по аэростатным магнитным данным: слою земной коры: (1) – «метаморфический», (2) – «гранитоидный», (3) – «габбро-гранулитовый»; слою «нормальной» высокоскоростной «холодной» мантии: (4) – «эклогитовый», (5) – «толеитовый», (6) – «перидотитовый», (7) – «плагиоклаз-пиролитовый», (8) – «пироксен-пиролитовый»; слой «аномальной» низкоскоростной «горячей» мантии: (9) – «гранат-пиролитовый» (по сейсмическим данным изолинии скорости продольных волн $V_p = 8 - 7,9 - 8$ км/с) [14]; 4 – кривая изменений нормированных значений магнитного импеданса (Z_a/H_a), рассчитанного по спутниковым компонентным магнитным данным; 5 – место расположения гипоцентров землетрясений⁷, расположенных в основном в зонах тектонических разломов, произошедших в окрестности исследуемого профиля А-В; 6 – глубина и пространственное расположение изолинии температуры 1200 °С в пределах Байкальской рифтовой зоны [15]; 7 – стрелками показано направление, а цифрой под ней – значение аномального магнитного наклона (например, $I = 18^\circ$), рассчитанного вдоль широтного профиля А-В по спутниковым компонентным (Z_a , H_a) магнитным данным; 8 – глубина и пространственное расположение изолиний удельного электрического сопротивления и их значение 20, 50, 100 Ом·м в пределах Байкальской рифтовой зоны [16]; 9 – глубина и пространственное расположение границы ($d = 50-200$ км) зоны аномальных геоэлектрических, температурных и сейсмических значений в мантии в пределах Байкальской рифтовой зоны и Забайкальского мантийного плюма

Fig. 4. Results of geological and geophysical interpretation of balloon and satellite magnetic surveys along the A-B profile crossing the territory of the Angara (A) and Trans-Baikal (B) mantle plumes and the Baikal Rift zone (2) at the latitude of 55°N:

a – graphs of the values of the anomalous magnetic field $dT(\phi, \lambda, h)$ measured at the MAGSAT satellite heights ($h = 450$ km – upper curve) and the balloon heights ($h = 30$ km – middle curve), and the gradient graph ($\text{grad } dT$) of the anomalous magnetic field measured on the balloon ($h = 30$ km is the lower curve)

The values of the geographical longitude λ are shown along the horizontal axes of the graphs;

b – geological and geophysical section of the Earth's crust and lithosphere constructed as a result of physical and mathematical processing of balloon and satellite data of the anomalous magnetic field and other geophysical data [12, 13]: 1 – boundaries (special points) of electromagnetic zones associated with deep tectonic faults; 2 – location of sub-vertical deep tectonic faults (Barguzinsky, Ikatsky, Kalarsky, Olekminsky et al.) identified by ground-based geological and geophysical data [12]; 3 – location of the subhorizontal deep boundaries (B – the lower boundary of the sedimentary layer, F – Forsch boundary, K – Conrad boundary, M – Mohorovicic boundary and other boundaries (L, N, P, Q, W) of various magnetic active layers of the lithosphere (named according to [13]), calculated on the basis of balloon magnetic data: layers of the Earth crust: (1) – "metamorphic", (2) – "granitoid", (3) – "gabbro-granulite"; layers of "normal" high-velocity "cold" mantle: (4) – "eclogite", (5) – "tholeiite", (6) – "peridotite", (7) – "plagioclase-pyrolitic", (8) – "pyroxene-pyrolitic"; layer of "anomalous" low-velocity "hot" mantle: (9) – "garnet-pyrolitic" (according to seismic data the isolines of longitudinal wave velocities refer as $V_p = 8 - 7.9 - 8$ km/s) [14]; 4 – variation curve of the normalized values of the magnetic impedance (Z_a/H_a) calculated on the basis of satellite component magnetic data; 5 – areas of earthquake hypocenters⁷ locations mainly in the zones of tectonic faults occurred in the vicinity of the studied profile A-B; 6 – depth and spatial location of the 1200 °C temperature isoline within the Baikal rift zone [15]; 7 – arrows show the direction, the figure below it shows the value of the anomalous magnetic inclination (e. g., $I = 18^\circ$) calculated along the A-B east-west profile according to the satellite component (Z_a , H_a) magnetic data; 8 – depth and spatial location of the specific electrical resistivity isolines and their values of 20, 50, 100 Ом·м within the Baikal rift zone [16]; 9 – depth and spatial location of the boundary ($d = 50-200$ км) of the zone of anomalous electrical, temperature and seismic values in the mantle within the Baikal rift zone and the Trans-Baikal mantle plume

2) рельефом поверхности субгоризонтальной границы, расположенной приблизительно на глубине 10 км, примерно совпадающей с сейсмоактивной границей Форша F (см. рис. 4, b);

3) вариациями магнитных ($M(x)$) свойств горных пород земной коры, отражающими вариации вещественного состава и наличие вы-

сокоминерализованных растворов [16] в различных слоях земной коры (см. рис. 4, b, слои (1)–(7));

4) рельефом поверхности субгоризонтальных границ в разрезе земной коры, например границ Конрада К и Мохоровичича М, а также других нижележащих границ литосферы (L, N, P, Q, W) (см. рис. 4, b);

⁷ Каталог Международного сейсмологического центра // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_ISC.ru.html (03.03.2022).



5) вариациями температуры [15] и, соответственно, вариациями удельного электрического сопротивления [16] глубинных неоднородностей (слои (5)–(9)) мантии ($d = 50\text{--}200$ км) (см. рис. 4, б);

6) магнитоактивными зонами глубинных тектонических разломов литосферы (см. рис. 4, б).

Все эти факторы могут быть учтены посредством использования различных методов решения прямой [4, 7] и обратной [5, 6, 8–11] задач магнитного потенциала. Для определения сложного рельефа различных границ литосферы ($B, F, K, M, L, N, P, Q, W$), разбитой разломными тектоническими структурами, использовались алгоритмы программ для электронно-вычислительных машин типа IBM PC/AT на языке ФОРТРАН-99. Эти алгоритмы частично изложены в источниках [4–11].

