

Термоэлектрическая модель магнитного поля Земли

А. Н. Дмитриев*, Ю. В. Пахаруков

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

**e-mail: dmitriev38@inbox.ru*

Аннотация. Рассмотрен вариант термоэлектрической модели дипольного магнитного поля Земли. Ее основой являются присутствующие в ядре планеты геотермоэлектрические токи. Последние циклически изменяют свое направление, что со временем приводит либо к потеплению на Земле, если их движение направлено в сторону земной коры, либо к похолоданию — при движении в сторону внутреннего ядра. При каждой смене направления движения термотоков одновременно происходят инверсии полюсов магнитного поля Земли (МПЗ). Процесс инверсии мгновенный (в масштабах планетарного времени) и не является результатом постепенного разворота на 180° земной магнитной оси. В моменты инверсий термотоков в ядре суммарное геомагнитное поле уменьшается до уровня $4,6 \cdot 10^{-6}$ Тл, постоянно поддерживаемого термотокарами полупроводящих пород нижней мантии. Рассмотренный вариант термоэлектрической модели МПЗ может оказаться перспективным для изучения магнитных полей планет Солнечной системы.

Ключевые слова: геотермоэлектрические токи; инверсия магнитных полюсов; магнитное поле Земли; магнитное поле нижней мантии; термоэлектрическая модель магнитного поля Земли

Thermoelectric model of the Earth's magnetic field

Arkadiy N. Dmitriev*, Yury V. Pakharukov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**e-mail: dmitriev38@inbox.ru*

Abstract. A variant of the thermoelectric model of the Earth's dipole magnetic field is considered. It is based on geothermoelectric currents present in the planet's core. The currents cyclically change their direction, which leads over time either to warming on the Earth, if their movement is directed towards the Earth's crust, or to cooling, when moving towards the inner core. With each change in the direction of movement of the thermal currents, the poles of the Earth's magnetic field are inverted simultaneously. The inversion process is instantaneous (on the scale of planetary time) and is not the result of a gradual reversal on the 180° Earth's magnetic axis. At the moment of inversions of thermal currents in the core, the total geomagnetic field decreases to the level of $4.6 \cdot 10^{-6}$ T, which is constantly supported by thermal currents of semi-conducting rocks of the lower mantle. The considered version of the thermoelectric model of the Earth's magnetic field may be promising for studying the magnetic fields of planets in the Solar system.

Key words: geothermoelectric currents; inversion of magnetic poles; the Earth's magnetic field; magnetic field of the lower mantle; thermoelectric model of the Earth's magnetic field

Введение

В настоящее время в основе наиболее развитой теории по обоснованию генерации электрических токов в металлическом ядре планеты лежит гидромагнитное динамо, работающее по принципу самовозбуждения. Обоснованию этой модели посвящено большое количество научных публикаций теоретического и экспериментального характера [1–6]. Однако для эффективной работы этой модели, способной не только создавать, но длительно и полноценно поддерживать существующее магнитное поле Земли, требуется предварительное удовлетворение ряда условий:

- наличие затравочного магнитного поля;
- знание числа Рейнольдса Re_m (оно должно быть всегда $Re_m \gg 1$) и одновременно характера движения проводящей жидкости (плазмы) в ядре, соответствующего турбулентному;
- знание величины вязкости этой плазмы;
- доказательность присутствия течений жидкости дифференциального вращения и меридиональной циркуляции в ядре планеты;
- знание скоростного поля течения проводящей жидкости (плазмы) в ядре и т. д.

Например, если строго доказывается (экспериментально, измерениями, наблюдениями других полей) существование течения расплава внешнего ядра с его дифференциальным вращением, то «...образование магнитного поля с помощью механизма динамо должно иметь характер некоторой неустойчивости» [6]. Предполагается, что последняя может проявляться через механизм постепенного растяжения (растяжения и разрыва [7]) замороженных в проводящую среду магнитных петель, и при изменении характера течения (турбулентного) возможно перекручивание и сложение их в восьмерки с последующим наложением половинок друг на друга. В результате может достигаться двойное увеличение магнитного потока, пересекающего эти половинки. Далее, по аналогии следует ожидать, что механизм продолжит работать с половинками, учетверяя магнитный поток. И так далее, «...что приводит к экспоненциальному росту магнитного поля» [6]. Однако рассмотренный механизм возможен лишь при условии преобладания индукционных эффектов над диссипативными [6, 8].

Но чтобы это условие выполнялось — наличие течения с его турбулентным характером — необходимо точно знать скоростное поле течения проводящей жидкости (плазмы) внешнего расплавленного ядра. Оказывается, для выполнения этого условия, в свою очередь, необходимо выполнить новое условие — проводящий расплав ядра должен иметь очень низкую вязкость. К настоящему времени по поводу информации о последней известно следующее.

На протяжении долгого времени в модели динамо на основе теоретических и лабораторных исследований считалось, что внешнее металлическое расплавленное ядро имеет низкую вязкость η , в среднем равную 10^{-2} Па·с [9–11]. Поэтому если исходить из различия динамического сжатия ε ядра и мантии, то представляется возможным считать, что ядро обладает собственной скоростью вращения вплоть до $1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ [8]. Однако в последние годы на основе новых методик определения вязкости [12, 13] и современного анализа сейсмических волн [14, 15] появляются новые дан-

ные об ультравысокой вязкости внешнего ядра $\eta > 10^{11}$ Па·с. Эти данные явно указывают на невозможность существования какой-либо заметной и автономной скорости его вращения. С этим вполне согласуется и тот факт, что до сих пор пока не установлены свободные колебания внутреннего ядра (в расплавленном внешнем ядре) в результате взаимодействия Земли с Луной, тогда как для возбуждения и поддержания этих колебаний, как показывают расчеты, достаточно даже энергии землетрясений [16].

Следовательно, из рассмотренных двух условий, даже не обращаясь к другим, и исходя из просмотренных профессиональных обзоров и работ [2–6, 8, 17, 18] становится очевидным, что для модели гидромагнитного динамо пока не найден принципиальный и эффективный механизм, порождающий дипольное магнитное поле Земли.

