

11. Райдер, Л. Квантовая теория поля. – М.: Мир, 1987.
12. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/>.

INVESTIGATION OF A NONLINEAR MODEL OF THE EARTH UPPER IONOSPHERE WITH REGARD TO DATA DERIVED FROM ARTIFICIAL SATELLITES

A. Rabinowitch, S. Abakumov

*Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science
20, Stromynka, Moscow, 107996, Russia*

Abstract. In the paper an investigation of the regions E and F of the Earth ionosphere is carried out. Since the well-known model of the standard atmosphere becomes unsatisfactory when altitudes are higher than 150 km, a new model of the upper ionosphere is proposed. In it strong electric fields in the Earth atmosphere are taken into account and described by means of the Yang-Mills nonlinear generalization with $SU(2)$ symmetry of the Maxwell equations. It is shown that the proposed nonlinear model is in good agreement with experimental data for the ionospheric regions E and F.

Key words: regions E and F of the Earth ionosphere, equilibrium state of the ionosphere, nonlinear model of the upper ionosphere, strong electric fields, density distribution in the upper ionosphere.

УДК 533.9.01

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ВЫСОТАХ ОТ 1000 ДО 2000 КМ

С.Ю. Абакумов

*Московский государственный университет приборостроения и информатики
107996, Москва, ул. Стромынка, 20*

Аннотация. В статье проводится моделирование атмосферы Земли в области высот от 1000 до 2000 км, учитывающее влияние сильного электрического поля в рамках нелинейной теории Янга-Миллса с $SU(2)$ симметрией. Применение такого подхода для слоев E и F ионосферы в области высот от 90 до 1000 км показало хорошее согласие с эмпирическими данными. В то же время модель стандартной атмосферы на высотах свыше 150 км дает существенные отклонения от эмпирических данных, увеличивающиеся с высотой.

Ключевые слова: сильные электрические поля, плотность атмосферы, нелинейная модель атмосферы Земли, теория Янга-Миллса.

В работе [5] на основании нелинейной математической модели, представляющей собой обобщение модели стандартной атмосферы [6], проведено исследование ионосферы Земли до высоты 1000 км.

Результаты, полученные по этой модели, находятся в согласии с эмпирическими данными, в то время как данные, полученные по стандартной модели, на высотах свыше 150 км становятся неудовлетворительными. Будем применять предложенную в [5]

модель для моделирования рассматриваемой области атмосферы на высотах от 1000 до 2000 км, описывающую ее равновесное состояние под действием внутреннего давления, силы тяжести и электрической силы. Она описывается уравнением:

$$\frac{dp}{dr} + g \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \rho - \Theta E = 0, \quad (1)$$

где $p = p(r)$ - давление в атмосфере на расстоянии r от центра Земли, r_0 - радиус Земли, $\rho = \rho(r)$ - плотность атмосферы в зависимости от радиуса r при заданной широте и долготе, g - ускорение свободного падения около поверхности Земли, $E = E(r)$ - напряженность электрического поля на расстоянии r от центра Земли и $\Theta = \Theta(r)$ - плотность заряда, которая может быть определена по формуле:

$$\Theta = \chi \rho, \quad (2)$$

где χ - коэффициент пропорциональности между плотностью заряда и плотностью массы.

Давление определяется из уравнения Клапейрона:

$$p = \frac{R_0 T}{\mu} \rho, \quad (3)$$

где R_0 - универсальная газовая постоянная, T - температура в градусах Кельвина и μ - молярная масса.

Исследования ионосферы показали, что она представляет собой квазинейтральную плазму, в которой число частиц заряженных отрицательно лишь примерно равно числу частиц заряженных положительно [2]. Благодаря действию проникающих космических лучей, ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, атмосферные газы ионизируются. Это приводит к тому, что на высоте порядка 1000 км концентрация заряженных частиц достигает значительной величины и с ростом высоты продолжает увеличиваться. Поэтому электрические поля в сильно ионизированных областях атмосферы Земли должны играть существенную роль.

Существуют как косвенные, так и прямые свидетельства, подтверждающие существование в атмосфере Земли значительных объемных зарядов и электрических полей. Ряд фактов, подтверждающих сказанное, приведен в статье выдающегося исследователя атмосферного электричества И.М. Имянитова [3].

Важно также отметить, что согласно результатам бортовых измерений, космические аппараты, движущиеся как на низких, так и на высоких околоземных орбитах, могут заряжаться до потенциалов порядка 1 – 10 кВ [1]. При размере космического аппарата порядка нескольких метров, отсюда находим, что внутри него напряженность электрического поля может достигать величин порядка нескольких кВ/м.