На разрезе (см. рис. 4, б) часть этих тектонических разломов пересекает всю земную кору в целом и своими «корнями» уходит в верхнюю мантию Земли. Некоторые тектонические разломы упираются своими «корнями» в подошвы слоев земной коры (поверхность Мохоровичича M). Часть выделенных по аэростатным и спутниковым данным субгоризонтальных границ ($B, F, K, M, L, N, P, Q, W$) геолого-геофизического разреза А-В маркируется особыми точками (см. рис. 4, б). При этом можно подтвердить, что значительная часть глубинных характеристик субвертикальных электромагнитных зон разломных тектонических структур, а также расположение субгоризонтальных границ слоев, приведенных на данном разрезе литосферы, подтверждается наземными геолого-геофизическими данными⁸ [12–16]. В результате в соответствии с источником [13] предлагается классифицировать разломные тектонические структуры, представленные на приведенном разрезе литосферы (см. рис. 4, б), по их глубине расположения хотя бы на несколько видов по числу основных структурных комплексов литосферы:

– слои земной коры: (1) «метаморфический», (2) «гранитоидный», (3) «габбро-базитовый»;

– слои так называемой нормальной высокоскоростной холодной литосферы: (4) «эклогитовый», (5) «толеитовый», (6) «перидотитовый», (7) «плагиоклаз-пиrolитовый», (8) «пироксен-пиrolитовый»;

– слой так называемой аномальной низкоскоростной горячей мантии: (9) «гранат-пиrolитовый».

Из вертикального геолого-геофизического разреза (см. рис. 4, б), построенного в первую очередь по аэростатным и спутниковым магнитным данным, видно, что «корни» субвертикальных разломных тектонических структур примерно совпадают с глубинными субгоризонтальными границами поверхностей Форша F ($d_F \approx 10$ км), Конрада K ($d_K \approx 20$ км), Мохоровичича M ($d_M \approx 40$ км), а также другими границами L ($d_L \approx 60$ км), N ($d_N \approx 70\text{--}80$ км), P ($d_P \approx 120$ км), Q ($d_Q \approx 150$ км), W ($d_W \approx 200$ км). Таким образом, можно сделать вывод, что данная методика выделения субгоризонтальных границ литосферы по особым точкам магнитоактивных тел работает в пределах не только платформенных, но также и геосинклинальных регионов Сибирского кратона, коим является Ангаро-Байкальский регион.

Из данных, приведенных на глубинном геолого-геофизическом разрезе (см. рис. 4, б), видно, что наблюдается соответствие глубинных разломных тектонических структур (по наземным данным) с результатами выделенных электромагнитных глубинных зон разломов литосферы по аэростатным и спутниковым магнитным данным.

Другое направление региональных геофизических исследований глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов связано с использованием спутниковых геофизических данных. Результаты анализа спутниковых компонентных (X, Y, Z, H, D, I) магнитных данных вдоль регионального геолого-геофизического профиля (см. рис. 4, б), пересекающего также регион Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов, частично проанализированы в источниках [4, 7]. Полученные по результатам анализа аномального магнитного поля спутника MAGSAT данные

⁸ Каталог Международного сейсмологического центра // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_ISC.ru.html (03.03.2022).



показывают, что выявляются не только постоянные геолого-тектонические границы литосферы, но и динамические границы, которые могут быть связаны с геоэлектрическими [16], сейсмологическими [14] и геотермальными [15] процессами, происходящими в исследуемом регионе.

Из геолого-геофизического разреза по широтному профилю А-В (см. рис. 4, *b*) видно, что глубина литосферы в пределах Ангарского мантийного плюма (см. рис. 4, *b*, зоны 0–1) составляет около 180 км. Забайкальская часть (см. рис. 4, *b*, зоны 3–5) Сибирского кратона (Забайкальский мантийный плюм (110–120 °E), расположенный на востоке от Ангарского мантийного плюма (94–108 °E)), в соответствии со схемой (см. рис. 3), составленной по карте аномального магнитного поля и отображающей кольцевые зоны интенсивных магнитных аномалий 3–5 (см. рис. 3), а также с графиками интенсивных (100–150 нТл) аэро-статных магнитных аномалий 3–5 (см. рис. 4, *a*), по-видимому, связана с магматическими внедрениями, поступающими из аномально разогретой мантии в Байкальской рифтовой зоне по соседним тектоническим разломам (Баргузинский, Икатский) в приповерхностные зоны земной коры⁹ [16]. Глубина тектонических разломов (Туколамский, Тунгирский) в регионе Забайкальского мантийного плюма достигает почти 150 км, что соответствует независимым геофизическим данным [2] о вертикальной мощности литосферы в этом регионе (см. рис. 2).

Из геолого-геофизического разреза (см. рис. 4, *b*) также можно видеть, что направление вектора ($\rightarrow$) наклонения (например, $I = -20^\circ$), рассчитанного по данным аномального магнитного поля, в зонах тектонических разломов в пределах Ангарского мантийного плюма (94–101 °E) направлено в верхнюю полуплоскость и при этом не совпадает с направлением наклонения «нормального» магнитного поля ($I_m = +72^\circ$), вектор которого направлен в нижнюю полуплоскость. Значение наклонения $I_m(x)$ главного магнитного

поля было определено по следующей формуле¹⁰:

$$I_m(\phi, \lambda, h) = \arctg[Z_m(\phi, \lambda, h) / H_m(\phi, \lambda, h)] = 72^\circ, \quad (5)$$

где $Z_m(\phi, \lambda, h)$ и $H_m(\phi, \lambda, h)$ – значения вертикальной и горизонтальной составляющих «нормального» магнитного поля Земли в районе Байкальской рифтовой зоны, которые были определены по измеренным данным искусственного спутника Земли MAGSAT.

При этом из геолого-геофизического разреза (см. рис. 4, *b*) видно, что векторы ($\rightarrow$) аномального наклонения ($I = 18$) в зонах тектонических разломов в пределах расположения глубинной части Байкальской рифтовой структуры (101–113 °E) в основном направлены в нижнюю полуплоскость и совпадают по знаку с направлением наклонения современного главного магнитного поля ($I_m = +72^\circ$) в этой части разреза по исследуемому профилю А-В. Таким образом, направления наклонения, рассчитанного по данным аномального магнитного поля, в пределах территории большей части Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов могут быть связаны с преимущественно остаточными намагниченными горными породами «нормальной» мантии, сформировавшимися в другую геохронологическую эпоху, имеющими противоположное по знаку направление наклонения главного магнитного поля Земли $I_m(\phi, \lambda, h)$. В противоположность этому значения наклонения, рассчитанного по данным аномального магнитного поля, в пределах глубинной части Байкальской рифтовой структуры (101–113 °E), где преобладают породы аномальной по значениям температуры мантии ($T = 1200^\circ\text{C}$) [15, 16], по-видимому, могут быть связаны с индуктивно намагниченными породами, соответствующими по знаку современному наклонению главного магнитного поля.