Однако ростки этого механизма начинали пробиваться уже в первой половине прошлого столетия. Так, например, первая и блестящая на сегодняшний день попытка объяснить магнитное поле Земли существованием в ядре термоэлектродвижущих сил, обусловленных турбулентными конвективными движениями жидкости ядра, была предпринята В. М. Эльзассером [19]. Затем к геотемпературному градиенту, приводящему к разности температур между холодной мантией и горячим ядром, с привлечением эффекта Холла обратился Е. Х. Вестайн [20]. Практически одновременно С. К. Ранкорном [21] был рассмотрен вариант заряженной границы раздела между мантией и ядром. Однако следует заметить, что этот вариант менее удачен в сравнении с первыми гипотезами, так как уже прямые расчеты показывают, что суммарный заряд сферической поверхности в сопоставлении с объемным зарядом ядра планеты ничтожно мал, чтобы сгенерировать современное геомагнитное поле. Что касается первых двух гипотез, то Т. Рикитаки [1] рассматривает их, к сожалению, как маловероятные термоэлектрические эффекты, обосновывая отсутствием определенности термоэлектрической мощности ядра. Именно это мнение оказалось решающим и в дальнейшем все исследования, связанные с земными термоэлектрическими эффектами, в теории динамо не принимались во внимание.

Второе напоминание о роли термоэлектрических токов в формировании магнитных полей горячих Ср-звезд и, возможно, планет рассматривается в работе А. З. Долгинова, где им получено уравнение генерации поля [17]:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = [\nabla, [\mathbf{v}\mathbf{B}]] + \frac{c^2}{4\pi} \left[\nabla, \left(\frac{1}{\sigma} [\nabla, \mathbf{B}] \right) \right] - \left[\nabla, \frac{[\mathbf{j}\mathbf{B}]}{en_e} \right] - c[\nabla\eta, \nabla T], \quad (1)$$

где η — термоэлектрический коэффициент.

Он полагал, что четвертый справа член $[\nabla\eta, \nabla T]$ отличен от нуля и порождает магнитное поле звезды, тогда как первыми тремя членами можно пренебречь из-за их малости или невыполнимости в рассматриваемой модели движущейся немагнитной плазмы. Из его расчетов следовало, что дипольное поле звезды на ее поверхности может составлять порядка 10^{-4} Тл. К сожалению, в последующие годы А. З. Долгинов так и не представил развернутую теорию по созданию магнитных полей космических объектов с помощью термоэлектрических токов, присущих «горячим» объектам.

Ниже делается третья попытка реанимации термоэлектрических токов, которые при движении внутри проводящих оболочек космических объек-

тов под воздействием разности температур, обусловленной планетарными и звездными температурными градиентами, способны создавать не затравочные, а сильные реальные магнитные поля у «горячих» планет и звезд. Первой публикацией на эту тему является статья [22].

В этой статье расчеты магнитных полей построены на известных законах физики и на не выходящих за пределы, также известных научных данных о внутреннем строении и физических свойствах космических объектов без каких-либо для них предварительных условий или искусственных ограничений. Механизм расчетов является достаточно понимаемым, так как он базируется на известной квантовой теории электропроводности металлов и полупроводников. Интенсивность магнитных полей космических объектов, как показывают расчеты и для других планет, в принципе определяется тремя основными формирующими параметрами: температурным градиентом (разностью температур ΔT), электропроводностью (электронной и(или) полупроводниковой) сферических оболочек (или слоев) σ и размерами этих оболочек, пропорциональными своим радиусам R .

Предлагаемый механизм расчетов магнитных полей на основе термоэлектрических токов ниже тестируется с использованием современных данных для планеты Земля. Тестирование выполняется в два этапа. На первом этапе рассматривается внутри планеты физическая картина термических процессов, объективно порождающих, на основе физических законов, электрические и магнитные явления. На втором этапе, понимая логику физических процессов, производятся непосредственно математические расчеты порожденных электрических и магнитных элементов Земли.

О термоэлектрических явлениях во внутренних оболочках Земли

В работах [23–25] доказана ведущая роль геотемпературного градиента в формировании дополнительного термоэлектрического потенциала, наложенного на природные электронные проводники (металлические руды, графитистые породы). Между концами последних всегда существует разность температур, которая, согласно эффекту Зеебека, является причиной возникновения термоэлектрического потенциала [26, 27]:

$$\Delta\varphi_T = \int_{T_1}^{T_2} \beta dT, \quad (2)$$

где β — температурный коэффициент, для чистых металлов составляет $0,0001 \text{ В} \cdot \text{град}^{-1}$, тогда как для некоторых полупроводников — $0,0015 \text{ В} \cdot \text{град}^{-1}$ [27].

В этой связи, рассматривая геотемпературный градиент в планетарном масштабе, представляется возможным построить непротиворечивую законам физики динамическую модель магнитного поля Земли (МПЗ). Для решения задачи исходим из известных научно обоснованных данных о физических свойствах ее оболочек и их геометрических параметрах [28–33].

Во-первых, большинство исследователей придерживаются следующих реперных температур в теле нашей планеты: на глубине около 100 км температура близка $+1\ 800 \text{ К}$, на глубине $\sim 400 \text{ км}$ (зона фазовых переходов, слой С) — $+1\ 900 \text{ К}$, на границе «мантия — ядро» — $+4\ 000 \dots +5\ 000 \text{ К}$ и в центре ядра — $+5\ 000 \dots +6\ 230 \pm 500 \text{ К}$.

Во-вторых, расплавленная металлическая оболочка Земли Е (внешнее ядро) является самой горячей областью планеты. В то же время внутреннее также металлическое ядро G находится в твердом состоянии, а, значит, его температура несколько ниже внешнего ядра.

В-третьих, породы нижней мантии D по электропроводности относятся к полупроводникам, свойствами которых также может обладать внутренняя половина переходного слоя С. Его внешняя половина и верхняя мантия В считаются диэлектриками.

Отсюда следует предположение о реальном существовании противоположно направленных геотемпературных градиентов относительно оболочки Е, что позволяет, в свою очередь, представить схематические термоэлектрические процессы внутри планеты, порождающие дипольное геомагнитное поле (рисунок: 1 — электрон; 2 — траектории электронов; 3 — ожидаемая трасса (след) электрона металлического ядра при вращении планеты; 4 — ожидаемая трасса (след) электрона нижней мантии при вращении планеты; 5 — магнитные силовые линии).

