

ПРИРОДА ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА ¹⁾

Уже давно была отброшена гипотеза, рассматривающая магнитное поле земли как поле постоянного магнита. Совершенно очевидно, что для этого предположения нельзя найти какого бы то ни было разумного физического объяснения.

Можно попытаться представить себе, что непосредственное влияние движения земли на движение электронов атомов является причиной существования магнитного поля земли. Однако этот эффект, во-первых, невелик, а во-вторых, не объясняет отклонения оси вращения от магнитной оси земли, а также вековые колебания земного поля.

Естественнее всего, приняв весьма распространенную гипотезу о том, что центральная часть земли состоит из металла, предположить, что температурные колебания внутри этого металлического ядра, вызванные конвекцией, создают термоэлектрические токи. Именно эти токи по мнению автора реферируемой статьи создают магнитное поле земли.

То, что результирующий магнитный момент системы этих токов не равен нулю, объясняется постоянным действием на конвекционное движение кориолисовой силы. Очевидно, что система земных токов обладает соответственной асимметрией (в симметричном случае не получилось бы в среднем постоянной циркуляции электричества около земной оси).

Известный вывод теории потенциала указывает на то, что земные токи, если они существуют, протекают внутри земли, а не на ее поверхности.

Можно было бы допустить, что земные токи являются токами гальваническими. Однако, имея в виду весьма медленное движение ионов при больших давлениях, а также еще ряд обстоятельств, можно показать, что гальванические токи в земле должны быть слишком слабыми, чтобы объяснить существование магнитного поля земли. Гипотеза о термоэлектрических токах приводит к токам надлежащей силы и,

¹⁾ W. M. Elsasser, Phys. Rev., 55, 489, 1939.

кроме того, находится в полном согласии с гипотезой о металличности ядра земли, весьма распространенной среди геофизиков.

Необходимо допустить, что металлическое ядро земли неоднородно. Только в этом случае возможно существование постоянного тока

$$I = -\sigma \operatorname{grad} \varphi - \operatorname{grad} A - B \operatorname{grad} T, \quad (1)$$

где σ — проводимость, φ — электростатический потенциал, T — температура, а A и B (так же как σ , φ и T) — функции координат.

Проводя расчет в сферических координатах, автор вычисляет магнитный момент земли

$$M = \int I_{\varphi} \cdot r \sin \vartheta \, dv,$$

раскладывая величины B и T в ряд по сферическим функциям. Анализ результирующей формулы показывает, что постоянный магнитный момент земные токи образуют лишь при одновременной неоднородности в материале земного ядра и распределении температуры.

Нельзя допустить, что неоднородность в распределении массы ядра земного шара перманентна. Теория Элизассера требует поэтому допущения о наличии внутри земного ядра конвекционных потоков жидкой фазы.

Целый ряд независимых фактов показывает, что во всяком случае не существует никаких указаний, противоречащих гипотезе жидкого состояния земного ядра. Граница земного ядра устанавливается хотя и не точно вполне объективными методами. Известно, что поперечные волны отражаются от границы земного ядра, напротив, продольные волны проходят через земное ядро с незаметным затуханием. Джеффрис из этих данных выводит заключение о том, что поведение земного ядра более характерно для жидкого тела, чем для твердого. Он же находит, что вязкость ядра не превышает $2 \cdot 10^{16}$ CGS единиц (вязкость земной коры $\sim 10^{22}$).

Допустив на основании приведенных рассуждений, что ядро земли находится в жидком состоянии, Элизассер рассматривает уравнение движения жидкости с внутренним трением

$$\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{v} \operatorname{grad}) \mathbf{v} = 2 [\mathbf{s}, \mathbf{v}] - \mu \rho^{-1} \Delta \mathbf{v} = \rho^{-1} \operatorname{grad} p \quad (2)$$

(\mathbf{v} — скорость, ρ — плотность, μ — вязкость и p — давление, \mathbf{s} — угловой момент земли).

Входящая в уравнение скорость есть по мнению Элизассера величина порядка $10^{-2} - 10^{-3}$ см/сек. К этой цифре можно притти, если считать, что за время заметного изменения магнитного поля земли (5 столетий) частица проходит расстояние, равное радиусу ядра земли ($\sim 10^8$ см).

Элизассер пользуется упрощенным уравнением (2), во-первых, полагая поток стационарным ($\mathbf{v} = 0$), во-вторых, отбрасывая величину $(\mathbf{v} \operatorname{grad}) \mathbf{v}$, малую по сравнению с членом $2 [\mathbf{s}, \mathbf{v}]$.

Причина движения лежит в изменении плотности; в свою очередь вариации плотности объясняются температурными колебаниями.

Элизассер вычисляет, что известное геофизикам количество радиоактивного вещества, содержащееся в земном шаре, достаточно для поддержания термических потоков в металлическом ядре.

Автор предполагает, что так же, как и в других случаях динамически нестабильных движений, движение массы земного ядра состоит в возникновении ряда вихрей неправильной формы.

Оценивая порядок величин, фигурирующих в написанном уравнении, Элизассер приходит к заключению о превосходстве силы Корнолиса над другими возможными динамическими эффектами.

Дальнейшей задачей автора статьи было показать, что движение, описываемое упрощенным гидродинамическим уравнением, приводит к асимметрии движения, необходимой, как мы упомянули в начале реферата, для создания магнитного момента земли, отличного от нуля.

Под действием кориолисовой силы, перпендикулярной к скорости движущейся частицы, среднее турбулентное движение может иметь место во всех трех направлениях. Автор показывает, что в каждом вихре (вне зависимости от его размеров и структуры) имеется среднее движение вперед в восточной части и среднее движение назад в западной части вихря. Иначе говоря, восточная часть вихря теплее, а западная холоднее окружающей среды. Это объясняет наблюдаемую асимметрию магнитного поля земли.

Асимметрические изменения термоэлектрической константы вызываются не только описанным выше движением массы ядра. Кроме этого, приходится допустить, что внутри земли не существует термодинамического равновесия между фазами. Эльзассер представляет себе подобное неравновесное состояние следующим образом: крупные частицы одной фазы смешаны с другой фазой, обладающей иной плотностью. В такой системе должен происходить процесс, аналогичный седиментации. Скорость этого процесса должна быть сравнима со скоростью термической конвекции. Подобная картина объясняет требуемое непостоянство коэффициента B уравнения (1).

На основе своей теории Эльзассер подсчитывает порядок величины плотности земных токов для вариаций температуры порядка 10^3 . Вычисленное им значение равно

$$j = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ А/см}^2.$$

Магнитный момент земли равен, как известно, $M = 8,2 \cdot 10^{25}$ CGSM.

Если считать, что земное ядро непрерывно и равномерно заполнено токами, то для создания момента $8,2 \cdot 10^{25}$ CGSM ядру при радиусе ядра $3,5 \cdot 10^8$ см плотность тока должна равняться

$$2 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2.$$

Эльзассер объясняет то обстоятельство, что последняя цифра примерно в 75 раз больше первой, кроме грубости вычисления, еще тем, что земные токи распределены не по всему ядру, а лишь в части его.

А. Кутайгородский, Москва