

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

## О существовании глобальной электрической цепи в атмосфере Марса

А. А. Евтушенко<sup>1,а</sup>, Н. В. Ильин<sup>1</sup>, Ф. А. Кутерин<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН.

Россия, 603950, г. Нижний Новгород. ГСП - 120, ул. Ульянова, д. 46.

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского,  
механико-математический факультет, кафедра теории функций.

Россия, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

E-mail: <sup>а</sup> a\_evtushenko@inbox.ru

Статья поступила 19.09.2014, подписана в печать 10.11.2014.

Рассмотрены основные критерии формирования и поддержания глобальной электрической цепи (ГЭЦ) в атмосферах планет солнечной системы. Из первых принципов оценен профиль проводимости атмосферы и проанализирована возможность существования ГЭЦ на Марсе. Предложенная модель показывает отсутствие стационарной ГЭЦ на Марсе, при этом возможно протекание тока по цепи при работе мощного и протяженного генератора, например во время масштабной пылевой бури.

*Ключевые слова:* глобальная электрическая цепь, атмосферы планет, ионосферный потенциал.

УДК: 551.594. PACS: 96.12.Jt.

### Введение

Атмосферное электричество — одно из важных направлений исследований в современной физике, сохраняющее свою актуальность в течение многих лет. В последнее время интерес к проблемам атмосферного электричества значительно вырос. Не в последнюю очередь это связано с новыми экспериментальными данными, полученными с помощью космических аппаратов Cassini, Mars-Express, Venus-Express и др., прямо или косвенно позволяющими судить об электрических явлениях в атмосферах других планет Солнечной системы, а также с открытием и активным исследованием высотных разрядов в атмосфере Земли. Концепция глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [1, 2] на сегодняшний день служит основой для описания свойств и построения моделей атмосферного электричества Земли. Атмосферы всех планет Солнечной системы ионизируются галактическими космическими лучами (ГКЛ), и вполне логичным выглядит предположение, что концепция глобальной электрической цепи также применима и для других планет Солнечной системы.

До сих пор неизвестно, существуют ли атмосферные глобальные электрические цепи в атмосферах других планет. Общие критерии их существования изучались в работе [3], но анализ содержит ряд неточностей и не учитывает последних достижений в изучении генераторов глобальной цепи Земли. До настоящего времени разработаны лишь самые общие модели генерации электрического поля облака (см., например, для Юпитера [4]). Генерация полей и зарядов в процессе сальтации частиц при пылевых бурях на Марсе промоделирована впервые в работе [5], но анализ не учитывал возмущений проводимости и использовал общие выражения для параметризации зарядки частиц, что было недавно частично исправлено в новой модели [6]. Один из подходов к изучению существования ГЭЦ Марса рассмотрен в статье [7], авторы которой допускают существование ГЭЦ во время пылевых бурь.

Тривиальным условием существования ГЭЦ является наличие у планеты атмосферы, что позволяет выделить объекты, которые не удовлетворяют данному критерию: Меркурий и почти все спутники. В настоящей работе рассмотрены базовые критерии формирования и поддержания ГЭЦ в атмосферах планет, и подробно проанализирована возможность существования ГЭЦ на Марсе. Актуальность последнего выделена несколькими причинами: во-первых, фундаментальность задачи изучения Марса как одной из наиболее близко расположенных к Земле планет, во-вторых, на первую половину XXI века запланированы масштабные космические экспедиции на Марс, включая запланированный полёт человека на пилотируемом космическом корабле.

### 1. Атмосферное электричество на Марсе

Одним из наиболее важных вопросов остаётся вопрос об электрических процессах и разрядах в атмосфере Марса, тесно связанный с необходимостью правильно интерпретировать экспериментальные результаты. В работе [8] были представлены результаты измерений нетеплового микроволнового излучения, вызванного сильной пылевой бурей на Марсе, с помощью детектора, установленного в радиотелескопе сети DSN (Deep Space Network). Отделение нетеплового излучения от теплового оказалось возможным за счёт измерения высоких моментов электрического поля. Оказалось, что в спектре эксцесса нетеплового излучения присутствует несколько хорошо заметных пиков на частотах, кратных частотам шумановских резонансов для Марса. Авторы предполагают, что излучение было вызвано крупномасштабным электрическим разрядом, так как мелкомасштабные разряды происходят непрерывно, а нетепловое излучение исчезает через несколько минут после появления и возникает вновь по прошествии значительного времени.

В работе [9] предпринята попытка повторить результаты работы [8] с помощью мониторинга нетеплового

микроволнового излучения от Марса посредством системы АТА (the Allen Telescope Array). Но измерения проводились в то время года, когда на Марсе отсутствуют крупные пылевые бури, а присутствуют лишь мелкокомасштабные пылевые вихри, и получить результаты, близкие к результатам работы [8], не удалось: в получающихся спектрах не выделялись резонансы Шумана, а максимумы были отнесены авторами к влиянию узкополосных радиочастотных помех. Таким образом, авторы работы [9] пришли к заключению об отсутствии подтверждений наличия электрических разрядов на Марсе.

В работе [9] была сделана попытка объяснить результаты расхождений между наблюдениями, описанными в [8, 9]. Среди многочисленных факторов, влияющих на вид наблюдаемых спектров, отмечены различия во временном и спектральном разрешении двух детекторов и времён года, когда проводились измерения. Согласно оценкам [10], воздействие разряда в мощной пылевой буре на атмосферный резонатор может быть на 16 порядков интенсивнее, чем воздействие на него же разряда в мелкокомасштабном пылевом вихре. В ходе сравнительного анализа в статье [10] показаны принципиальные различия спектров эксцесса, полученных в статьях [8] и [9], на основании чего высказано предположение, что спектр из [9] в действительности соответствует некоторым антропогенным импульсно-модулированным телекоммуникационным сигналам, в то время как спектр, полученный в [8], на самом деле вызван пылевой бурей на Марсе.

## 2. Основные критерии существования ГЭЦ

В качестве основных условий существования ГЭЦ у атмосферы планеты можно выделить три составляющие (рис. 1):

- 1) проводящая поверхность и ионосфера;
- 2) наличие в атмосфере мобильных заряженных частиц (аэрозоль, пыль);
- 3) источники ЭДС (облака, мезомасштабные конвективные системы, песчаные и пылевые бури).

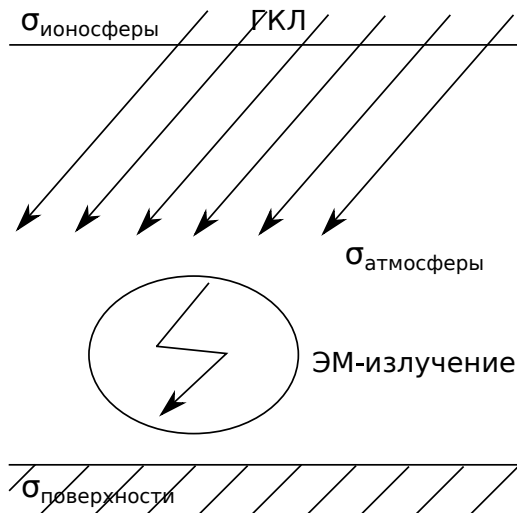


Рис. 1. Схематическое представление основных условий существования ГЭЦ

Одним из ключевых факторов устойчивого протекания тока от источника ЭДС до поверхности и ионосферы планеты является особый профиль проводимости атмосферы: проводимость ничтожно мала в пограничном слое, но резко (экспоненциально) возрастает с увеличением высоты [6]. Измерения, выполненные при радиозаходах на планеты космических аппаратов, показали, что Венера и Марс обладают ионосферами, однако менее плотными, чем земная, и «поджатыми» ближе к поверхности [11]. Ионосферы обнаружены также у спутников Ио [11] и Титан [12]. Таким образом, у этих объектов выполнен первый критерий существования ГЭЦ — наличие проводящей ионосферы.

Выделить и изучить отдельно второй и третий критерии не представляется возможным, поскольку стационарное решение для профиля проводимости сильно зависит от ионосферного потенциала, т.е. вклада сторонних источников. Поэтому в настоящей работе рассмотрены две независимые задачи:

1) определение тока в ионосферу от заданных сторонних источников [13];

2) определение вклада от нескомпенсированного заряда в областях генерации ЭДС в ионосферу [14, 15].

При этом первая задача требует задания профиля проводимости в атмосфере других планет в качестве параметра, но экспериментальные данные не дают исчерпывающей информации. В то же время профиль проводимости может быть рассчитан во второй задаче, но при этом требуется задание величины ионосферного потенциала, значение которого не известно.

## 3. Модель ионизации атмосферы Марса

Рассмотрим модель ионизации атмосферы Марса, считая, что воздействие галактических космических лучей (ГКЛ) приводит к появлению сравнительно долгоживущих положительных и отрицательных ионов — переносчиков тока. Модель описывается уравнениями

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = 2I(z) - \frac{\alpha}{2}(\Sigma^2 - P^2) + \mu(\nabla P \nabla \varphi) + \mu P \Delta \varphi, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \mu(\nabla \Sigma \nabla \varphi) + \mu \Sigma \Delta \varphi, \quad (2)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{e}{\epsilon_0} P, \quad (3)$$

где  $\Sigma = N_+ + N_-$ ,  $P = N_+ - N_-$ ,  $N_+$  и  $N_-$  — концентрации положительных и отрицательных частиц,  $E$  — электрическое поле,  $e$  — заряд электрона,  $\mu$  — подвижность аэроионов,  $\alpha$  — коэффициент рекомбинации,  $I$  — скорость ионизации,  $\varphi$  — электрический потенциал.

Стационарное решение для проводимости имеет вид

$$\sigma = e\mu\Sigma_{\text{stat}} = 2e\mu\sqrt{I/\alpha}. \quad (4)$$

Будем считать, что скорость ионообразования постоянна во всей толще атмосферы (для Марса это оправданно ввиду сильно разреженной атмосферы) и коэффициент рекомбинации  $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  (см., например, [16]). Подвижность аэроионов в зависимости от высоты определяется формулой (см., например, [17])

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{P_0}{P} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \left( \frac{T_0 + 120}{T + 120} \right). \quad (5)$$

Здесь  $\mu_0$  — подвижность аэроионов в приповерхностном слое, при давлении  $P_0$  и температуре  $T_0$ ,  $T$  и  $P$  —

температура и давление в атмосфере Марса в зависимости от высоты. Подставляя значения различных параметров в (4) и (5), можно получить стационарную проводимость [18, 19]. На рис. 2 показана зависимость проводимости атмосферы Марса от высоты. Как видно, проводимость достаточно быстро растет с высотой.

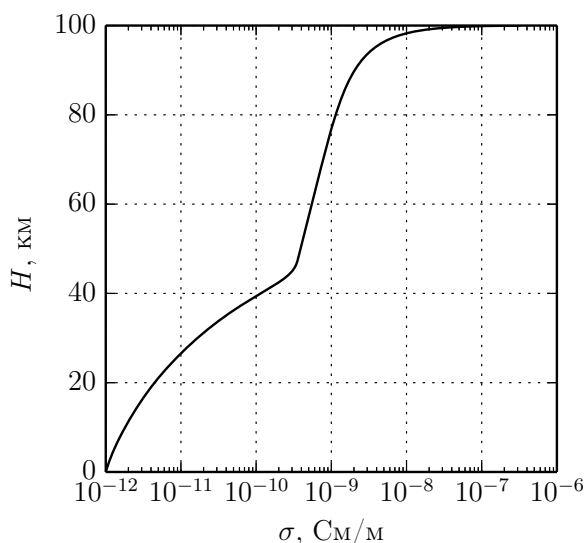


Рис. 2. Проводимость атмосферы Марса

#### 4. Вклад в ионосферный потенциал Марса от нескомпенсированного заряда у поверхности

Определение вклада от нескомпенсированного заряда в областях генерации ЭДС в ионосферный потенциал [14, 15] обладает рядом особенностей и преимуществ. Такая постановка задачи позволяет самосогласованным образом учесть влияние проводимости и дает возможность задать несимметрично распределенный источник, в котором заряды находятся не на одной вертикальной оси. Для атмосферы Марса это особенно актуально по двум причинам: во-первых, атмосфера Марса сильно разрежена, поэтому даже сравнительно небольшие возмущения плотности заряда вносят существенные поправки; во-вторых, на Марсе наблюдаются очень мощные и продолжительные пылевые бури, способные изменить профиль проводимости и тем самым повлиять на протекание тока от источника в ионосферу.

Рассмотрим двумерную модель, описываемую уравнениями (1)–(3). Начальные условия задаются из решения стационарной задачи  $\sigma(t=0) = 2\sqrt{I(z)}/\alpha$ , граничные условия на поверхности и ионосфере  $\varphi(z=0) = \varphi(z=z_{\max}) = 0$  — потенциалы поверхности и ионосферы одинаковы. Предполагается, что поверхность планеты и ионосфера идеально проводящие и замкнуты на бесконечности. Заметим, что такое условие отвечает решению стационарной задачи с электрическим полем равным нулю. По горизонтальной координате задано периодическое граничное условие.