В данном случае земной шар может быть представлен сферическим геотермоэлектрическим элементом (СГТЭ) (рис. а, б), к концам которого: центральной части металлического ядра и оболочке С (к ее середине) приложена разность температур порядка $3200 \div 4500$ °С. Тогда, исходя из (2), минимальная разность потенциалов $\Delta\varphi_T$ для СГТЭ составит 0,45 В, а напряженность электрического поля для него может быть найдена из равенства

$$E_T = \Delta\varphi_T / l_{\text{СГТЭ}}, \text{ В/м;} \quad (3)$$

где $l_{\text{СГТЭ}}$ — радиус СГТЭ, равный расстоянию от центра планеты до средней части оболочки С и определяемый в 5 438 км или 5 650 км до верхней мантии. Следовательно, электрическое поле E_T , порожденное существующей разностью температур ΔT , вынуждает планетарные потоки «горячих» электронов направленно двигаться от центра планеты вдоль по радиусам к ее внешним оболочкам. При этом в сферическом проводнике возникает замкнутое сферическое магнитное поле, которое по всем признакам является тороидальным полем. Это значит, что полоидальное дипольное магнитное поле Земли должно отсутствовать.

Этот случай возможен для не вращающейся Земли. Однако в реальной ситуации Земля вращается вокруг своей оси с угловой скоростью $7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и линейной на экваторе $465,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (или $1\,674,4 \text{ км} \cdot \text{час}^{-1}$). Эти данные указывают, что скорость вращения Земли достаточна, чтобы потоки свободного электронного газа в металлическом ядре и нижней мантии (полупроводнике) испытывали заметное воздействие, помимо центробежной силы $F_{\text{ЦС}}$ и термоэлектрической э.д.с. F_E , еще и инерционной силы Кориолиса F_K (см. рис. б). В частности, первые две силы $F_{\text{ЦС}}$ и F_E действуют в вертикальной плоскости (при мгновенном срезе через ось по меридиану), заставляя электроны все более удаляться от центра ядра и оси вращения планеты в направлении их суммарного вектора $F_{\text{ЦСЕ}}$.

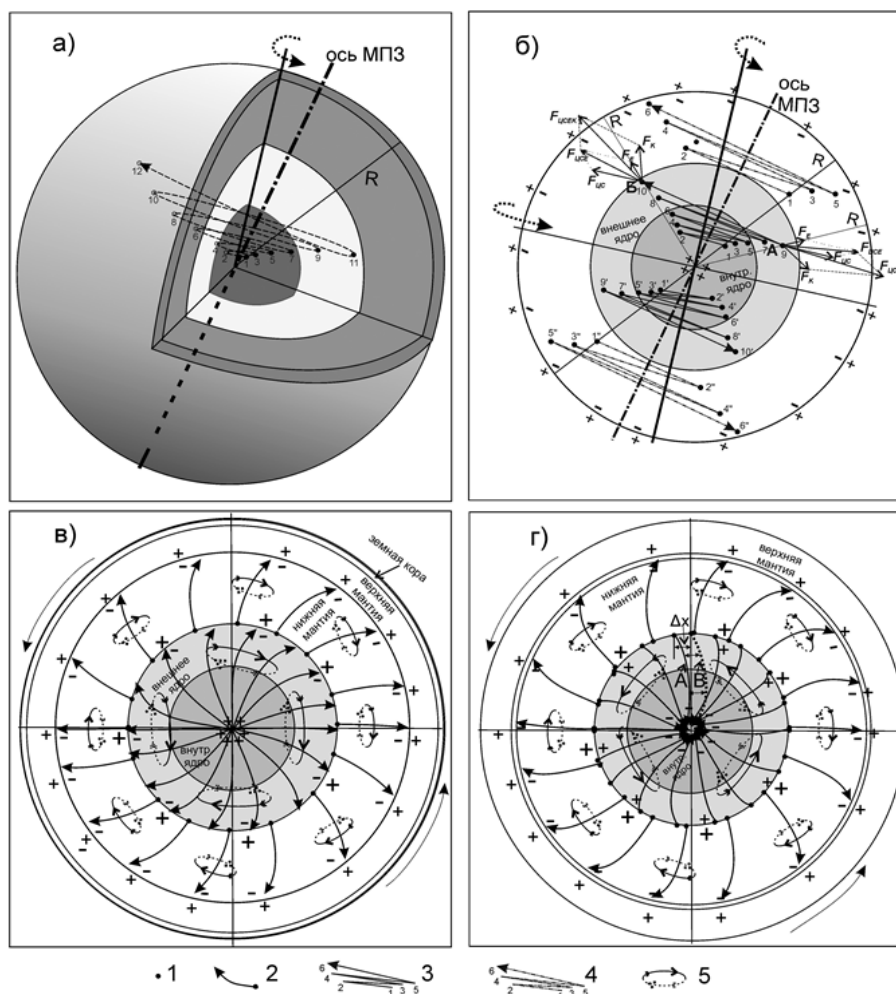


Рисунок. Схема движения потоков электронов в границах сферического металлического ядра и сферического кольца нижней мантии:

а) схематическое 3D-изображение трассы вращения отдельного электрона в отрезке времени; б) проекции на меридианную плоскость трасс (следов) вращающихся электронов в металлическом ядре и нижней мантии; в) проекции на экваториальную плоскость трасс (следов) одинаково движущихся электронов металлического ядра и нижней мантии к земной поверхности; г) проекции на экваториальную плоскость трасс (следов) противоположно движущихся электронов металлического ядра (к центру ядра) и нижней мантии (к земной поверхности)

Инерционная сила F_K , имея по существу величину планетарного масштаба, вынуждает электроны смещаться от своих радиальных направлений в сторону, противоположную вращению Земли, то есть в горизонтальной плоскости (если не учитывать угол наклона земной оси) (см. рис. в, г). Однако наклон оси вынуждает след вектора F_K в восточном полушарии «уходить» под плоскость, тогда как в западном полушарии его след проходит над плоскостью. Результатом совместного действия трех сил, с учетом $F_{ЦСЕ}$, является суммарный вектор $F_{ЦСЕК}$ (см. рис. б). Последний в западной полусфере, исходя из разнонаправленности в обеих полусферах