До недавнего времени в направлении академической науки (земной магнетизм¹¹) существовало устойчивое мнение, что большая часть всех ферромагнитных минералов с

⁹ Каталог Международного сейсмологического центра // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_ISC.ru.html (03.03.2022).

¹⁰ Яновский Б. М. Земной магнетизм: учеб. пособие / ред. В. В. Металлова. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.

¹¹ Там же.



остаточной намагниченностью J_o теряет свои ферромагнитные (сильные магнитные) свойства и переходит в парамагнетики с очень слабыми магнитными свойствами, когда температура в недрах Земли превышает свою определенную критическую температуру Кюри (для чистого железа $\Theta = 1073$ °K), которая для каждой отдельной разновидности магнитных минералов (титаномагнетит, магнетит, гематит, маггемит, ильменит и многие другие) в составе горных пород значительно меньше ($\Theta = 350$ – 600 °C). Поэтому мы предполагаем, что наблюдаемые на спутнике и аэростате магнитные поля, вызванные магнитоактивными источниками на большой глубине, значительно превышающей глубину расположения в земной коре температур больших, чем температура Кюри ($\Theta = 350$ – 600 °C), могут быть связаны с индуктивно намагниченными горными породами, которые продолжают создавать аномальное магнитное поле dT даже при высоких температурах ($\Theta > 600$ °C) подобно тому, как это обычно представляется¹² относительно источников «нормального» магнитного поля во внешнем ядре Земли. Согласно первому закону Релея¹³, суммарная намагниченность J_s включает индуктивную J_u и остаточную J_o намагниченность ферромагнитных минералов в горных породах магнитоактивного тела:

$$J_s = J_u + J_o = (k \cdot dT) + (b_i \cdot dT^2), \quad (6)$$

где k – магнитная восприимчивость горных пород; dT – действующее магнитное поле; b_i – коэффициент размагничивания, характерный для определенной формы магнитоактивного тела.

Согласно существующим воззрениям¹⁴, мы предполагаем, что при температурах магнитоактивных минералов (титаномагнетит, магнетит, маггемит, ильменит и др.) больших, чем температура Кюри, в горных породах Ангаро-Байкальского региона, расположенных на глубинах более 40 км (граница Мохо), остаточная намагниченность J_o ферромагнитных минералов почти пропадает. В связи с этим, в соответствии с формулой (6), горные

породы на этих глубинах должны обладать только индуктивной намагниченностью J_u , формирующей измеряемые магнитные поля.

Поскольку основной вклад в формирование измеряемых полей вносит индуктивная намагниченность $J_u = k \cdot dT$, линейно связанная с измеренным аномальным магнитным полем dT , а магнитная восприимчивость k – величина скалярная, предполагается, что угол наклона (направление) вектора индуктивной намагниченности J_u будет очень близок к направлению (наклону) вектора самого аномального магнитного поля, определяемого по формуле¹⁵

$$dT = Z_a \cdot \sin I + H_a \cdot \cos I \cdot \cos f, \quad (7)$$

где $f = 90^\circ$ – угол между вектором dT и магнитным меридианом на широтном профиле А-В. В этом случае в формуле (7) величина $\cos f = 0$.

Тогда формулу (7) можно переписать как

$$dT = Z_a \cdot \sin I. \quad (8)$$

Используя соотношение (8) и принимая величину магнитной восприимчивости k , характерную для магнетита, можно определить значение индуктивной намагниченности в нижней части широтной плоскости как

$$J_u = k \cdot dT = k \cdot Z_a \cdot \sin I, \quad (9)$$

где угол наклона вектора индуктивной намагниченности J_u определяется в основном углом наклона вектора аномального магнитногоклонения I , расположенного в широтной плоскости прохождения профиля А-В:

$$I = \arcsin (Z_a / dT). \quad (10)$$

Значения магнитногоклонения I вдоль исследуемого регионального геолого-геофизического профиля А-В определялись для территории Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов с интервалом дискретности через два градуса по долготе λ вдоль широтного профиля по 55-му градусу северной широты ($d\lambda = 2^\circ = 125$ км) согласно спутниковым (искусственный спутник Земли MAGSAT) векторным (компонентным $Z_a(\phi, \lambda, h)$, $H_a(\phi, \lambda, h)$) данным аномального магнитного поля исходя из формул (11)–(12). Тогда типичное значение в центральной части территории Ангарского

¹² Яновский Б. М. Земной магнетизм: учеб. пособие / ред. В. В. Металлова. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.

¹³ Там же.

¹⁴ Там же.

¹⁵ Там же.



мантийного плюма (хоть эти значения и достаточно разные) можно определить для широты $\phi = 55^\circ$ профиля А-В как

$$I(\phi, \lambda, h) = \arcsin[Z_a(\phi, \lambda, h) / dT_a(\phi, \lambda, h)] = 18^\circ \text{ для } \lambda = 94\text{--}108^\circ \text{Е}, \quad (11)$$

а типичное значение в центральной части территории Забайкальского мантийного плюма – как

$$I(\phi, \lambda, h) = \arcsin[Z_a(\phi, \lambda, h) / dT_a(\phi, \lambda, h)] = -9^\circ \text{ для } \lambda = 110\text{--}120^\circ \text{Е}. \quad (12)$$

Полученные данные о влиянии аномальной по геоэлектрическим и температурным параметрам мантии в зоне расположения глубинной части Байкальской рифтовой структуры подтверждаются положительными значениями на кривой изменения величины магнитного импеданса $I_{mp}(\phi, \lambda, h)$, рассчитанного по данным спутникового аномального магнитного поля (кривая в условных обозначениях под номером 4), приведенной в нижней части геолого-геофизического разреза (см. рис. 4, б). В среднем значение магнитного импеданса колеблется от 0 до +1:

$$I_{mp}(\phi, \lambda, h) = [Z_a(\phi, \lambda, h) / H_a(\phi, \lambda, h)] = 0,5, \quad (13)$$

где $Z_a(\phi, \lambda, h)$, $H_a(\phi, \lambda, h)$ и $I_{mp}(\phi, \lambda, h)$ – значения, полученные по данным измеренных на спутнике вертикальной и горизонтальной составляющих вектора индукции аномального магнитного поля и рассчитанных по ним значений магнитного импеданса. Аналогично вычисляются значения магнитного импеданса для других точек расчета.