Было проведено моделирование для двух начальных распределений плотности заряда:

1) две области заряда, разнесенные в пространстве так, что суммарный заряд равен нулю (типичный конвективный генератор);

2) одиночная область положительного заряда (формирующаяся, например, после молниевых разрядов).

Для первого случая, как показали расчеты, при разнесении областей зарядов на расстояние пять и более километров по вертикали от верхней области до ионосферы диффундирует заряд порядка 5 % от начального распределения. Иными словами, для создания условий формирования ГЭЦ должен существовать генератор (например, пылевая буря) высотой порядка 5 км или более. Отметим, что на Марсе зафиксированы пылевые бури продолжительностью несколько месяцев и наблюдается их сезонная периодичность. Кроме того, многочисленными наблюдениями установлено, что довольно часто вдали от фронта пылевой бури возникают изолированные торнадо (кружащийся вихрь, получивший название «пылевой дьявол»). Подобные марсианские торнадо часто достигают в высоту 8 км.

В случае одиночной области положительного заряда вклад составил порядка 7 %. Очевидно, что подобное распределение, формирующееся, как правило, после грозных разрядов, способно сформировать условия для устойчивого протекания тока в глобальной электрической цепи, однако грозная активность на Марсе не зафиксирована.

#### 5. Определение тока в ионосферу от заданных сторонних источников

С целью определения величины тока, текущего в ионосферу Марса, от заданных сторонних источников была использована модель и ее численная реализация из работы [20]. Решалась стационарная аксиально-симметричная модельная задача о влиянии стороннего источника тока на распределение электрического потенциала в атмосфере. Модель описывается уравнениями

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta \varphi + 4\pi \operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} \varphi) = 4\pi \operatorname{div} J^{\text{ext}},$$

$$\oint_{S_1} \left( \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{grad} \varphi + 4\pi \sigma \operatorname{grad} \varphi \right) dS = 4\pi \oint_{S_2} J^{\text{ext}} dS,$$

$$\varphi|_{S_1} = 0, \quad \varphi|_{S_2} = V_i, \quad \varphi|_{t=0} = \varphi_0.$$

Здесь  $J^{\text{ext}}$  — плотность стороннего тока,  $V_i$  — величина ионосферного потенциала, определяемая в задаче. Область, в которой искалось решение, представляла собой шаровой слой, ограниченный сферами  $S_1$  и  $S_2$  с радиусами, равными среднему радиусу планеты и среднему радиусу планеты, увеличенному на 100 км. В качестве значений проводимости был использован профиль, полученный в разд. 3. Плотность тока  $J^{\text{ext}}$  бралась постоянной отличной от нуля в области, ограниченной значениями высот  $r_1 = 5$  км,  $r_2 = 10$  км и широт  $\theta_1 = -\pi/2$  и  $\theta_2 = -\pi/2 + \pi/2000$ . Конкретная величина  $J^{\text{ext}}$  значения не имеет, поскольку задача линейна относительно этого параметра, а нас интересовало отношение плотности стороннего тока к плотности тока в ионосферу.

Результаты численного моделирования показали, что при заданной плотности стороннего тока  $J^{\text{ext}}$  плотность тока в ионосферу  $J_i$  оказалась весьма незначительной (рис. 3) и составила 2.5 % от значения исходного стороннего тока на высоте 30 км.

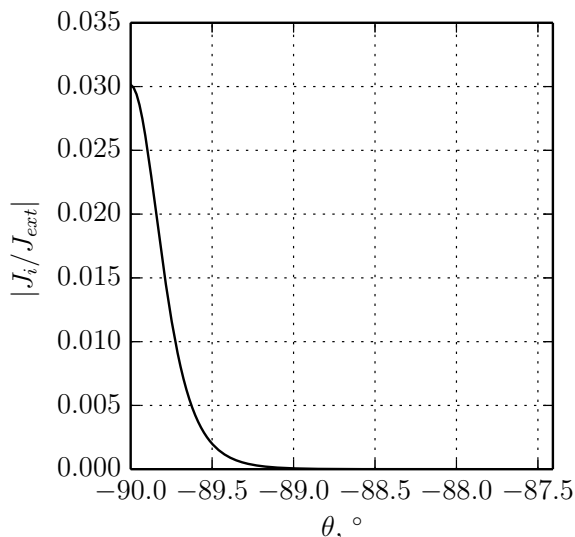


Рис. 3. Отношение плотности тока, текущего в ионосферу на высоте 30 км, нормированной на плотность стороннего тока