вектора $\mathbf{F}_K$, всегда находится на новом более высоком уровне, чему также способствует увеличение длины траектории электрона на $\Delta A_i B_{i+1}$ за время каждого оборота (оборотов) планеты Δt . Следовательно, именно центробежная и кориолисова силы постепенно изменяют ориентировку плоскости круговых траекторий электронов. Эта плоскость на начальном этапе (с момента формирования ядра) нормальна к земной оси, тогда как на современном этапе плоскость изменила положение, нормаль к которой составляет порядка 11° относительно земной оси. То есть эта нормаль соответствует современной оси дипольного магнитного поля Земли (см. рис. а, б). Одновременно с этим центробежная и кориолисова силы «отжимают» электроны от магнитной оси в виде двухстороннего воронкообразного отверстия. Электронное разуплотнение в последнем является причиной нарушения замкнутости тороидального поля, которое, за счет этого нарушения, и порождает полноценное полоидальное магнитное поле планеты.

Термоэлектрическая модель магнитного поля Земли

Рассмотрим цикл 1, когда устремляющиеся потоки термотоков I_{low} от оболочки Е к центру Земли из-за отсутствия стоков (по существу закрытая система), а следовательно, и отсутствия явной диссипации электрической энергии постепенно увеличивают концентрацию электронов во внутреннем ядре (см. рис. г). Это приводит к росту плотности тока $\mathbf{j}$ и, как следствие, к возрастанию джоулева тепла Q . В результате температура внутреннего ядра (T_i) достигает температуры расплавленного ядра (T_0), то есть $T_i = T_0$. С этого момента электрические токи I_{low} стремятся к нулю, а знак зарядов в центре ядра изменяется на обратный. В данном случае не рассматривается существующая турбулентность джоулева тепла Q , которая способствует знакопеременной пульсации температуры T_i в оболочке Е, и на уровне более высокого порядка кратковременно и до нескольких раз может происходить смена знаков зарядов.

В течение цикла 1, за счет постепенного оттока электронов из внешнего ядра, на Земле развивается похолодание, в ряде случаев соответствующее ледниковому периоду.

Из-за инерционности теплового процесса температура внутреннего ядра некоторое время нарастает и достигает устойчивого состояния $T_i > T_0$, что немедленно приводит к возникновению термотоков I_{low} противоположного направления и смене знаков поляризованных зарядов (см. рис. в). С этого момента начинает развиваться цикл 2 — электроны постепенно покидают внутреннее ядро, перетекая во внешнее ядро и частично в нижнюю мантию. Земля входит в режим потепления. В то же время вслед за снижением концентрации электронов во внутреннем ядре происходит его остывание. Это согласуется с известными исследованиями об остывании внутреннего ядра порядка $50 \text{ K} \cdot 10^{-9}$ лет, то есть $7,2 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 10^{-9}$ лет [34]. При наступлении устойчивого состояния $T_i < T_0$ развивается новый и противоположный процесс движения термотоков, то есть цикл 2 сменяется циклом 1. Земля снова вступает в режим похолодания.

Следовательно, одновременно с циклической сменой во внутреннем ядре направлений термотоков, сопровождаемых сменой знаков зарядов в центре планеты и на границе внешнего ядра с нижней мантией, происходит

и периодическая смена полюсов геомагнитного поля. В частности, схема смены полярности МПЗ следующая:

- начало цикла 1 — полюсы NS, на Земле похолодание;
- завершение цикла 1 и переход в цикл 2 — полюсы SN, на Земле потепление;
- завершение цикла 2 и переход в цикл 1 — полюсы NS, на Земле похолодание.

Становится очевидным, что смена полюсов МПЗ происходит дважды: в момент начала любого цикла и при его завершении.

Теперь перейдем к расчетам электрических и магнитных характеристик Земли, которые обусловлены циклическими циркуляциями термоотоков ядра I_{low} и нижней мантии I_{top} . Для вычисления основной характеристики магнитного поля — магнитной индукции B (далее: B_{TT}^{low} — для ядра, B_{TT}^{top} — для нижней мантии) найдена, исходя из теоремы циркуляции, формула типа Био — Савара — Лапласа для нестандартного сферического источника тока, движущего эти токи из центра сферы (к центру сферы) по радиальным направлениям

$$B_{TT}^{low} = \frac{3\mu_0\mu_{Fe}I_{low}R_{\Sigma}}{4\pi R_Z^2} \sin\alpha, \quad (4)$$

где $\mu_0\mu_{Fe} = \mu_0$, так как $\mu_{Fe} = 1$ при температуре Fe ядра выше точки Кюри, и равно $1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн·м⁻¹; $R_{\Sigma} = R_G + \Delta R_F + \Delta R_E$ — суммарный радиус ядра, равен $3,65 \cdot 10^6$ м; R_Z — радиус Земли, равен $6,37 \cdot 10^6$ м.

Величина I_{low} находится из известного закона Ома

$$I_{low} = j \cdot S_G = j \cdot 4\pi R_G^2, \text{ А} \quad (5)$$

где S_G — сферическая поверхность внутреннего ядра радиусом $R_G = 1,4 \cdot 10^6$ м.

