

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ ИОНОСФЕРНЫМИ ВЕТРАМИ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Ю. С. ВАРДАНЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении

(Поступила в редакцию 6 апреля 1997 г.)

В работе приводятся аналитические выражения для магнитных полей, возбуждаемых ионосферными ветрами в каждом из слоев околоземного космического пространства.

В работе [1] изучено возбуждение электромагнитных процессов ионосферными ветрами в околоземном космическом пространстве. В частности, рассчитаны электрические поля и токи в каждом из слоев околоземного космического пространства. Однако большой научный и практический интерес представляют и магнитные поля, создаваемые электрическими токами.

Как показано в [1, 2], граничные условия между слоями предлагаемой модели околоземного космического пространства в приближении бесконечно проводящей Земли составляют замкнутую систему алгебраических уравнений, которая однозначно определяет произвольные постоянные величины, входящие в выражения для электрических полей и токов, индуцируемых ионосферными ветрами. Однако при учете внутренних слоев Земли, обладающих разными физическими свойствами, замкнутую систему алгебраических уравнений для произвольных постоянных величин электрических полей и токов в околоземном космическом пространстве и индуцируемых ими электрических полей и токов внутри Земли составляют граничные условия между слоями всей системы—околоземного пространства и Земли.

Магнитные поля определяются из уравнения $\text{grad} h = \frac{4\pi}{c} j^*$, которое определяет h с точностью до градиента произвольной функции φ . Естественно, она должна удовлетворять уравнению Лапласа, поскольку $\text{div} h = 0$. Это позволяет выбором определенной функции φ удовлетворить всем граничным условиям перехода магнитного поля h из одного слоя в другой слой околоземного космического пространства. Поскольку в задаче исключаются поверхностные токи, то магнитные поля на границе между слоями должны быть непрерывны. Следовательно, значения произвольных постоянных величин, обеспечивающих непрерывность магнитных полей, могут быть определены решением соответствующей системы алгебраических уравнений, вытекающих из граничных условий.

* Так как задача в [1] является стационарной.

Названная система уравнений составляется путем прибавления к частному решению уравнения для магнитного поля градиента Фурье-компоненты функции φ , удовлетворяющей уравнению Лапласа, и требования непрерывности поля на границах раздела между слоями. Ясно, что непрерывность полей на границах предполагает непрерывность каждой из компонент поля $h_{x,y,z}$. Математически это представляется в следующем виде:

$h_{x,y,z}^M = h_{x,y,z}^{F_2}$ — на границе между магнитосферой и F_2 -слоем ионосферы;

$h_{x,y,z}^{F_2} = h_{x,y,z}^{F_1}$ — на границе между F_2 и F_1 слоями ионосферы;

$h_{x,y,z}^{F_1} = h_{x,y,z}^E$ — на границе между F_1 и E слоями ионосферы; (1)

$h_{x,y,z}^E = h_{x,y,z}^a$ — на границе между E -слоем ионосферы и атмосферой*;

$h_{x,y,z}^a = h_{x,y,z}^3$ — на границе между атмосферой и Землей.

Здесь индексы M , F_2 , F_1 , E , a и 3 относятся соответственно к магнитосфере, F_2 , F_1 слоям ионосферы, E — слою ионосферы, к атмосфере и Земле.

Решение уравнения Лапласа $\Delta\varphi=0$, определяющее функцию φ в геометрии работы [1], представляется в виде

$$\varphi = (A_1 e^{-k_1|z|} + A_2 e^{k_1|z|}) \sin k_1 x \cdot \sin k_2 y + (A_3 e^{-k_1|z|} + A_4 e^{k_1|z|}) \sin k_1 x \cdot \cos k_2 y + \\ + (A_5 e^{-k_1|z|} + A_6 e^{k_1|z|}) \cos k_1 x \cdot \sin k_2 y + (A_7 e^{-k_1|z|} + A_8 e^{k_1|z|}) \cos k_1 x \cdot \cos k_2 y,$$

где $A_1, \dots, A_8$ — неопределенные коэффициенты, вообще говоря, разные для каждого слоя.

Как видно из работы [1], частное решение для уравнения магнитного поля h по координатам x, y содержит соответственно в $h_{x,y}^{F_2, F_1, E}$ и $h_z^{F_2, F_1, E}$ слагаемые только с $\sin k_1 x \cdot \sin k_2 y$, $\cos k_1 x \cdot \cos k_2 y$, $\sin k_1 x \cdot \cos k_2 y$, $\cos k_1 x \cdot \sin k_2 y$. Тогда для удовлетворения граничных условий необходимо будет определить двадцать неизвестных постоянных A_i из алгебраических уравнений (1), которые составляют замкнутую систему относительно A_i .

С учетом вышеуказанного можно произвести унифицированную запись системы граничных уравнений (1). Она будет содержать уравнения, пропорциональные $\sin k_1 x \cdot \sin k_2 y$, $\cos k_1 x \cdot \cos k_2 y$, $\sin k_1 x \cdot \cos k_2 y$, $\cos k_1 x \cdot \sin k_2 y$, выражающие равенство магнитных полей на границах раздела.