С появлением новых работ показано, что выявлены температурно-устойчивые разновидности магнетитовых пород (гематит) [17], не теряющие своих магнитных свойств (свойств остаточной намагниченности) даже в верхней мантии до глубины более 600 км, где температуры достигают значений 1300 °К. Поэтому можно предполагать, что какая-то (не очень большая) часть магнитного поля может быть вызвана этими температурно-устойчи-

выми горными породами мантии с преобладающей в них остаточной намагниченностью.

Геоэлектрические данные удельного сопротивления (20–100 Ом·м) аномальной мантии в глубинной зоне расположения Байкальской рифтовой структуры (ниже границы Мохоровичича (примерная глубина $d_m > 40$ км)) косвенно свидетельствуют о высоких значениях температуры аномальной мантии (порядка 1200 °С) [15, 16] (см. рис. 4, б). Высокие значения температуры мантии в зоне Байкальской рифтовой структуры и частично в бортовых зонах Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов и их «дочерних» кольцевых структур меньшего размера подтверждаются значениями геотермальной энергии, представленными на соответствующей карте (рис. 5).

Ранее было показано [18], что многие месторождения газообразных и жидких углеводородов (природный газ, газоконденсаты, нефть) расположены в зонах мантийных плюмов. В связи с этим был проведен поиск возможных месторождений полезных ископаемых в зоне расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Предварительно были рассмотрены различные опубликованные данные о существующих месторождениях полезных ископаемых^{16,17} в зоне расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов. Оказалось, что основными месторождениями, которые расположены в зоне Ангарского мантийного плюма, являются угольные месторождения¹⁸, а в зоне Забайкальского мантийного плюма – урановые месторождения¹⁹. Карты месторождений различных полезных ископаемых, расположенных в том числе и в зоне обоих – Ангарского и Забайкальского – мантийных плюмов, представлены на рис. 6 и 7.

Из рис. 7 можно видеть, что значительная часть месторождений урана (Аргунское, Жерловское, Стрельцовское) Российской Федерации с запасами 5–20 тыс. т расположена в зоне

¹⁶ Карта полезных ископаемых территории СССР / Л. Н. Колосова. М.: Изд-во ГУГК, 1982.

¹⁷ Карта урановых месторождений России // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wdcb.ru/mining/uran/uran.jpg> (03.03.2022).

¹⁸ Карта полезных ископаемых территории СССР / Л. Н. Колосова. М.: Изд-во ГУГК, 1982.

¹⁹ Карта урановых месторождений России // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wdcb.ru/mining/uran/uran.jpg> (03.03.2022).

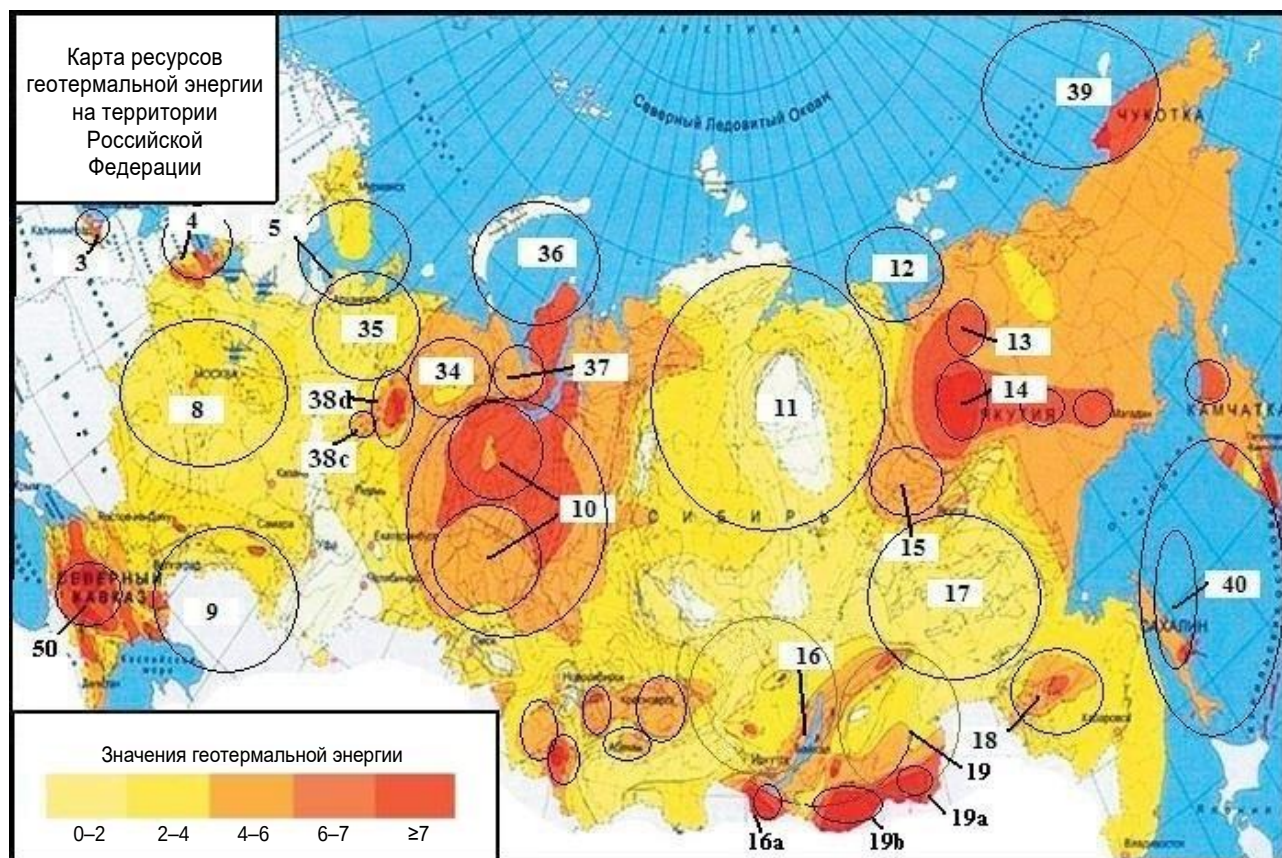


Рис. 5. Карта ресурсов геотермальной энергии Российской Федерации²⁰

Значения геотермальной энергии приведены в тоннах условного топлива на кубический метр (цветовые обозначения от 0 до 7)