В свою очередь, воспользовавшись квантовой теорией электропроводности металлов и полупроводников [27, 35–39], найдем плотность термоотоков горячего ядра:

$$j = e^2 n E_T \frac{l}{p_F}, \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \quad (6)$$

где e — заряд электрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; n — концентрация электронов в ед. объема металла (Fe), м⁻³, вычисляется по формуле, учитывающей давление в ядре $p = 3,59 \cdot 10^{11}$ Па:

$$n = (5 \frac{m_e}{\hbar^2} (3\pi^2)^{-2/3})^{3/5} p^{3/5}, \quad (7)$$

где m_e — масса электрона, $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг; $\hbar$ — постоянная Планка, $1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; p_F — импульс Ферми, м·кг/с, вычисляется из

$$p_F = \hbar(3\pi^2 n)^{1/3}. \quad (8)$$

Напряженность термополя E_T ядра Земли при разности температур $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ и радиусе R_Σ находится с помощью формулы (3)

$$E_T = \beta \cdot \Delta T / R_\Sigma, \text{ где } \beta = 0,0001 \text{ В} \cdot \text{град}^{-1}. \quad (9)$$

Предварительно подставив константы в формулы (5–9) и определив основные электрические характеристики ядра I_{low} , j и E_T , окончательно найдем из (4) величину магнитной индукции B_{TT}^{low} на дневной поверхности, равную $3,49 \cdot 10^{-5}$ Тл. Последняя практически совпадает с известной величиной магнитной индукции B_0 , замеренной на экваторе Земли и равной $3,4 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Следовательно, термоэлектрические токи ядра создают не ничтожно малое затравочное поле, а основное дипольное магнитное поле Земли. Из расчетов также следует, что внутреннее ядро металлическое, так как в формуле (9) использован температурный коэффициент β , равный $0,0001 \text{ В} \cdot \text{град}^{-1}$ для чистых металлов, от величины которого зависят и все основные параметры ядра: E_T , j , I_{low} .

Кроме того, рассматриваемая термоэлектрическая модель МПЗ позволяет объяснить наклон магнитной оси относительно земной за счет одновременного воздействия на потоки электронов центробежной и кориолисовой инерционных сил. Этим же может быть объяснен отступ центра магнитной оси от центра земной оси на величину, близкую $\Delta X \approx 0,07 \cdot R_z$ (см. рис. г).

В свою очередь, всегда движущиеся в одном направлении потоки термотоков из нижней мантии в сторону оболочек С, В и А создают в этих оболочках объемное положительное электрическое поле (см. рис. б). Последнее поддерживается на уровне, превышающем его диссипацию за счет постоянной разности температур ΔT между оболочками Е и В в пределах $4\,000^\circ\text{C}$. Согласно расчетам по формуле (2), с учетом констант и параметров, характерных для нижней мантии, ее магнитное поле B_{TT}^{top} составляет $\sim 4,6 \cdot 10^{-6}$ Тл, то есть почти на порядок ниже B_{TT}^{low} . Следовательно, поле термотоков нижней мантии не способно к генерации необходимой интенсивности геомагнитного поля по следующим причинам: а) породы — полупроводники, б) удельная проводимость пород колеблется в интервале $0,1 \div 10 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ [40], в) концентрация электронов в полупроводниках в среднем не превышает 10^{20} м^{-3} .

Важно отметить, что рассмотренная модель МПЗ позволяет более корректно подойти к объяснению причин малости или отсутствия магнитных полей у соседних планет Солнечной системы. В частности, любая остывшая планета с холодным металлическим ядром будет иметь только реликтовое магнитное поле.

Для примера выполним расчеты дипольного магнитного поля планеты Марс. При этом исходим, что планета Марс является остывшей, ее металлическое ядро однородное по составу и холодное. Учитывая малую интенсивность магнитного поля Марса, можно предположить, что разность температур ΔT между центром ядра и его внешней поверхностью, очевидно, менее 1°C (условно примем равной $0,17^\circ\text{C}$). В этом случае на марсианской поверхности магнитное поле составит $6,07 \cdot 10^{-8}$ Тл или порядка 61γ

(1 Тл = 10^9 γ), что близко к данным, измеренным магнитометрами АМС Марс-2 и Марс-3: 60–64 γ на экваторе и порядка 100–120 γ на полюсе [41]. Расчеты показывают, что марсианское магнитное поле в 575 раз слабее земного. Поэтому, несмотря на схожесть в составе ядра Марса с земным и близких скоростях вращения этих планет, Марс и ему подобные планеты с холодными металлическими ядрами не способны, из-за отсутствия поля E_T и термоэлектрических токов, породить интенсивные магнитные поля. Отсюда следует вывод, что Марс является холодной планетой с давно прекратившимися какими-либо тектоно-магматическими процессами.

Выводы

Основу термоэлектрической модели магнитного поля Земли составляет реально существующий и постоянно действующий в металлическом ядре источник термоэлектрической энергии — разность геотемператур. В результате в металлическом ядре постоянно присутствуют циклически циркулирующие термоэлектрические токи, обязанные геоявлению Зеебека. Цикличность термотоков обуславливается периодической сменой знака разности температур на концах сферического проводника «внутреннее твердое ядро — внешнее расплавленное ядро», что одновременно сопровождается инверсией полюсов геомагнитного поля.

С физической точки зрения термоэлектрические процессы протекают внутри нашей планеты в соответствии с известными законами физики, которые не требуют для удовлетворения условий модели каких-либо умозрительных ограничений или дополнений. Рассмотренная упрощенная (линейная) модель МПЗ, в сопоставлении с множеством других известных моделей, включая и магнитное динамо Земли, тем не менее позволяет дать физически и логически обоснованные ответы на широкий круг вопросов, связанный с особенностями поведения геомагнитного поля в пространстве и времени.

В частности, термоэлектрическая модель магнитного поля Земли корректно объясняет причину инверсий магнитных полюсов и циклическую смену периодов потеплений и похолоданий, а использованные при расчетах величина электропроводности ядра и его состав находятся в соответствии с известными данными науки относительно ядра Земли. Примененный механизм математического расчета магнитного поля Земли, в случае его дальнейшего успешного развития, в перспективе может быть использован для предварительного или углубленного анализа электрических и магнитных характеристик «горячих» планет Солнечной системы.

Возрастание объективного понимания магнитного поля Земли позволит в ближайшее время ученым мира приступить к разработке эффективного механизма по преодолению наступающей глобальной катастрофы, связанной с нарастающим планетарным потеплением.

Особо следует отметить, что рассмотренный механизм расчета термоэлектрических параметров Земли может оказаться весьма полезным для совершенствования модели магнитодинамо Земли.

