

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

**Механические и электрические потоки в планетах и звездах**В. И. Григорьев<sup>а</sup>, В. С. Ростовский<sup>а</sup>

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,  
кафедра квантовой теории и физики высоких энергий. 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.  
E-mail: <sup>а</sup>rost@hep.phys.msu.ru*

Эмпирические данные о широтной асимметрии геомагнитного поля используются для получения количественных оценок о западном географическом дрейфе.

PACS: 97.10.Ld.

*Ключевые слова:* планеты, звезды, струи, дрейф полюсов, баромагнетизм.

Статья поступила 19.04.2005, подписана в печать 04.03.2008.

Потоки вещества в недрах планет и звезд вызывают двоякий интерес. Во-первых, в связи с проблемами динамо-генерации (точнее, усиления) магнитных полей этих космических тел. Довольно долго — от появления работ Лармора [1] в начале XX в. до последней четверти этого века — подавляющее большинство гео- и астрофизиков считали динамо-механизм если даже не единственной, то во всяком случае доминирующей причиной наличия этих магнитных полей. Во-вторых, в связи с так называемым поляризационным механизмом. Еще до появления публикаций о «механизме динамо» появилась гипотеза [2, 3], согласно которой под влиянием гравитации происходит пространственное перераспределение зарядов в планетах и звездах. Благодаря вращению этих небесных тел вместе с перераспределившимися зарядами, т. е. вместе с объемными и поверхностными токами, и появляются магнитные поля.

Эта гипотеза Сазерленда была встречена скептически в основном из-за отсутствия как ее теоретического, так и экспериментального обоснования. Лишь к заключительной четверти XX в. было выяснено, что перераспределение зарядов вызывается не непосредственно действием гравитации, а неоднородностями давлений (так называемый бароэлектрический эффект, БЭ). Теоретическому описанию БЭ был посвящен ряд публикаций, нашедших отражение в монографиях [4, 5].

Одно из центральных положений теории БЭ касается объемной плотности электрических зарядов. Если при рассмотрении динамо-механизма принимается, что недра небесных тел являются электронейтральными, то учет БЭ приводит к выводу о наличии объемных и поверхностных зарядов в планетах и звездах, благодаря чему потоки вещества в этих телах с неизбежностью становятся и потоком зарядов, т. е. электрическими токами.

Эти токи и сами создают дополнительные баромагнитные поля, и испытывают воздействия магнитных полей. Таким образом возникает связь механических потоков с магнитными.

Говоря о потоках, нужно прежде всего провести их разделение по пространственным масштабам. Крупномасштабные потоки захватывают области порядка размеров всего небесного тела. Именно о них и пойдет речь ниже. Причины их возникновения связаны с движением планеты или звезды в целом. Мелкомасштабные потоки часто имеют флуктуационное происхождение, а также могут порождаться внешними воздействиями. В отличие от мелкомасштабных, крупномасштабные потоки более

стабильны, что делает их влияние более существенным и предсказуемым.

Одной из основных причин формирования крупномасштабных потоков в планетах и звездах является неоднородность температур: центральные области небесных тел значительно горячее периферических. Благодаря этому из-за теплового расширения возникают силы Архимеда, стремящиеся выносить вещество из внутренних областей к поверхности. Возникающие таким образом токи — конвекционные.

Кроме температурных градиентов есть и еще один источник глобального влияния на крупномасштабные потоки — это вращение небесного тела.

Благодаря этому вращению возникают силы Кориолиса, создающие помимо радиальных еще и перпендикулярные к оси вращения составляющие скоростей потоков.

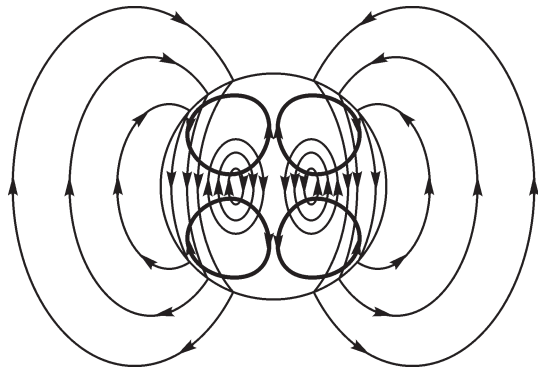
На потоки заряженного вещества в недрах небесных тел оказывает воздействие магнитное поле. Источником его возникновения, если не учитывать динамо-эффекты, являются потоки заряженного вещества.