С другой стороны, космический аппарат должен заряжаться до тех пор, пока его собственное электрическое поле не станет равным по величине и противоположным по направлению внешнему электрическому полю около него. Поэтому, как отмечалось в работе [5], из результатов бортовых измерений в космических аппаратах следует, что электрическое поле в атмосфере может достигать величин порядка нескольких кВ/м.

Учитывая, что в рассматриваемой области скапливаются большие электрические заряды, будем применять, нелинейную модель электрического поля. Модель такого типа была предложена в работе [4] на основе точного стационарного сферически-симметричного решения уравнений Янга-Миллса с $SU(2)$ симметрией, которое затем было обобщено в работе [7] на нестационарный случай и подробно исследовано в монографии [8]. В найденном решении уравнений Янга-Миллса электрическое поле E на расстоянии r от центра заряженного сферического источника описывается формулой:

$$E = \frac{q_{\text{эфф}}(r)}{r^2}, \quad (4)$$

где $q_{\text{эфф}}(r)$ - эффективный заряд сферической области радиуса r , включающий не только заряды источника, но и заряженные кванты поля Янга-Миллса. Он определяется по формуле:

$$q_{\text{эфф}}(r) = K \sin\left(\frac{q(r)}{K}\right), \quad (5)$$

где $q(r)$ - заряд источника поля внутри сферической области радиуса r , и K - некоторая константа.

Принимая во внимание выражения (2), (3), (4) и (5), запишем уравнение (1) при $r_1 \leq r \leq r_2$, где r_1 и r_2 - нижняя и верхняя граница рассматриваемой области, в виде:

$$\frac{dp(r)}{dr} + g\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \rho(r) - \frac{\chi \rho(r) K}{r^2} \sin\left(\frac{4\pi\chi}{K} \int_{r_1}^r \rho(r) r^2 dr\right) = 0. \quad (6)$$

Полученное нелинейное интегро-дифференциальное уравнение (6) содержит два неизвестных параметра: константу K и коэффициент χ . Также для его решения необходимы эмпирические данные о температуре и молярной массе газов в рассматриваемой области.

Неизвестные параметры модели и эмпирические данные, необходимые для проведения расчетов, зависят от географических координат, даты и времени суток. Поэтому выберем конкретный случай, соответствующий 1 июня 2000 г., 12.0 час. (UTC), географической широте 55° и географической долготе 45° .

В работе [5] для рассматриваемого случая проведено исследование областей E и F ионосферы до высоты 1000 км. Принимая во внимание, что константа K не зависит от высоты, будем использовать для моделирования рассматриваемой области от 1000 до 2000 км найденное в этой работе значение $2.8 \cdot 10^{16}$ ед. СГСЭ. Результаты, полученные в ней, говорят о том, что область F ионосферы не заканчивается на высоте 1000 км. Следовательно, параметр χ будет также равен полученному в [5] значению 750 ед. СГСЭ, так как мы не покидаем данную область ионосферы.

Необходимые для расчетов значения температуры могут быть получены из эмпирической модели ионосферы IRI-2007 [9], позволяющей определить ее значения до высоты 2000 км. По данным этой модели температура, начиная с 500 км, не меняется с ростом высоты, вплоть до 2000 км.

Молярная масса смеси газов определялась как средневзвешенная сумма молярных масс ее компонент. Для вычисления молярной массы необходимо получить концентрации химических элементов, содержащихся в рассматриваемой области. В связи с тем, что надежных экспериментальных сведений о концентрациях химических элементов на высотах выше 1000 км нет, проведем их экстраполяцию. Учитывая, что температура в рассматриваемой области постоянна, предполагаем, что для концентраций химических элементов выполняются классические барометрические формулы. Это означает, что концентрации химических элементов изменяются с высотой по экспоненциальному закону.

На высоте 1000 км основными нейтральными компонентами являются атомы кислорода, водорода и гелия. С увеличением высоты быстро растет относительная концентрация легких газов. Поэтому экстраполяция осуществлялась только для этих трех газов.

При помощи разработанного комплекса программ было осуществлено численное решение нелинейного интегро-дифференциального уравнения (6). Оно, как показано в [5], приводится к нелинейному дифференциальному уравнению второго порядка, и для него был применен метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Проведенные расчеты позволили определить зависимость распределения плотности массы от высоты в рассматриваемой области атмосферы Земли по предложенной нелинейной модели. Полученные результаты представлены на рис 1.