Первые две группы уравнений, каждая из которых состоит из пяти уравнений, пропорциональных соответственно $\sin k_1 x \cdot \sin k_2 y$, $\cos k_1 x \cdot \cos k_2 y$, записываются в виде

$$(F_2(1,2), F_1, E, a) \mp k_1 [A_{5(3)}(F_2(1,2), F_1, E, a) e^{-k_1|z|} + A_{6(1)}(F_2(1,2), F_1, E, a) e^{k_1|z|}] = \\ = (M, F_1, E, a, 3) \mp k_1 [A_{5(3)}(M, F_1, E, a, 3) e^{-k_1|z|} + A_{3(4)}(M, F_1, E, a, 3) e^{k_1|z|}]. \quad (2)$$

* Здесь и далее термин «атмосфера», как и в [1], имеет смысл «нейтральной атмосферы».

Здесь $(F_2(1,2), F_1, E, a)$ и $A_{5(3), 6(4)}(F_2(1,2), F_1, E, a)$ в левой части уравнения — символическая запись значения частных решений уравнения для магнитного поля в соответствующих слоях ионосферы и атмосферы, обозначенных в скобках, на границах раздела и произвольные постоянные в тех же слоях. $(M, F_1, E, a, 3)$ и $A_{5(3), 6(4)}(M, F_1, E, a, 3)$ в правой части уравнения имеют тот же смысл, однако относятся соответственно к магнитосфере, к F_1 и E слоям ионосферы, к атмосфере и Земле. Причем левая часть уравнения соответствует правой части по порядку приводимых в скобках обозначений, где соответственно слоям меняется и значение в выражениях (2) $e^{\pm k|l|}$. Для принятой в работе [1] геометрии и в прямоугольной системе координат $|l|$ принимает значения: $(d-a-l-p)$ — на границе магнитосферы и F_2 -слоя ионосферы, $(d-a-l)$ — на границе F_2 и F_1 слоев ионосферы, $(d-a)$ — на границе F_1 и E слоев ионосферы, d — на границе E -слоя и атмосферы и $(d+f)$ — на границе атмосферы и Земли.

Здесь необходимо отметить, что уравнение (2) содержит как систему уравнений, пропорциональных $\sin k_1 x \cdot \sin k_2 y$ с верхним знаком в уравнении, так и систему уравнений, пропорциональных $\cos k_1 x \cdot \cos k_2 y$ с нижним знаком в уравнении и индексами в скобках при произвольных постоянных. Заметим, что уравнение (2) выражает граничное условие с бесконечно проводящей Землей, где магнитное поле равно нулю. В случае ситуации, близкой к реальной, когда магнитные поля в Земле отличны от нуля, необходимо будет решить систему уравнений, охватывающих и внутренние слои Земли, электродинамически связанные с околоземным пространством.

Две последние группы уравнений, каждая из которых состоит из пяти уравнений, пропорциональных $\sin k_1 x \cdot \sin k_2 y$ и $\cos k_1 x \cdot \cos k_2 y$, представляются в виде

$$(F_2(1,2), F_1, E, a) - \operatorname{sgn} z \cdot k [A_{3(5)}(F_2(1,2), F_1, E, a) e^{-k|l|} - A_{4(6)}(F_2(1,2), F_1, E, a) e^{k|l|}] =$$

$$= (M, F_1, E, a, 3) - \operatorname{sgn} z \cdot k [A_{3(5)}(M, F_1, E, a, 3) e^{-k|l|} - A_{4(6)}(M, F_1, E, a, 3) e^{k|l|}],$$

и объяснение этого уравнения полностью аналогично вышензложенному объяснению уравнения (2).

Таким образом, в работе показано, что система граничных условий полностью определяет магнитные поля, научно-практическая важность которых для физики процессов в околоземном пространстве и внутри Земли подробно изложена в работах [1, 2]. Отметим, что в нашей работе рассмотрены те широты, где можно пренебречь горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и магнитные силовые линии остаются замкнутыми. Причем ионосферные ветры считаются геострофическими, т.е. горизонтальными ($w_z = 0$), и геометрические размеры их малы по сравнению с радиусом Земли (что позволяет применить плоскую модель), но больше высоты однородной атмосферы [1]. Ясно, что по постановке задачи [1] и методу ее решения возбуж-

даемые ионосферными ветрами магнитные поля будут малыми возмущениями к основному магнитному полю Земли. Однако эти поля, высотные профили которых будут приведены в последующей работе, имеют важное научно-практическое значение, так как методы выделения различных типов возмущений хорошо изучены [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. С. Варданын. Известия АН АрмССР, Физика, 27, 163(1992).
2. Ю. С. Варданын. Известия НАН Армении, Физика, 30, 261(1995).
3. А. Нишида. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М., Мир, 1980.

MAGNETIC FIELDS EXCITED BY IONOSPHERIC WINDS IN THE NEAR-EARTH SPACE

YU. S. VARDANYAN

Analytic expressions are given for magnetic fields excited by ionospheric winds in every layer of the near-Earth space.

ԻՈՆՈՍՓԵՐԱՅԻՆ ՔԱՄԻՆԵՐՈՎ ԳՐԳՌՎԱԾ ՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ ԴԱՇՏԵՐԸ ՄԵՐԶԵՐԿՐՅԱ ՏԻԵԶԵՐԱԿԱՆ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆՈՒՄ

ՅՈՒ. Ս. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

Աշխատանքում բերված են մերձերկրյա տիեզերական տարածության մեջ իոնոսֆերային քամիներից գրգռած մագնիսական դաշտերի անալիտիկ արտահայտությունները: