

УДК 539.038

ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРИЛИВНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОТ ВЫСОТЫ

В. И. Григорьев, В. С. Ростовский

(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)

Исследуется зависимость напряженности поля ясной погоды от высоты на базе теории, объясняющей возникновение этого поля как результат приливного бароэлектрического эффекта — перераспределения зарядов в электронейтральной планете, испытывающей приливные воздействия.

Поле ясной погоды уже более двух веков вызывает активный интерес геофизиков. После открытия Лемонье [1], появившегося еще в середине XVIII в., было много публикаций, посвященных этому явлению.

Его первоначальное физическое истолкование выглядело как почти очевидное: Земле приписывался отрицательный электрический заряд, который, распределяясь по поверхности, порождает над Землей направленное вниз электрическое поле.

Однако такой прямолинейный подход немедленно сталкивается с рядом трудностей. Мало того, что значительное число наблюдаемых черт поля ясной погоды остается без объяснения, даже само существование заряда у Земли требует пояснения: ведь благодаря открытой еще Кулоном проводимости атмосферы этот заряд должен был бы за считанные минуты стечь с Земли, если бы не существовало механизмов его пополнения.

Обсуждались различные варианты таких механизмов (подробнее об этом см. обзор [2]), но окончательного решения проблемы они не дали.

Однако сама эта проблема утратила актуальность после того, как появилось принципиально новое физическое истолкование самого факта существования поля ясной погоды [3]. Для объяснения сути необходимо кратко напомнить, что собой представляет бароэлектрический эффект.

Известен ряд электрических явлений, связанных с наличием химических или физических неоднородностей в проводнике. Так, неоднородности температур в проводнике порождают термоэлектрические поля, химические неоднородности связаны с возникновением контактных разностей потенциалов. Неоднородности давлений также связаны с перераспределением зарядов в проводниках: электроны частично вытесняются из областей повышенных механических внутренних напряжений и как следствие такой перегруппировки зарядов создаются поля, которые именуют бароэлектрическими.

Как и другие равновесные электрические поля, возникающие в проводниках благодаря наличию в них не зависящих от времени перепадов физических или химических параметров, бароэлектрические поля являются безваттными, т. е. они не возбуждают токов (и вообще не вызывают передачи энергии зарядам).

Теоретические методы описания бароэлектрических полей достаточно подробно изложены в книге [3] и многочисленных журнальных публикациях [4]. В этой работе показано, что если учесть распределение давлений в сферически-симметричной планете, создаваемое действием только ее собственного гравитационного поля, то бароэлектрическое поле не выходит за пределы ее поверхности; но если сферическая симметрия нарушается, то поле проникает и во внешнюю область.

Одной из физических причин такого нарушения может явиться существование асимметричных внешних воздействий, одним из интересных примеров которых являются приливные силы.

Обратимся к рассмотрению конкретной модели: примем, что планета — это шар радиуса R , в недрах которого давление, порождаемое ее собственным тяготением, имеет центрально-симметричное распределение и убывает по мере приближения к поверхности планеты. Перераспределение зарядов приводит к тому, что центральная область планеты заряжается положительно, а поверхность — отрицательно, что порождает бароэлектрическое поле, направленное радиально. Его напряженность возрастает по мере удаления от центра планеты, достигает максимума у ее поверхности, а за пределами планеты, если считать, что она в целом электронейтральна, напряженность поля скачком обращается в нуль.

Положение изменяется, если учесть приливное воздействие на планету ее единственного спутника. Примем, что соотношение масс планеты M и спутника m таково, что движением первой можно пренебречь. Будем для простоты предполагать, что расстояние R_0 между центрами планеты и спутника существенно больше их радиусов и что период обращения спутника вокруг планеты значительно больше периода ее суточного обращения.

Как было впервые показано в статье [4], перераспределение давлений в планете, появляющееся из-за приливных воздействий, нарушающих сферическую симметрию, приводит к появлению бароэлектрических полей и над поверхностью планеты.

Их напряженность имеет радиальную E_r компоненту:

$$E_r = \frac{3K}{2r^4}(3 \cos^2 \theta - 1).$$

(Здесь использована сферическая система координат: r — расстояние от начала координат, выбран-

ного в центре планеты, до рассматриваемой точки, имеющей угловые координаты θ и ψ , где угол θ отсчитывается от направления прямой, соединяющей центры спутника и планеты.)

Множитель

$$K \approx 0.1 \frac{GMmR^3}{R_0^3}$$

выражается только через гравитационную постоянную G и известные астрономические постоянные.

Над поверхностью планеты вертикальную часть напряженности приливного поля E_r можно представить в виде суммы двух частей, одна из которых является переменной, т. е. зависит как от времени, так и от положения точки наблюдения, а другая постоянна. Эта постоянная часть направлена вниз и внешне похожа на то поле, которое получалось в модели равномерно заряженной по поверхности планеты, но это сходство можно назвать случайным.