Контуры расположения кольцевых структур Сибирского кратона, связанных с мантийными плюмами:

- 11 – Анабарской; 11а – Тунгусской; 16 – Ангарской; 16а – «дочерней» от Ангарской; 17 – Алдано-Становой;
19 – Забайкальской; 19а, 19б – «дочерних» от Забайкальской

Fig. 5. Map of geothermal energy resources of the Russian Federation²⁰

The values of geothermal energy are given in tons of the oil equivalent per a cubic meter (color designations from 0 to 7)

Location contours of the ring structures of the Siberian craton associated with mantle plumes:

- 11 – Anabar; 11а – Tunguska; 16 – Angara; 16а – Angara "daughter" structure; 17 – Aldano-Stanovaya;
19 – Trans-Baikal; 19а, 19б – Trans-Baikal "daughter" structure

Забайкальского мантийного плюма и его «дочерних» (близкорасположенных) плюм-тектонических структур меньших размеров. Также из рис. 7 видно, что многие месторождения урана связаны с горными породами докембрийского возраста, поэтому можно предположить, что наиболее активная фаза формирования Забайкальского мантийного плюма (и образования урановых месторождений) происходила в докембрийский геохронологический период геолого-тектонической эволюции Земли. В связи с этим для поисков новых месторождений урана большое значение может иметь возраст (докембрийский) формирова-

ния мантийного плюма, характерный для наиболее древних горных пород Забайкальского мантийного плюма, на территории которого расположены основные разведанные в России месторождения урана. В свою очередь, находящийся рядом Ангарский мантийный плюм, судя по самым древним породам ордовикского возраста, расположенным в его пределах, сформировался в доордовикский геохронологический период, но месторождений урана в его пределах пока не найдено. Кроме того, тектонические разломы в пределах территории Забайкальского мантийного плюма уходят своими «корнями» в зону так называемой

²⁰ Карта прогнозных ресурсов геотермальной энергии // Камчатский научный центр ДО РАН. [Электронный ресурс]. URL: http://www.kscnet.ru/ivs/publication/kuril_kam2005/title4.jpg (03.03.2022).

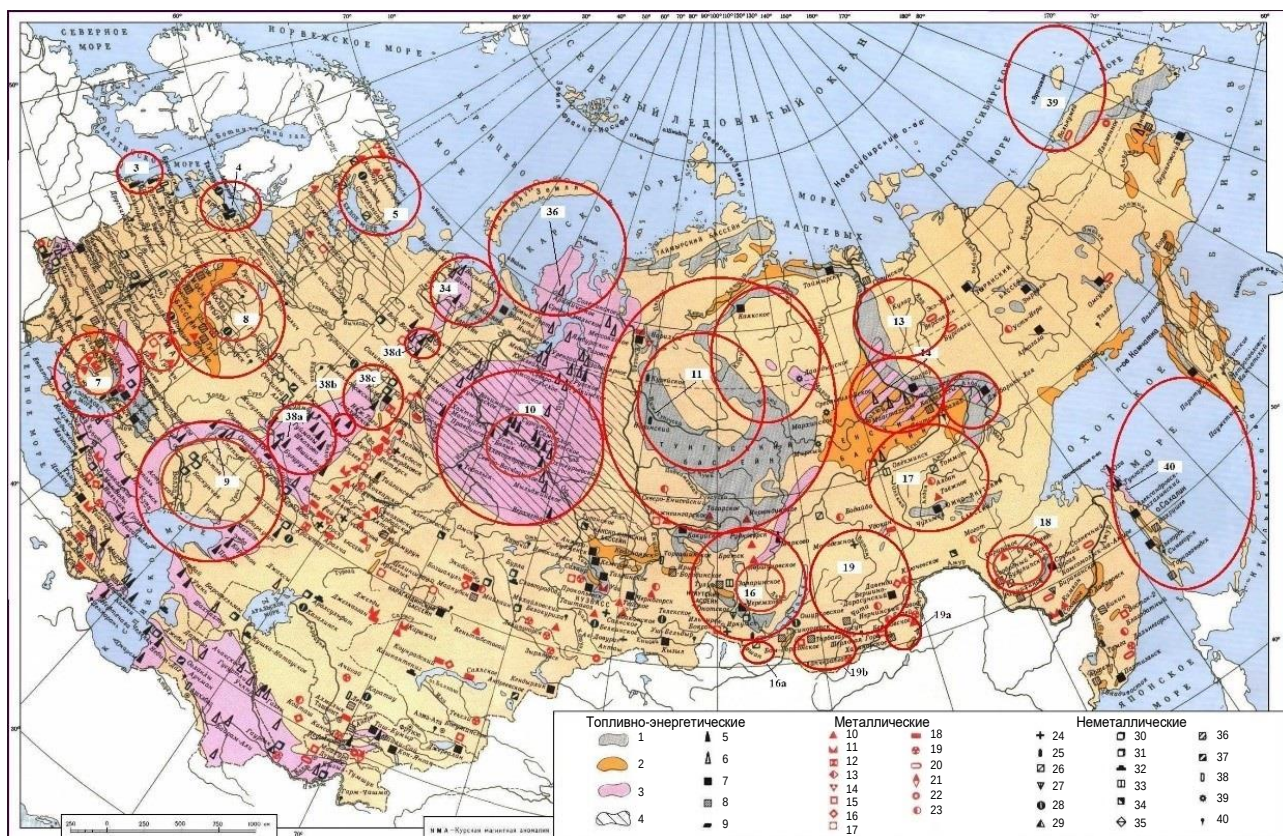


Рис. 6. Карта месторождений полезных ископаемых Российской Федерации²¹

Контуры расположения кольцевых структур Сибирского кратона, связанных с одноименными мантийными плюмами: 11а – Тунгусской (Тунгусский угольный бассейн); 16 – Ангарской (Иркутский угольный бассейн); 16а – Слюдянской (месторождения слюды); 17 – Алдано-Становой (Южно-Якутский угольный бассейн); 19 – Забайкальской (Нерчинские золоторудные месторождения); 19а – Березовской (месторождения золотоносных, полиметаллических и железных руд); 19б – Тарбаганской (месторождения вольфрамовых и полиметаллических руд)