Библиографический список

1. Rikitake, T. Electromagnetism and the Earth's interior / T. Rikitake. – Amsterdam – London – New York, Elsevier Publishing Company, 1966. – 308 p. – Текст : непосредственный.
2. An iterative study of time independent induction effects in magnetohydrodynamics / M. Bourgoin, P. Odier, J.-F. Pinton, Y. Ricard. – DOI 10.1063/1.1739401. – Текст : непосредственный // Physics of Fluids. – 2004. – Vol. 16, Issue 7. – P. 2529–2547.
3. Electromagnetic induction in non-uniform domains / A. Giesecke, C. Nore, F. Stefani [et al.]. – DOI 10.1080/03091929.2010.507202. – Текст : непосредственный // Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics. – 2010. – Vol. 104, Issue 5–6. – P. 505–529.
4. The Riga dynamo experiment / A. Gailitis, O. Lielausis, E. Platadis, G. Gerbeth, F. Stefani. – DOI 10.1023/A:1024851818821. – Текст : непосредственный // Surveys in Geophysics. – 2003. – Vol. 24. – P. 247–267.
5. Laboratory Dynamo Experiments / G. Verhille, N. Plihon, M. Bourgoin [et al.]. – DOI 10.1007/s11214-009-9546-1. – Текст : непосредственный // Space Science Reviews. – 2010. – Vol. 152, Issue 1–4. – P. 543–564.
6. Соколов, Д. Д. Динамо : на пути от астрофизических моделей к лабораторному эксперименту / Д. Д. Соколов, Р. А. Степанов, П. Г. Фрик. – DOI 10.3367/UFNr.0184.201403g.0313. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2014. – Т. 184, № 3. – С. 313–335.
7. Alfvén, H. Electric currents in cosmic plasma / H. Alfvén. – DOI 10.1029/RG015i003p00271. – Текст : непосредственный // Reviews of Geophysics. – 1977. – Vol. 15, Issue 3. – P. 271–284.
8. Зельдович, Я. Б. Гидромагнитное динамо как источник планетарного, солнечного и галактического магнетизма / Я. Б. Зельдович, А. А. Рузмайкин. – DOI 10.3367/UFNr.0152.198706c.0263. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 152, Вып. 6. – С. 263–284.
9. First principles calculations on the diffusivity and viscosity of liquid Fe-S at experimentally accessible conditions / L. Vocadlo, D. Alfe, G. D. Price, M. J. Gillan. – DOI 10.1016/s0031-9201(00)00151-5. – Текст : непосредственный // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2000. – Vol. 120, Issue 1–2. – P. 145–152.
10. Минеев, В. Н. Об измерении вязкости расплавов металлов при высоких давлениях и расчетах вязкости применительно к ядру Земли / В. Н. Минеев, А. И. Фунтиков. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 7. – С. 727–742.
11. Фунтиков, А. И. Об измерениях вязкости жидких железа и его соединений с серой при высоких давлениях и состоянии ядра Земли / А. И. Фунтиков. – Текст : непосредственный // Физика экстремальных состояний вещества – 2004 : [сборник] / Под редакцией В. Е. Фортова, В. П. Ефремова и др. – Черноголовка, 2004. – С. 18–19.
12. Бражкин, В. В. Универсальный рост вязкости металлических расплавов в мегабарном диапазоне давлений : стеклообразное состояние внутреннего ядра Земли / В. В. Бражкин, А. Г. Ляпин. – DOI 10.3367/ufnr.0170.200005c.0535. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170, № 5. – С. 535–551.
13. Смайли, Д. Е. Прямые наблюдения вязкости внешнего ядра Земли и экстраполяция измерений вязкости жидкого железа / Д. Е. Смайли, В. В. Бражкин, А. Палмер. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 1. – С. 91–105.
14. Бурмин, В. Ю. Скорость распространения продольных сейсмических волн в мантии Земли / В. Ю. Бурмин. – Текст : непосредственный // Физика земли. – 2004. – № 8. – С. 34–40.
15. Бурмин, В. Ю. Вязкость земного ядра по сейсмическим данным / В. Ю. Бурмин. – Текст : непосредственный // Доклады академии наук. – 2008. – Т. 418, № 6. – С. 825–828.
16. Пасынок, С. Л. Свободные колебания внутреннего ядра Земли для неравновесной модели Земли / С. Л. Пасынок. – Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, Астрономия. – 1997. – № 4. – С. 43–46.
17. Долгинов, А. З. О происхождении магнитных полей Земли и небесных тел / А. З. Долгинов. – DOI 10.3367/UFNr.0152.198706b.0231. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 152, Вып. 2. – С. 231–262.
18. Арсеньев, С. А. Теоретическое моделирование главного магнитного поля Земли и планет / С. А. Арсеньев. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 4–2. – С. 313–321.

19. Elsasser, W. M. On the origin of the Earth's magnetic field / W. M. Elsasser. – DOI 10.1103/PhysRev.55.489. – Текст : непосредственный // Physical Review. – 1939. – Vol. 55, Issue 5. – P. 489–498.
20. Vestine, E. H. The Earth's core / E. H. Vestine. – Текст : непосредственный // Trans. Am. geophys. union. – 1954. – Vol. 35. – P. 63–72.
21. Runcorn, S. K. The Earth's core / S. K. Runcorn. – DOI 10.1029/TR035i001p00049. – Текст : непосредственный // Transactions, American Geophysical Union. – 1954. – Vol. 35, Issue 1. – P. 49–63.
22. Dmitriev, A. N. A New Look On the Nature of the Earth's Magnetic Field / A. N. Dmitriev. – DOI 10.1088/1755-1315/44/2/022001. – Текст : непосредственный // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 44, Issue 2. – P. [1–5].
23. Дмитриев, А. Н. О возможной причине существования двух полюсов у природных поляризованных проводников / А. Н. Дмитриев. – Текст : непосредственный // Разведочная геофизика. – 1980. – Вып. 88. – С. 125–129.
24. Дмитриев, А. Н. Геолого-геофизические основы поисков электрически поляризованных объектов — нефтяных и рудных залежей (на примере Западной Сибири) / А. Н. Дмитриев. – Тюмень : Изд-во ТГУ. – 2007. – 226 с. – Текст : непосредственный.
25. Дмитриев, А. Н. Решение прямой и обратной задач на основе уточненной модели природы естественного электрического поля / А. Н. Дмитриев. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. № 6. – С. 797–812.
26. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – Москва : Наука, 1977. – 592 с. – Текст : непосредственный.
27. Савельев, И. В. Курс общей физики. Том II. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – Москва : Наука, 1970. – 336 с. – Текст : непосредственный.
28. Жарков, В. Н. Внутреннее строение Земли и планет / В. Н. Жарков. – Москва : Наука, 1983. – 416 с. – Текст : непосредственный.
29. Магницкий, В. А. Внутреннее строение и физика Земли / В. А. Магницкий. – Москва : Наука, 2006. – 389 с.
30. Кузнецов, В. В. Физика Земли / В. В. Кузнецов. – Новосибирск, 2011. – 842 с. – Текст : непосредственный.
31. Uffen, R. J. A method of estimating the melting point gradient in the Earth's mantle / R. J. Uffen. – DOI 10.1029/TR033i006p00893. – Текст : непосредственный // Transactions, American Geophysical Union. – 1952. – Vol. 33, Issue 6. – P. 893–896.
32. Tozer, D. C. The electrical properties of the Earth's interior / D. C. Tozer. – DOI 10.1016/0079-1946(59)90010-2. – Текст : непосредственный // Physics and Chemistry of the Earth. – 1959. – Vol. 3. – P. 414–436.
33. Melting of Iron at Earth's Inner Core Boundary Based on Fast X-ray Diffraction / S. Anzellini, A. Dewaele, M. Mezouar [et al.]. – DOI 10.1126/science.1233514. – Текст : непосредственный // Science. – 2013. – Vol. 340, Issue 6131. – P. 464–466.
34. Loper, D. E. Structure of the core and lower mantle / D. E. Loper. – DOI 10.1016/S0065-2687(08)60243-5. – Текст : непосредственный // Advances in Geophysics. – 1984. – Vol. 26. – P. 1–34.
35. Лифшиц, И. М. Электронная теория металлов / И. М. Лифшиц, М. Я. Азбель, М. И. Каганов. – Москва : Наука, 1971. – 416 с. – Текст : непосредственный.
36. Матвеев, А. Н. Электричество и магнетизм / А. Н. Матвеев. – Москва : Высшая школа, 1983. – 464 с. – Текст : непосредственный.
37. Тюшев, А. Н. Курс лекций по физике. Часть 5. Квантовая физика / А. Н. Тюшев. – Новосибирск : СГГА, 2011. – 167 с. – Текст : непосредственный.
38. Павлов, П. В. Физика твердого тела : учебник / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – Москва : Высшая школа, 2000. – 494 с. – Текст : непосредственный.
39. Журавлев, В. А. Лекции по квантовой теории металлов / В. А. Журавлев. – Москва : Институт компьютерных исследований, 2002. – 240 с. – Текст : непосредственный.
40. Кузнецов, В. В. Введение в физику горячей Земли / В. В. Кузнецов ; отв. ред. А. В. Николаев ; Российская академия наук, Дальневосточное отделение, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн. – Петропавловск-Камчатский : Изд-во Камчатского государственного ун-та им. Витуса Беринга, 2008. – 366 с. – Текст : непосредственный.
41. Бронштэйн, В. А. Планета Марс / В. А. Бронштэйн. – Москва : Наука, 1977. – 96 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Rikitake, T. (1966). *Electromagnetism and the Earth's interior*. Amsterdam - London - New York, Elsevier Publishing Company, 308 p. (In English).
2. Bourgoin, M., Odier, P., Pinton, J.-F., & Ricard, Y. (2004). An iterative study of time independent induction effects in magnetohydrodynamics. *Physics of Fluids*, 16(7), pp. 2529-2547. (In English). DOI: 10.1063/1.1739401
3. Giesecke, A., Nore, C., Stefani, F., Gerbeth, G., Léorat, J., Luddens, F., & Guermond, J. (2010). Electromagnetic induction in non-uniform domains. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 104(5-6), pp. 505-529. (In English). DOI: 10.1080/03091929.2010.507202
4. Gailitis, A., Lielausis, O., Platacis, E., Gerbeth, G., & Stefani, F. (2003). The Riga dynamo experiment. *Surveys in Geophysics*, 24, pp. 247-267. (In English). DOI: 10.1023/A:1024851818821
5. Verhille, G., Plihon, N., Bourgoin, M., Odier, P., & Pinton, J. F. (2010). Laboratory Dynamo Experiments. *Space Science Reviews*, 152(1-4), pp. 543-564. (In English). DOI: 10.1007/s11214-009-9546-1
6. Sokolov, D. D., Stepanov, R. A., & Frick, P. G. (2014). Dynamos: from an astrophysical model to laboratory experiments. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 184(3), pp. 292-311. (In English). DOI: 10.3367/UFNr.0184.201403g.0313
7. Alfven, H. (1977). Electric currents in cosmic plasma. *Reviews of Geophysics*, 15(3), pp. 271-284. (In English). DOI: 10.1029/RG015i003p0027
8. Zeldovich, Ya. B., & Ruzmaikin, A. A. (1987). The hydromagnetic dynamo as the source of planetary, solar, and galactic magnetism. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 152(6), pp. 263-284. (In Russian). DOI: 10.3367/ufnr.0152.198706c.0263
9. Vocado, L., Alfe, D., Price, G. D., & Gillan, M. J. (2000). First principles calculations on the diffusivity and viscosity of liquid Fe-S at experimentally accessible conditions // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 120(1-2), pp. 145-152. (In English). DOI: 10.1016/s0031-9201(00)00151-5
10. Mineev, V. N., & Funtikov, A. I. (2004). Viscosity measurements on metal melts at high pressure and viscosity calculations in relation to the Earth's core. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 174(7), pp. 727-742. (In English).
11. Funtikov, A. I. (2004). Ob izmereniyakh vyazkosti zhidkikh zheleza i ego soedineniy s seroy pri vysokikh davleniyakh i sostoyanii yadra Zemli. *Fizika ekstremal'nykh sostoyaniy veshchestva - 2004*. Chernogolovka, pp. 18-19. (In Russian).
12. Brazhkin, V. V., & Lyapin, A. G. (2000). Universal viscosity growth in metallic melts at megabar pressures: the vitreous state of the Earth's inner core. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 170(5), pp. 535-551. (In Russian). DOI: 10.3367/ufnr.0170.200005c.0535
13. Smylie, D. E., Brazhkin, V. V., & Palmer, A. (2009). Direct observations of the viscosity of Earth's outer core and extrapolation of measurements of the viscosity of liquid iron. *Physics-Uspekhi*, 52(1), pp. 79-92. (In English).
14. Burmin, V. Yu. (2004). P wave velocities in the mantle. *Physics of the Earth. Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 40(8), pp. 641-646. (In English).
15. Burmin, V. Yu. (2008). Vyazkost' zemnogo yadra po seismicheskim dannym. *Doklady akademii nauk*, 418(6), pp. 825-828. (In Russian).
16. Pasynok, S. L. (1997). Svobodnye kolebaniya vnutrennego yadra Zemli dlya neravnovesnoy modeli Zemli. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika, Astronomiya*, (4), pp. 43-46. (In Russian).
17. Dolginov, A. Z. (1987). Origin of the magnetic fields of the earth and celestial bodies. *Soviet Physics Uspekhi*, 30(6), pp. 475-493. (In English). DOI: 10.1070/PU1987v030n06ABEH002851
18. Arsen'ev, S. A. (2015). Teoreticheskoe modelirovanie glavnogo magnitnogo polya Zemli i planet. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, (4-2), pp. 313-321. (In Russian).
19. Elsasser, W. M. (1939). On the origin of the Earth's magnetic field. *Physical Review*, 55(5), pp. 489-498. (In English). DOI: 10.1103/PhysRev.55.489
20. Vestine, E. H. (1954). The Earth's core. *Trans. Am. geophys. union*, (35), pp. 63-72. (In English).
21. Runcorn, S. K. (1954). The Earth's core. *Transactions, American Geophysical Union*, 35(1), pp. 49-63. (In English). DOI: 10.1029/TR035i001p00049
22. Dmitriev, A. N. (2016). A New Look On the Nature of the Earth's Magnetic Field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 44(2), pp. [1-5]. (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/44/2/022001