Переменная часть пропорциональна $\cos 2\theta$, и поскольку благодаря вращению планеты угол θ меняется с периодом в одни сутки, эта переменная часть вертикальной составляющей приливного поля периодически изменяется с полусуточным периодом (известная двойная волна над континентами). Угол θ также зависит от координат точки наблюдения.

Значительно более медленными являются изменения, определяемые обращением спутника вокруг планеты. Так, для Земли существует период в один лунный месяц. Если учитывать и приливное воздействие Солнца, то находится объяснение и годичным изменениям поля ясной погоды. При минимальном расстоянии Земли от Солнца (когда в Северном полушарии зима) поле ясной погоды имеет максимум.

Горизонтальная компонента напряженности приливного поля

$$E_\theta = -\frac{3K}{r^4} \sin \theta \cos \theta.$$

Она не имеет постоянной части и в среднем за сутки равна нулю (это породило мнение, что она вообще отсутствует).

Подставляя численные значения необходимых параметров, находим, что вблизи поверхности Земли напряженность электрического поля, обусловленного приливым воздействием Луны, около 100 В/м (благодаря воздействию Солнца примерно на 10% меньше). Уместно заметить, что при получении этих оценок не использовались какие бы то ни было подгоночные параметры.

Перейдем теперь к обсуждению вопроса о зависимости напряженности геоэлектрического поля от высоты. При этом, как и выше, не будут учитываться эффекты, происходящие в атмосфере, хотя они, несомненно, влияют на геоэлектрическое поле*) [5].

*) Таким образом, настоящее рассуждение больше подходит для небесных тел, лишенных атмосферы, например для Луны. Отметим еще, что многократно обсуждавшийся вопрос о распределении зарядов над поверхностью планеты получает в обсуждаемой модели радикально новое освещение: объемная плотность заряда, определяемая уравнением Максвелла $\rho = (1/4\pi) \operatorname{div} \mathbf{E}$, оказывается попросту равной нулю.

Вопрос о приливых электрических полях ряда планет Солнечной системы и их спутников рассматривался в работе [6].

Первые достаточно полные и обильные экспериментальные данные, касающиеся зависимости напряженности от высоты, относились к высотам $h \leq R$ (заметим, что для больших высот предлагаемый здесь подход вообще неприменим). Ввиду малости отношения h/R можно рассматривать его как малый параметр и вести по нему разложение в ряд. Это разложение приводит к выражению для напряженности электрического поля (как горизонтальной, так и вертикальной ее компоненты), убывающему по мере увеличения h , обращаясь в нуль на некоторой высоте $h_0 \leq R$, а затем меняющему знак. В рамках рассматриваемой здесь заведомо упрощенной модели уточнение этой граничной высоты h_0 вряд ли целесообразно, так что предложенный выше вывод является не более чем качественным. Все же уместно отметить, что на базе этой модели для высоты h_0 получаются оценки, заниженные по сравнению со значениями, которые находятся из наблюдений.

Этому можно дать качественное объяснение, если учесть влияние на электрическое поле распределения ионов (что выше не учитывалось), появление которых в атмосфере обязано действию ряда факторов, в частности потокам космических лучей. Направленная вниз компонента напряженности надземного бароэлектрического поля вызывает некоторое перераспределение ионов. Общая тенденция такого перераспределения очевидна: происходит увеличение относительного количества положительных ионов на малых высотах. Благодаря этому граничная высота действительно должна увеличиваться, хотя оценить количественно это увеличение (к тому же локально-неоднородное) затруднительно.

Бароэлектрические поля, порождаемые приливым воздействием нескольких центров тяготения, аддитивны. Примером может служить, в частности, бароэлектрическое поле над поверхностью Земли, порождаемое приливым воздействием Солнца и Луны. Однако при вычислении напряженности этого поля нужно учитывать как различие расстояний этих тел от Земли, так и особенности изменения их взаимного расположения.

Литература

1. *Lemonnier I.G.* // Mem. Acad. Sci. 1752. 2. P. 233.
2. *Имянитов И.М., Шифрин К.С.* // УФН. 1962. **LXXVI**, № 4. С. 594.
3. *Григорьев В.И., Григорьева Е.В.* Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М., 1995.
4. *Григорьев В.И., Григорьева Е.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1991. **32**, № 5. С. 68.
5. *Имянитов И.М., Чубарина У.В.* Электричество свободной атмосферы. Л., 1965.
6. *Григорьев В.И., Григорьева Е.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 2. С. 50 (Moscow University Phys. Bull. 1999. N 2. P. 65).

Поступила в редакцию
29.09.03