Ресурсы: 1–9 – топливо-энергетические: 1 – площади залегания каменного угля, 2 – площади залегания бурого угля, 3 – нефтегазоносные площади, 4 – площади залегания торфа (заторфованность более 10 %), 5 – нефть, 6 – природный газ, 7 – каменный уголь, 8 – бурый уголь, 9 – горючие сланцы; 10–23 – металлические: 10 – железные руды, 11 – марганцевые руды, 12 – хромитовые руды, 13 – титановые руды, 14 – никелевые руды, 15 – вольфрамовые руды, 16 – молибденовые руды, 17 – алюминиевые руды, 18 – медные руды, 19 – полиметаллические руды, 20 – оловянные руды, 21 – сурьмяные руды, 22 – ртутные руды, 23 – золото; 24–40 – неметаллические: 24 – асбест, 25 – графит, 26 – слюда, 27 – тальк, 28 – фосфориты и апатиты, 29 – сера, 30 – калийные соли, 31 – поваренная соль, 32 – глауберова соль, 33 – гипс, 34 – каолин, 35 – облицовочные камни, 36 – глины огнеупорные, 37 – глины бентонитовые, 38 – цементное сырье, 39 – алмазы; 40 – источники минеральных вод

Fig. 6. Map of mineral deposits of the Russian Federation²¹

Location contours of the ring structures of the Siberian craton associated with similar mantle plumes: 11a – Tunguska (Tunguska coal basin); 16 – Angara (Irkutsk coal basin); 16a – Slyudyanka (mica deposits); 17 – Aldano-Stanovoy (South Yakut coal basin); 19 – Trans-Baikal (Nerchinsk gold deposits); 19a – Berezovskaya (deposits of gold-bearing, polymetallic and iron ores); 19b – Tarbagan (deposits of tungsten and polymetallic ores)

Resources: 1–9 – fuel and energy: 1 – coal occurrence areas, 2 – brown coal occurrence areas, 3 – oil and gas bearing areas, 4 – peat occurrence areas (peat content is more than 10 %), 5 – oil, 6 – natural gas, 7 – bituminous coal, 8 – brown coal, 9 – bituminous shale; 10–23 – metal: 10 – iron ores, 11 – manganese ores, 12 – chromite ores, 13 – titanium ores, 14 – nickel ores, 15 – tungsten ores, 16 – molybdenum ores, 17 – aluminum ores, 18 – copper ores, 19 – polymetallic ores, 20 – tin ores, 21 – antimony ores, 22 – mercury ores, 23 – gold; 24–40 – non-metallic: 24 – asbestos, 25 – graphite, 26 – mica, 27 – talc, 28 – phosphorites and apatites, 29 – sulfur, 30 – potassium salts, 31 – sodium salt, 32 – Glauber's salt, 33 – gypsum, 34 – kaolin, 35 – facing stones, 36 – refractory clays, 37 – bentonite clays, 38 – cement raw materials, 39 – diamonds; 40 – sources of mineral waters

²¹ Карта полезных ископаемых территории СССР / Л. Н. Колосова. М.: Изд-во ГУГК, 1982.

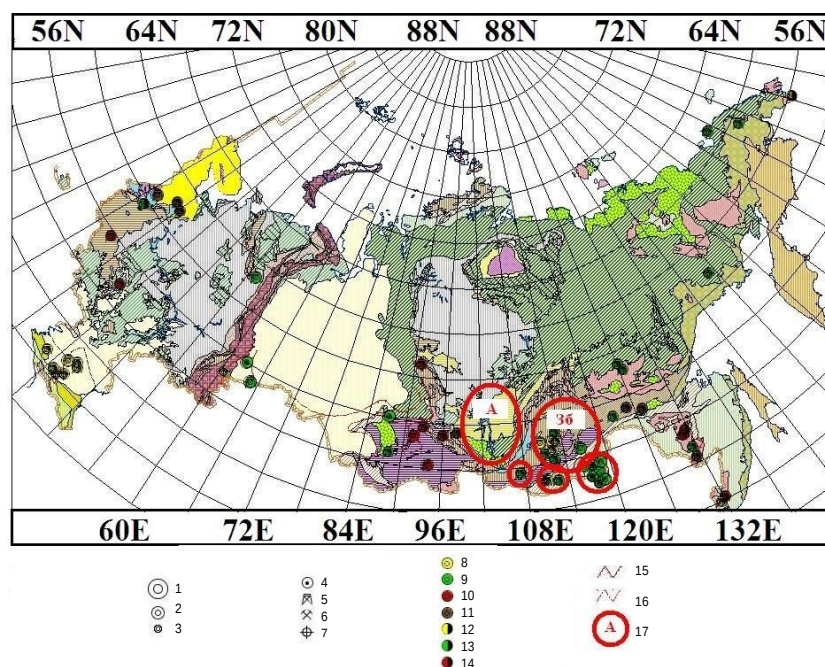


Рис. 7. Карта урановых месторождений России²²:

1–3 – оцениваемые запасы урановых месторождений: 1 – более 20 тыс. т, 2 – от 5 до 20 тыс. т, 3 – менее 5 тыс. т; 4–7 – освоенность месторождений: 4 – находящиеся в стадии оценки, 5 – отнесенные в резерв, 6 – эксплуатируемые, 7 – отработанные; 8–14 – возраст оруденений: 8 – кайнозойский, 9 – мезозойский, 10 – палеозойский, 11 – докембрийский, 12 – кайнозойско-мезозойский, 13 – мезозойско-палеозойский, 14 – палеозойско-докембрийский; 15 – границы урановорудных районов; 16 – границы перспективных на уран районов; 17 – контуры расположения кольцевых структур Сибирского кратона, связанных с мантийными плюмами: А – Ангарской и «дочерней» Слюдянской структур, 36 – Забайкальской структуры и «дочерних» Тарбаганской и Березовской структур меньшего размера