Основной вклад в баромагнитное поле вносят участвующие в суточном вращении объемные и поверхностные заряды, обусловленные БЭ. Такое баромагнитное поле, порождаемое аксиальными потоками вещества и зарядов, можно именовать «главным».

Если бы в Земле, например, было только такое магнитное поле, то над поверхностью планеты оно было бы чисто дипольным, а магнитный момент был бы точно противоположен механическому по направлению. В действительности геомагнитное поле не является таким осесимметричным, даже если исключить из рассмотрения эффекты, связанные с локальными магнитными вариациями.

Конвекционные потоки зарождаются в центральной горячей области планеты. Если бы в ней все было сферически симметрично, то и потоки, расходящиеся от центра планеты к ее поверхности, были бы направлены радиально и сохраняли бы также центральную симметрию. Но этому препятствует имеющееся в недрах планеты главное баромагнитное поле, порождаемое вращением вместе с планетой объемных положительных и поверхностных отрицательных зарядов, наличие которых связано с БЭ.

Упрощенная схема распределения силовых линий главного баромагнитного поля приведена на рисунке. Эти линии в центральной области планеты проходят вдоль оси ее вращения. Поскольку движение электрических



Упрощенная схема распределения силовых линий главного баромагнитного поля (без учета вращения планеты)

зарядов происходит преимущественно вдоль, а не поперек линий магнитного поля, заряженные потоки внутрипланетного вещества устремляются от центральной горячей области не во всех радиальных направлениях, а преимущественно двумя струями — на север и на юг. По мере приближения к полярным областям, эти потоки все более расширяются, т.е. скорости частиц в них приобретают все большие перпендикулярные к оси составляющие.

Приближаясь к поверхности планеты, конвекционный поток распадается на струи, стекающие по приповерхностной области к экваториальной плоскости, где, остывая, вещество погружается вновь.

Если бы не вращение планеты, вся картина распределения потоков была бы осесимметричной. Но действие сил Кориолиса нарушает эту симметрию. В результате их действия картина распределения потоков приобретает важные новые черты, из которых особый интерес представляют направленные на запад составляющие объемных сил. Это вызывает как появление добавок к магнитному полю, так и возникновение регулярных (т.е. неслучайных) перемещений в приповерхностных слоях планеты.

Первый из этих двух эффектов должен вызывать появление некоторой широтной асимметрии распределения магнитного поля. Такая асимметрия действительно наблюдается: вертикальная компонента напряженности магнитного поля над северным магнитным полюсом Земли примерно на 0.1 Гс меньше, чем над южным (подробнее об этом — в [6])<sup>1</sup>. Второй из этих эффектов может иметь непосредственное отношение к западному дрейфу континентов.

Поток заряженного вещества, устремляющегося в западном направлении, порождает магнитное поле подобно кольцевому витку, расположенному в плоскости, перпендикулярной к оси вращения Земли. Напряженность магнитного поля, порождаемого этим витком на расстоянии  $z$  от центра кольца на его оси приближенно (если высота и толщина кольца достаточно малы по сравнению с радиусом планеты) имеет вертикальную компоненту  $H_z \approx \frac{2\pi a^2 I}{c(a^2+z^2)^{3/2}}$ , где  $a$  — радиус кольца. Этот радиус  $a \approx R \sin \theta \cos \theta$ . Действительно, кольцевой виток возникает под действием момента сил Кориолиса, пропорционального  $V_i \omega \sin \theta \cos \theta$ , где  $c$  — скорость света,  $V_i$  — величина скорости, расходящейся от полюса

$i$ -й струи вещества, а угол широты  $\theta$  отсчитывается от направления  $\omega$ . Если расходящиеся от полюсов по направлению к экватору струи распределены осесимметрично, т.е.  $V_i$  не зависят от  $i$ , то в качестве единственного параметра, определяющего расходящиеся от полюсов потоки, остается общая величина силы тока в возникающем конвекционном кольце  $I$ . Еще раз отметим, что кольцевой конвекционный виток в силу сказанного выше о механизме его образования должен быть расположен недалеко от поверхности планеты.