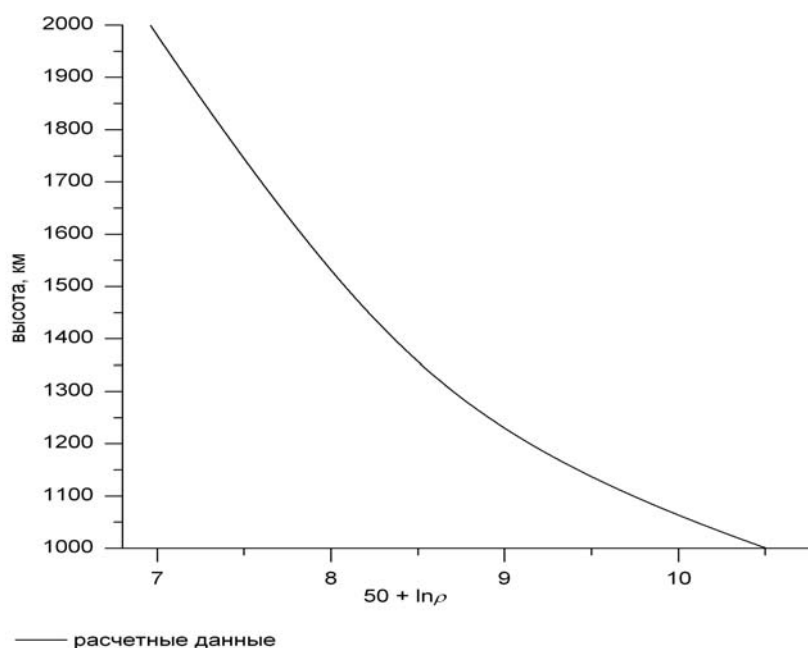


Рис. 1. Распределение плотности (г/см^3) в области высот от 1000 до 2000 км

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов, С.А., Колесников, Е.К. Некоторые вопросы динамики сильно заряженных

- тел в космическом пространстве // *Динамические процессы в газах и твердых телах и газах. Физическая механика*, вып. 4, под ред. Б.В. Филиппова. – Ленинград: ЛГУ, 1980, С. 168-180.
2. *Ерухимов, Л.М.* Ионосфера Земли как космическая плазменная лаборатория // *Соровский образовательный журнал*. – 1998. - № 4. - С. 71-77.
 3. *Имянитов, И.М.* Измерение электростатических полей в верхних слоях земной атмосферы // *Успехи физических наук*. – 1957. - Т. 63. - С. 267-282.
 4. *Рабинович, А.С.* О нелинейной электродинамике с уравнениями Янга-Миллса // *Вестник РУДН, сер. Физика*. – 2005. - № 13. - С. 68-77.
 5. *Рабинович А.С., Абакумов С.Ю.* Исследование нелинейной модели верхней ионосферы Земли с учетом данных космических аппаратов // *Вестник МГОУ. Сер. «Физика - Математика»*. – 2012. – № 2, С.
 6. *Седов, Л.И.* Механика сплошной среды, т. 1. – СПб.: Лань, 2004.
 7. *Rabinowitch, A.S.* Yang-Mills Fields of Nonstationary Spherical Objects with Big Charges // *Russian Journal of Mathematical Physics*. – 2008. - Vol. 15. - No. 3. - P. 389-394.
 8. *Rabinowitch, A.S.* Nonlinear Physical Fields and Anomalous Phenomena. – New York: Nova Science Publishers, 2009.
 9. Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO) Models and Related Algorithms [Электронный ресурс]. –URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/> (дата обращения: 25.08.2012).

NONLINEAR MODEL OF THE EARTH ATMOSPHERE AT THE ALTITUDES RANGED FROM 1000 TO 2000 KM

S. Abakumov

*Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science
20, Stromynka, Moscow, 107996, Russia*

Abstract. In the paper modeling of the Earth atmosphere at the altitudes ranged from 1000 to 2000 km is carried out, in which strong electric fields are taken into account and considered within the framework of the Yang-Mills theory with $SU(2)$ symmetry. The application of this method to the ionospheric layers E and F in the region of altitudes ranged from 90 to 1000 km showed good agreement with empirical data. At the same time the standard model of the Earth atmosphere at the altitudes higher than 150 km gives substantial deviations from empirical data, increasing with height.

Key words: strong electric fields, atmospheric density, nonlinear model of the Earth atmosphere, Yang-Mills theory.