Fig. 7. Map of uranium deposits in Russia²²:

1–3 – estimated reserves of uranium deposits: 1 – more than 20 thousand tons; 2 – from 5 to 20 thousand tons; 3 – less than 5 thousand tons; 4–7 – development of deposits: 4 – under evaluation; 5 – reserved; 6 – operated; 7 – abandoned; 8–14 – mineralization age: 8 – Cenozoic; 9 – Mesozoic; 10 – Paleozoic; 11 – Precambrian; 12 – Cenozoic-Mesozoic; 13 – Mesozoic-Paleozoic; 14 – Paleozoic-Precambrian; 15 – boundaries of uranium ore areas; 16 – boundaries of the areas promising for uranium; 17 – location contours of the ring structures of the Siberian craton associated with mantle plumes: A – Angara and the "daughter" Slyudanskaya structure; 36 – Trans-Baikal structure and "daughter" Tarbagan and Berezovskaya structures of smaller scale

аномальной горячей низкоскоростной мантии (см. рис. 4, b, 9), из которой по этим разломам могли поступать магматические внедрения с наличием урановых руд. Тектонические же разломы в пределах территории Ангарского мантийного плюма уходят своими «корнями» в слои так называемой нормальной холодной высокоскоростной мантии, которая имеет другой геохимический состав и, по-видимому, очень бедна включениями урановых руд.

В настоящее время, когда возникли острые проблемы с энергетическими ресурсами во многих странах, появилась новая тенденция к развитию «зеленой» энергетики в Европе и Китае. В связи с этим актуальной явля-

ется задача поиска новых месторождений не только углеводородов (нефти, газа, угля), но и урана, так как атомные электростанции Европы также отнесены к направлению «зеленой» энергетики. Новые месторождения урана позволят в будущем усиленно развивать направление «зеленой» атомной энергетики в России и в дружественных странах, где уже построены отечественные атомные реакторы или только планируется их построение.

Заключение

Приведенные примеры, как представляется, свидетельствуют о высокой эффективности интерпретации спутниковых и аэростат-

²² Карта урановых месторождений России // Мировые центры данных России и Украины [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wdcb.ru/mining/uran/uran.jpg> (03.03.2022).



ных данных аномального магнитного поля при изучении строения литосферы в зоне Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов, пересекаемых профилем многоуровневых магнитных исследований. Приведем основные выводы проведенного исследования:

1. Показана возможность применения магнитных методов для исследования глубинного строения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов по данным аэроостатных и спутниковых магнитных измерений.

2. По аэроостатным и спутниковым магнитным данным выявлены некоторые глубинные тектонические разломы литосферы (Баргузинский, Икатский, Туколамский, Тунгирский), которые по особым точкам магнитоактивных зон этих разломов позволяют маркировать различные субгоризонтальные границы литосферных слоев в зоне расположения Ангарского и Забайкальского мантийных плюмов

вдоль регионального геолого-геофизического профиля А-В.

3. Выявлена пространственная взаимосвязь расположения месторождений угля и урана с кольцевыми морфологическими структурами, связанными с Ангарским и Забайкальским мантийными плюмами. Выявленные закономерности связи урановых месторождений с кольцевыми структурами мантийных плюмов, их геохронологическим возрастом формирования, геохимическим составом подстилающей их «горячей» низкоскоростной мантии и вследствие этого высоким тепловым потоком на поверхности Земли могут быть использованы для поиска новых перспективных регионов урановых месторождений в зонах расположения других крупных мантийных плюмов (Анабарского, Алдано-Станового) в пределах территории Сибирского кратона.

Список источников

1. Kharitonov A. L. Paleomagnetic anomalies of the sea-floor spreading – the result of the activity of plume-tectonic morphological structures of central type // *Modern Science*. 2018. Iss. 11. P. 8–11.
2. Чермак В. Геофизические поля, их природа и геологическая интерпретация // *Геодинамика*. 1986. Т. 5. № 2. С. 111–256.
3. Вольвовский И. С., Вольвовский Б. С. Разрезы земной коры территории СССР по данным глубинного сейсмического зондирования. М.: Советское радио, 1975. 265 с.
4. Цветков Ю. П., Белкин В. А., Канониди Х. Д., Харитонов А. Л. Физико-геологическая интерпретация аномального магнитного поля, измеренного в стратосфере // *Физика Земли*. 1995. № 4. С. 54–57.
5. Ротанова Н. М., Харитонов А. Л., Ан Ч. Спектральный анализ магнитного поля, измеренного на спутнике МАГСАТ // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1999. Т. 39. № 3. С. 101–107.
6. Rotanova N. M., Kharitonov A. L., Frunze A. Kh. Anomaly crust fields from MAGSAT satellite measurements: their processing and interpretation // *Annals of Geophysics*. 2004. Vol. 47. Iss. 1. P. 179–190.
7. Цветков Ю. П., Ротанова Н. М., Харитонов А. Л. Повысотная структура магнитных аномалий по градиентным измерениям в стратосфере // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2004. Т. 44. № 3. С. 412–418.
8. Пронин В. П., Харитонов А. Л. Использование разновысотных статистических характеристик аномального магнитного поля для оценки мощности магнитоактивного слоя земной коры // *Физика Земли*. 1994. № 7-8. С. 162–167.
9. Фонарев Г. А., Харитонов А. Л., Харитонova Г. П. Использование методов пространственно-временной магнитометрии для анализа магнитного поля, измеренного на спутнике «CHAMP» // *Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр»*. Серия: Науки о Земле. 2007. № 2. С. 49–53.
10. Kharitonov A. L. Determination of magnetic body parameters, using spectral analysis of the anomalous magnetic field // *Berlin: HNI-Report*. 1987. Vol. 21. P. 99–106.
11. Харитонов А. Л. Геолого-геофизическая интерпретация данных анализа многоуровневых измерений геомагнитного поля и их сопоставление с особенностями разрезов глубинного сейсмического зондирования // *Сейсмические технологии-2017: материалы науч.-практ. конф.* М.: ООО «Издательство Полипресс», 2017. С. 250–252.
12. Щукин Ю. К. Геологические задачи региональных геофизических исследований // *Геофизика*. 1997. № 1. С. 12–19.
13. Ботт М. Внутреннее строение Земли / пер. с англ. М.: Мир, 1974. 373 с.
14. Алексеев А. С., Лаврентьев М. М., Нерсесов И. Л., Романов В. Г. Результаты изучения горизонтальных неоднородностей мантии по профилю Памир – Байкал // *Математические проблемы геофизики*. Вып. 2. М.: Наука, 1974. С. 143–157.
15. Любимова Е. А., Фельдман И. С. Тепловой поток, температура и электропроводность земной коры и верхней мантии // *Кора и верхняя мантия Земли*. М.: Наука, 1975. С. 117–132.
16. Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 218 с.
17. Kuppenko I., Aprilis G., Vasiukov D. M., McCammon C., Chariton S., Cerantola V. et al. Magnetism in cold subducting slabs at mantle transition zone depths // *Nature*. 2019. Vol. 570. P. 102–106. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1254-8>.
18. Валяев Б. М. Углеродная дегазация



Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа (признание и развитие идей П. Н. Кропоткина) // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений

(к 100-летию со дня рождения акад. П. Н. Кропоткина): сб. ст. / ред. А. Н. Дмитриевский, Б. М. Валяев. М.: Геос, 2011. С. 10–32.

References

1. Kharitonov A. L. Paleomagnetic anomalies of the sea-floor spreading – the result of the activity of plume-tectonic morphological structures of central type. *Modern Science*. 2018;11:8-11. (In Russ.).
2. Chermak V. Geophysical fields, their nature and geological interpretation. *Geodinamika*. 1986;5(2):111-256. (In Russ.).
3. Vol'vovskii I. S., Vol'vovskii B. S. *Sections of the Earth's crust of the USSR territory according to deep seismic sounding data*. Moscow: Sovetskoe radio; 1975. 265 p. (In Russ.).
4. Tsvetkov Yu. P., Belkin V. A., Kanonidi Kh. D., Kharitonov A. L. Physico-geological interpretation of the anomalous geomagnetic field measured in the stratosphere. *Fizika Zemli*. 1995;4:54-57. (In Russ.).
5. Rotanova N. M., Kharitonov A. L., Chang A. T. Spectral analysis of the magnetic field measured onboard the MAGSAT satellite. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 1999;39(3):101-107. (In Russ.).
6. Rotanova N. M., Kharitonov A. L., Frunze A. Kh. Anomaly crust fields from MAGSAT satellite measurements: their processing and interpretation. *Annals of Geophysics*. 2004;47(1):179-190.
7. Tsvetkov Yu. P., Rotanova N. M., Kharitonov A. L. High-by-high structure of magnetic anomalies based on gradient measurements in the stratosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 2004;44(3):412-418. (In Russ.).
8. Pronin V. P., Kharitonov A. L. The use of different-altitude statistical characteristics of an anomalous magnetic field to assess the thickness of the magnetic active layer of the Earth's crust. *Fizika Zemli*. 1994;7-8:162-167. (In Russ.).
9. Fonarev G. A., Kharitonov A. L., Kharitonova G. P. Use of the spatial-temporary magnetic measurement methods for the analysis of the geomagnetic field, measured on the satellite «CHAMP». *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii "Uchebno-nauchnyy tsentr". Seriya: Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center"*. *Earth Sciences*. 2007;2:49-53. (In Russ.).
10. Kharitonov A. L. Determination of magnetic body parameters, using spectral analysis of the anomalous magnetic field. *Berlin: HHI-Report*. 1987;21:99-106.
11. Kharitonov A. L. Geological and geophysical interpretation of analysis data of multilevel measurements of the geomagnetic field and their comparison with the features of deep seismic sounding sections. In: *Seismicheskie tekhnologii-2017: materialy nauch.-prakt. konf. = Seismic technologies-2017: materials of the scientific and practical conference*. Moscow: Izdatel'stvo Polipres; 2017, p. 250–252. (In Russ.).
12. Shchukin Yu. K. Geological challenges of regional geophysical research. *Geofizika*. 1997;1:12-19. (In Russ.).
13. Bott M. H. P. The interior of the Earth; 1971. 316 p. (Russ. ed.: *Vnutrennee stroenie Zemli*. Moscow: Mir; 1974. 373 p.).
14. Alekseev A. S., Lavrent'ev M. M., Nersesov I. L., Romanov V. G. Results of studying horizontal inhomogeneities of the mantle along the Pamir – Baikal profile. In: *Matematicheskie problemy geofiziki = Mathematical problems of geophysics*. Iss. 2. Moscow: Nauka; 1974, p. 143–157. (In Russ.).
15. Lyubimova E. A., Fel'dman I. S. Heat flow, temperature and electrical conductivity of the Earth's crust and upper mantle. *Kora i verkhnyaya mantiya Zemli = Crust and upper mantle of the Earth*. Moscow: Nauka; 1975, p. 117–132. (In Russ.).
16. Van'yan L. L. *Electromagnetic sounding*. Moscow: Nauchnyi mir; 1997. 218 p. (In Russ.).
17. Kупенко I., Aprilis G., Vasiukov D. M., McCammon C., Chariton S., Cerantola V. et al. Magnetism in cold subducting slabs at mantle transition zone depths. *Nature*. 2019;570:102-106. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1254-8>.
18. Valyaev B. M. Hydrocarbon degassing of the Earth, geotectonics and oil and gas origin (acknowledgement and development of P. N. Kropotkin's idea). In: *Dmitrievskii A. N., Valyaev B. M. (eds.). Degazatsiya Zemli i genezis neftegazovykh mestorozhdenii (k 100-litiyu so dnya rozhdeniya akad. P. N. Kropotkina) = Degassing of the Earth and genesis of oil and gas fields (to the 100th birth anniversary of the Academician P.N. Kropotkin)*. Moscow: Geos; 2011, p. 10–32. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Харитонов Андрей Леонидович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории главного магнитного поля,
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН,
г. Москва, Россия,
ahariton@izmiran.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>.



Andrey L. Kharitonov,
Cand. Sci. (Phys. & Math.),
Leading Researcher of the Main Magnetic Field Laboratory,
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia,
ahariton@izmiran.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 18.03.2022; одобрена после рецензирования 21.04.2022; принята к публикации 24.05.2022.

The article was submitted 18.03.2022; approved after reviewing 21.04.2022; accepted for publication 24.05.2022.