Напряженности магнитных полей над географическими полюсами Земли, как показывают измерения, неодинаковы. Над Северным полюсом вертикальная составляющая примерно на 0.1 Э меньше, чем над Южным. Это находит естественное количественное объяснение, если учесть добавки к напряженности главного магнитного поля, обусловленные теми кольцевыми потоками зарядов (и вещества), которые обсуждались выше в связи с вопросом о роли вращения планеты. Величина добавки к вертикальной компоненте напряженности главного магнитного поля порядка  $\delta H_z \approx \frac{2\pi I}{cR}$ , где  $R$  — радиус планеты, а  $I$  можно истолковать как среднее значение силы кольцевого тока, создаваемого в результате действия сил Кориолиса.

Это выражение приближенное, с точностью до множителей порядка единицы, определяемых положением и размерами кольца токов. Но оно позволяет получить оценку для оставшейся пока неизвестной величины  $I$  через  $\delta H_z$ :

$$I \approx \frac{\delta H_z c R}{2\pi}.$$

Множитель порядка единицы в этом выражении определяется уточненной геометрией кольца и его расположением.

Величину  $I$  можно связать с параметрами движения зарядов в кольце:

$$I \approx Ze n(r) U \delta s,$$

где  $Ze$  — заряд иона в той области планеты (обычно периферической), в которой располагается конвективный контур радиуса  $r$ ,  $n(r)$  — число ионов в единице объема этого кольцевого контура,  $U$  — средняя скорость их направленного движения по контуру, а  $\delta s$  — среднее значение сечения контура.

Отсюда для  $U$  получается выражение

$$U \approx \frac{cR\delta H_z}{2\pi Ze n(r)\delta s},$$

в которое можно подставить значение  $\delta H_z \approx 0.1$  — порядок величины разности между напряженностями вертикальных компонент магнитных полей над Южным и Северным полюсами Земли, для остальных величин можно принять значения:  $Ze \approx 10^{-8}$ ,  $n(r) \approx 10^{24}$ .

Тогда, если подставить для скорости направленного движения частиц в кольцевом конвективном потоке эмпирическое значение

$$U \approx 5 \text{ см/год},$$

то для сечения этого конвективного кольцевого потока получается оценка

$$\delta s \approx 2 \cdot 10^9 \text{ см}^2.$$

<sup>1</sup> Вертикальная составляющая напряженности главного магнитного поля Земли над Северным полюсом Земли направлена на юг, тогда как «кориолисова» добавка к магнитному полю, обязанная широтному потоку зарядов, имеет противоположное направление и вычитается из первой; над Южным полюсом эти две составляющих имеют одинаковое направление и потому складываются.

Таким образом, если толщина конвективного слоя — порядка километра, то его глубина — такого же порядка.

Конечно, полученные оценки — не более чем первое приближение, но основная цель заметки — обратить внимание на взаимосвязь между такими, казалось бы, различными явлениями, как широтная магнитная асимметрия геомагнитного поля, так и дрейф континентов.

### Список литературы

1. *Larmor J.* // Rev. Brit. Assoc. Adv. Sci. 1910. P. 159.

2. *Sutherland W.* // Terrastr. Magn. planet Sci. 1903. **2**. P. 249.

3. *Sutherland W.* // Atm. Electr. 1903. **8**. P. 49.

4. *Григорьев П.И., Григорьева Е.В.* Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М.: Изд-во МГУ, 1995.

5. *Григорьев В.И., Григорьева Е.В., Ростовский В.С.* Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М.: Физматлит, 2003.

6. *Григорьев В.И., Ростовский В.С.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2005. № 6. С. 3.

## Streams of matter and charges in planets and stars

**V. I. Grigor'ev, V. S. Rostovsky<sup>a</sup>**

*Department of Quantum Theory and High Energy Physics, Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>rost@hep.phys.msu.ru.*

Empirical data on latitude of geomagnetic field asymmetry are used for the quantitative estimation of the west geographical drift.

PACS: 97.10.Ld.

*Keywords:* planets, stars, running streams, drift of poles, baromagnetism.

*Received 19 April 2005.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2009)

### Сведения об авторах

1. Григорьев Владимир Иванович — д. ф.-м. н., профессор, профессор.

2. Ростовский Владимир Сергеевич — к. ф.-м. н., доцент, доцент; тел.: 939-26-96, e-mail: rost@hep.phys.msu.ru..