23. Dmitriev, A. N. (1980). O vozmozhnoy prichine sushchestvovaniya dvukh polyusov u prirodnykh polarizovannykh provodnikov. *Razvedochnaya geofizika*, (88), pp. 125-129. (In Russian).
24. Dmitriev, A. N. (2007). *Geologo-geofizicheskie osnovy poiskov elektricheskikh polarizovannykh ob"ektov - neftyanykh i rudnykh zalezhey* (na primere Zapadnoy Sibiri). Tyumen, Tyumen State University Publ., 226 p. (In Russian).
25. Dmitriev, A. N. (2012). Forward and inverse self-potential modeling: a new approach. *Russian Geology and Geophysics*, 53(6), pp. 611-622. (In English).
26. Kalashnikov, S. G. (1977). *Elektrichestvo*. Moscow, Nauka Publ., 592 p. (In Russian).
27. Savel'ev, I. V. (1970). *Kurs obshchey fiziki. Tom II. Elektrichestvo i magnetizm. Volny. Optika*. Moscow, Nauka Publ., 336 p. (In Russian).
28. Zharkov, V. N. (1983). *Vnutrennee stroenie Zemli i planet* Moscow, Nauka Publ., 416 p. (In Russian).
29. Magnitskiy, V. A. (2006). *Vnutrennee stroenie i fizika Zemli*. Moscow, Nauka Publ., 389 p. (In Russian).
30. Kuznetsov, V. V. (2011). *Fizika Zemli*. Novosibirsk, 842 p. (In Russian).
31. Uffen, R. J. (1952). A method of estimating the melting point gradient in the Earth's mantle. *Transactions, American Geophysical Union*, 33(6), pp. 893-896. DOI: 10.1029/TR033i006p00893
32. Tozer, D. C. (1959). The electrical properties of the Earth's interior. *Physics and Chemistry of the Earth*, 3, pp. 414-436. (In English). DOI: 10.1016/0079-1946(59)90010-2
33. Anzellini, S., Dewaele, A., Mezouar, M., Loubeyre, P., & Morard, G. (2013). Melting of Iron at Earth's Inner Core Boundary Based on Fast X-ray Diffraction. *Science*, 340(6131), pp. 464-466. (In English). DOI: 10.1126/science.1233514
34. Loper, D. E. (1984). Structure of the core and lower mantle. *Advances in Geophysics*, 26, pp. 1-34. (In English). DOI: 10.1016/S0065-2687(08)60243-5
35. Lifshits, I. M., Azbel, M. Ya., & Kaganov, M. I. (1971). *Elektronnaya teoriya metallov*. Moscow, Nauka Publ., 416 p. (In Russian).
36. Matveev, A. N. (1983). *Elektrichestvo i magnetizm*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 464 p. (In Russian).
37. Tyushev, A. N. (2011). *Kurs lektsiy po fizike. Chast' 5. Kvantovaya fizika*. Novosibirsk, SGA Publ., 167 p. (In Russian).
38. Pavlov, P. V., & Khokhlov, A. F. (2000). *Fizika tverdogo tela*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 494 p.
39. Zhuravlev, V. A. (2002). *Lektsii po kvantovoy teorii metallov*. Moscow, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 240 p. (In Russian).
40. Kuznetsov, V. V. (2008). *Vvedenie v fiziku goryachey Zemli*. Petropavlovsk-Kamchatsky, 366 p. (In Russian).
41. Bronshtein, V. A. (1977). *Planeta Mars*. Moscow, Nauka Publ., 96 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Дмитриев Аркадий Николаевич, д. г.-м. н., профессор кафедры прикладной геофизики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: dmitriev38@inbox.ru

Пахаруков Юрий Вавилович, д. ф.-м. н., профессор кафедры физики, методов контроля и диагностики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Arkadiy N. Dmitriev, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor at the Department of Applied Geophysics, Industrial University of Tyumen, e-mail: dmitriev38@inbox.ru

Yury V. Pakharukov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Physics, Monitoring and Diagnostic Methods, Industrial University of Tyumen