### Заключение

В работе рассчитан профиль проводимости атмосферы Марса. Оценен вклад в ионосферный потенциал от некомпенсированного заряда и определен ток в ионосферу от заданных сторонних источников. Как показывают расчеты, ток в ионосферу от сторонних источников при заданном профиле проводимости не достаточен для поддержания устойчивой стационарной ГЭЦ. При этом расчеты самосогласованной задачи (с учетом влияния на проводимость) для вклада в ионосферный потенциал от областей некомпенсированного заряда показывают, что глобальная электрическая цепь на Марсе может существовать во время работы очень мощного (сравнимого с мощностью всех земных источников) и протяженного (вертикальные размеры не менее 5 км) генератора ЭДС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОФН РАН

## On the existence of a global electric circuit in the atmosphere of Mars

A. A. Evtushenko<sup>1,a</sup>, N. V. Ilin<sup>1</sup>, F. A. Kuterin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod 603950, Russia.

<sup>2</sup> Department of Functional Analysis, Faculty of Mechanics and Mathematics, N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603950, Russia.

E-mail: <sup>a</sup> a\_evtushenko@inbox.ru.

The principal criteria for the formation and preservation of a global electric circuit (GEC) in the atmospheres of planets of the Solar System are analyzed. The conductivity profile of the Martian atmosphere is estimated from first principles and the possibility of existence of a GEC on Mars is considered. The proposed model suggests that no stationary GEC is present on Mars, but current may flow along a circuit when a high-power and extensive generator is in operation (for example, in the course of a dust storm).

**Keywords:** global electric circuit, planetary atmospheres, ionospheric potential.

PACS: 96.12.Jt.

Received 19 September 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2015).

### Сведения об авторах

1. Евтушенко Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-06-76, e-mail: a\_evtushenko@inbox.ru.

2. Ильин Николай Владимирович — мл. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-06-76, e-mail: nilyin@yandex.ru.

3. Кутерин Федор Алексеевич — вед. электроник; тел.: (831) 416-06-76, e-mail: xredor@gmail.com.

«Электродинамика атмосферы, радиофизические методы исследований атмосферных процессов» и гранта Правительства Российской Федерации (договор № 14.В25.31.0023).

### Список литературы

1. Wilson C.T.R. // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 1921, **221**. P. 73.
2. Mareev E.A., Anisimov S.V. // Proc. 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity. 2003. P. 797.
3. Aplin K.L. // Surv. Geophys. 2006. **27**. P. 63.
4. Melnik O., Parrot M. // Geophys. Res. 1998. **103**. P. 29107.
5. Kok J.F., Renno N.O. // Geophys. Res. Lett. 2009. **36**. P. L05202.
6. Мареев Е.А. // УФН. 2010, **180**, № 5. С. 527.
7. Farrell W.M., Desch M.D. // J. Geophys. Res.: Planets. 2001 **106**, N E4, P. 7591.
8. Ruf C., Renno N.O., Kok J.F. et al. // Geophys. Res. Lett. 2009. **36**. P. L13202.
9. Anderson M.M., Siemion A.P.V., Barott W.C. et al. // Astrophys. J. 2012. **744**. P. 15.
10. Renno N.O., Ruf C.S. // Astrophys. J. 2012. **761**. P. 88.
11. Маров М.Я., Колесниченко А.В. Введение в планетарную аэронию. М., 1987.
12. Grard R., Hamelin M., López-Moreno J.J. et al. // Planetary and Space Science. 2006. **54**. P. 1124.
13. Жидков А.А., Калинин А.В. // Вестник ННГУ. 2009. **6**. С. 150.
14. Mareev E.A., Yashunin S.A., Davydenko S.S. et al. // Geophys. Res. Lett. 2008. **35**, N 15. P. L15810.
15. Ильин Н.В., Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. и др. // Сб. тр. VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. СПб., 24–28 сентября 2012. С. 88.
16. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог, 1998.
17. Zhou L., Tinsley B. // J. Geophys. Res. 2007. **112**. P. D11203.
18. Криволицкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М., 2009.
19. Planetary atmospheric electricity / Ed. by F. Leblanc, K. L. Aplin, Y. Yair et al. Springer Science, 2008.
20. Жидков А.А., Калинин А.В. // Вестник ННГУ. 2012. **5**, № 2. С. 82.