

Результаты расчета составляющих энергетического баланса при таком определении $E_{\tau a}$ приведены на рис. 3 разными значками. В зачерненной области сосредоточено 69 точек, рассчитанных по данным различных авторов. Сплошной линией изображена зависимость

$$\frac{E_{\tau a}}{E_{\tau dr} + E_{\tau w}} = 1. \quad (11)$$

Как видно из рис. 3, при расчете по формуле (11) энергетический баланс на поверхности водоема хорошо выполняется. Некоторое расхождение с зависимостью (11) скорее всего обусловлено тем, что не учитывались потери на вязкое трение.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-05-64547), Федеральной целевой программы (ФЦП) «Интеграция» (грант 2.1-304) и подпрограммы ФЦП «Комплексные исследования океанов и морей Арктики и Антарктики».

Литература

1. Сперанская А.А. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1984.
2. Лейкин И.А., Показеев К.В., Розенберг А.Д. // Изв. АН СССР, ФАО. 1984. **20**, №4. С. 297.
3. Кононкова Г.Е., Никитина Е.А., Поборчая Л.В., Сперанская А.А. // Там же. 1969. **5**, № 5. С. 504.

4. Барзев С.Г. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1992.
5. Lin I.T., Hak M.G. // J. Geophys. Res. 1984. **89**. P. 627.
6. Shemdin O.H. // J. Phys. Oceanogr. 1972. **2**. P. 411.
7. Wu J. // J. Fluid Mech. 1968. **34**. P. 91.
8. Hsu C.T., Wu H.Y., Hsu E.Y., Street R.L. // J. Phys. Oceanogr. 1982. **12**. P. 929.
9. Доброклонский С.В., Лесников Б.М. // Изв. АН СССР, ФАО. 1962. **8**, № 11. С. 1177.
10. Доброклонский С.В., Лесников Б.М. // Там же. 1975. **11**, № 9. С. 942.
11. Лесников Б.М. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1975.
12. Bye I.A.T. // Limnology and Oceanogr. 1965. **10**. P. 451.
13. Кононкова Г.Е., Поборчая Л.В. // Изв. АН СССР, ФАО. 1974. **10**, № 5. С. 552.
14. Phillips O.M., Banner M.L. // J. Fluid Mech. 1974. **66**. P. 625.
15. Wu J. // Tellus. 1978. **30**, No. 1. P. 93.
16. Показеев К.В., Воронин Л.М. // Изв. АН СССР, ФАО. 1982. **18**, № 3. С. 889.
17. Kawai S. // J. Fluid Mech. 1979. **93**. P. 667.
18. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л., 1970.
19. Plant W.I., Wright I.W. // J. Fluid Mech. 1977. **82**. P. 767.

Поступила в редакцию
13.05.97

УДК 539.038

ПРИЛИВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

В. И. Григорьев, В. С. Ростовский

(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)

Показано, что истолкование геоэлектрического поля как результата бароэлектрического перераспределения зарядов в Земле, вызываемого приливными воздействиями, позволяет объяснить различие временного хода поля ясной погоды над континентами и над океанами.

После того как Лемонье [1] обнаружил, что над поверхностью Земли в ясную, безоблачную погоду имеется электрическое поле, возник целый ряд проблем: каково это поле, каковы физические причины его возникновения, вариаций и т.д. Эти вопросы освещены в ряде книг и статей (см., напр., [2–4]).

Почти все авторы признавали, что причиной возникновения поля ясной погоды является наличие у Земли отрицательного электрического заряда; но каково его происхождение и, главное, каков механизм его регенерации (без которой, как было уже давно понято, Земля из-за проводимости воздуха, открытой еще Кулоном, должна была бы «разрядиться» примерно за 10 минут), — оставалось, мягко говоря, не вполне понятно. Но сравнительно недавно было выдвинуто новое объяснение существования поля ясной погоды и его основных свойств.

В ряде работ [5–8] было показано, что для истолкования поля ясной погоды вовсе не обязательно приписывать Земле электрический заряд. В этих

работах рассматривалась модель Земли как проводящего незаряженного шара, в котором из-за перепадов давлений происходит перераспределение зарядов (бароэлектрический эффект). Если модель планеты сферически симметрична (это касается и распределения давлений в ней), то бароэлектрическое поле не проникает во внешнюю область. Если же эта симметрия нарушена, бароэлектрическое поле возникает и в области над поверхностью планеты. В числе причин таких нарушений особое значение имеют испытываемые ею приливные воздействия.

В этих работах рассматривался простейший вариант выбора модели: планета — химически однородный электронейтральный проводящий шар радиуса R и массы M , на который оказывает приливное действие лишь единственный спутник массы m ; расстояние между центрами спутника и планеты $R_0 \gg R$. Тогда, как показано в процитированных выше работах, вертикальная и горизонтальная компоненты напряженности «приливногo» поля не-

посредственно над поверхностью планеты соответственно имеют вид

$$E_r = K \frac{GMm}{R_0^3 R} (3 \cos^2 \Theta - 1); \quad E_\Theta = K \frac{GMm}{R_0^3 R} \sin 2\Theta. \quad (1)$$

Здесь G — гравитационная постоянная, а Θ — угол между векторами $\mathbf{n}$ и $\mathbf{r}$, где $\mathbf{n}$ направлен от центра спутника к центру планеты, а $\mathbf{r}$ — от центра планеты к точке наблюдения на ее поверхности; что касается множителя K (нужно заметить, что он выражается через такую не очень надежно известную величину, как среднее значение упругого модуля вещества планеты, что, естественно, отражается и на точности определения K), то для Земли этот множитель порядка 10^{-7} (в единицах СГСЕ).

Порождаемое приливными воздействиями электрическое поле над поверхностью Земли является переменным: Θ и R_0 в (1) зависят от времени. Наиболее быстрые изменения определяются зависимостью от Θ и связаны с суточным вращением Земли. Если ради простоты учитывать только воздействие Луны (а оно хотя и незначительное, но превышает солнечное), то в точке с широтой α (в отличие от того, как то принято в географии, α отсчитывается не от плоскости экватора, а от полярной оси) и долготой ψ (ее удобно определять так, чтобы при $t = 0$ вектор $\mathbf{n}$ лежал в плоскости $\psi = 0$) для $\cos \Theta$ получается выражение

$$\cos \Theta = \sin \Theta_0 \sin \alpha \cos(\omega t + \psi) + \cos \Theta_0 \cos \alpha. \quad (2)$$

Здесь Θ_0 — угол между направлением вектора угловой скорости, с которой совершается суточное вращение планеты, и вектором $\mathbf{n}$.

Изменения напряженности «приливного» электрического поля над поверхностью Земли вызываются также и тем, что изменяются расстояния от нее до основных источников приливных воздействий — Луны и Солнца; однако эти изменения, значительно более медленные, чем суточные, и существенно меньшие по масштабам, мы здесь учитывать не будем.

Благодаря бароэлектрическому эффекту поверхностные заряды, порождаемые приливными воздействиями, распределяются по поверхности планеты неравномерно. Их плотность определяется скачком радиальной составляющей напряженности электрического поля на поверхности планеты:

$$\sigma(\alpha, \psi) = \frac{1}{4\pi} \{E_r(R+0) - E_r(R-0)\}.$$

Поскольку, как показано в [8], для «приливной» части напряженности электрического поля $E_r(R-0) = 0$, то для «приливной» части поверхностной плотности зарядов при учете (1) получается выражение

$$\sigma(\alpha, \psi) = K \frac{GMm}{4\pi R_0^3 R} (3 \cos^2 \Theta - 1), \quad (3)$$

где $\cos \Theta$ дается выражением (2).

Полный поверхностный заряд (так же, как и объемный) равен нулю.

Такова картина «приливного» бароэлектрического поля в той простейшей модели планеты, которая была принята выше. Но в действительности реальная картина во многом иная. Ее хорошо описывают приводимые ниже цитаты.

«Результаты измерения суточных вариаций градиента потенциала в хорошую погоду существенно отличаются друг от друга в разных частях земного шара... Над океанами, в полярных областях и в некоторых континентальных областях, расположенных далеко от источников загрязнений, наблюдается простая волна с максимумом градиента потенциала, одновременным для всего земного шара.

На большинстве наземных станций время максимумов и минимумов градиента потенциала зависит от местного времени... Во многих случаях имеются двойные колебания градиента потенциала... Амплитуды суточных вариаций часто составляют более 50% от среднего значения» [2, с. 130–131].

«Над океаном суточные колебания имеют как зимой, так и летом характер простой волны с одним максимумом и одним минимумом, причем фаза этой волны оказывается одинаковой для всего земного шара» [3, с. 148].

«1. Суточный ход напряженности поля над континентами имеет вид двойной волны. Величина максимумов и минимумов поля и его среднее значение различны для разных станций.

2. Суточный ход напряженности поля над океанами и полярными областями имеет вид одинарной волны, причем изменения поля в разных точках происходят синхронно, по единому универсальному времени с относительно постоянными амплитудами и средними значениями.

Над океанами, например, среднее значение напряженности поля составляет около 113 В/м, а амплитуда изменений — около 17% от среднего» [4, с. 596].

Приведенные цитаты подчеркивают два основных положения:

1) поле ясной погоды над океанами и над континентами меняется по-разному: над океанами — «одинарная волна», тогда как над континентами — «двойная»;

2) изменение электрического поля над океанами происходит одновременно во всех географических точках, тогда как над континентами — не одновременно («зависит от местного времени»).

Эти факты, насколько нам известно, еще не получили объяснения. Попытаемся ликвидировать этот пробел.

Наша модель рассматривала Землю как сферически симметричный проводящий шар. Но поверхность планеты состоит из твердых материков и жидких океанов. Рассмотрим, какие изменения в образованной выше картине привносит учет океанов. Покажем, что простейшая модель, учитывающая несферичность свойств поверхности, способна отразить наиболее существенные черты физического процесса.

Пусть теперь океаном покрыта лишь половина поверхности планеты ($0 \leq \alpha \leq \pi$; $0 \leq \psi \leq \pi$). Как это повлияет на бароэлектрическое поле над планетой?

Объемная плотность приливной силы (если опять ограничиться для простоты учетом лишь одного источника приливного воздействия) имеет следующий вид:

$$\mathbf{f} = Gm\tau \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{nr}) - \mathbf{r}}{R_0^3},$$

где τ — механическая плотность вещества планеты в точке $\mathbf{r}$. Эта плотность приливной силы имеет горизонтальную составляющую, которая непосредственно над поверхностью планеты может быть записана в виде

$$f^{\text{hor}} = -3 \sin \Theta \cos \Theta / R_0^2.$$

Под действием этой горизонтальной силы создаются горизонтальные потоки жидкости. Хотя из-за зависимости Θ от времени сила f^{hor} является переменной, эти изменения происходят довольно медленно (с полусуточным периодом), так что возникающие механические потоки жидкости успевают привести к тому, что горизонтальные градиенты давлений исчезают. К тому же из-за имевшегося до установления динамического равновесия горизонтального бароэлектрического поля возникают и ионные электрические токи, что также приводит к ослаблению, а вскоре затем и к исчезновению горизонтальной компоненты напряженности бароэлектрического поля. Остающаяся же вертикальная компонента (при нулевой горизонтальной!) приводит к тому, что заряды распределяются по поверхности океана равномерно, так что напряженность электрического поля над всеми участками океана оказывается одинаковой.

Одинаковой, но не постоянной! Дело в том, что переменной является плотность поверхностных зарядов покрытой океанами части планеты. Поясним это.

Общий заряд планеты, напомним, принят равным нулю; поэтому полный заряд на поверхности океанов по модулю равен, а по знаку противоположен заряду на поверхности континентов. Поверхностную плотность зарядов на континентах можно по-прежнему определять по формуле (3), поскольку распределение приливных давлений внутри континентов можно считать слабо зависящим от наличия океанов. Полный заряд на поверхности континента в обсуждаемой модели равен

$$Q = R^2 \int_0^\pi \sin \alpha \, d\alpha \int_0^\pi d\psi \, \sigma(\alpha, \psi).$$

Подставляя выражение (3) для $\sigma(\alpha, \psi)$, убеждаемся, что Q пропорционально $\sin 2\Theta_0 \sin \omega t$.

Порождаемое равномерно распределенными по поверхности зарядами поле над океанами получается

имеющим только вертикальную составляющую (приближенно равную $-Q/4\pi R^2$), синхронно изменяющуюся во всех точках с частотой ω , — то, что часто именуется «простой волной». Над континентами же, как видно из (1), вертикальная составляющая напряженности «приливного» поля имеет как постоянную часть, не зависящую ни от времени, ни от координат точки наблюдения и направленную вниз, так и переменные части, меняющиеся с частотами ω и 2ω («простая» и «двойная волна»); их амплитуды зависят от положения точек наблюдения.

Отметим, однако, что полное исчезновение «двойной волны» над поверхностями океанов связано с выбранной выше географией модели, при ином выборе подавление полусуточных колебаний получается неполным.

Таким образом, при всей упрощенности выбранной нами модели оказывается возможным качественно описать наблюдаемые черты поля ясной погоды и различия между ними над континентами и над океанами. Как уже отмечалось выше, ранее все это объяснений не получало.

Отметим в заключение, что наличие корреляций между изменениями поля ясной погоды и грозовой активностью вряд ли можно считать доказательством «грозовой» природы регенерации заряда Земли (в нашем рассмотрении, напомним, этот заряд нулевой); скорее наоборот, изменение грозовой активности следует рассматривать не как причину, а как следствие вариаций геоэлектрического поля. Конечно, при этом и процессы в атмосфере оказывают влияние на геоэлектрическое поле. Заметим, однако, что приливные электрические поля должны быть и над поверхностью небесных тел, лишенных атмосферы. Так, по теоретическим оценкам, напряженность поля над поверхностью Луны достигает в некоторых участках значений на порядок больших, чем на Земле.

Литература

1. Lemonnier L.G. // Mem. Acad. Sci. 1752. 2. P. 233.
2. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л., 1974.
3. Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. Л.; М., 1949.
4. Имянитов М.И., Шифрин К.С. // УФН. 1962. 76, №4. С. 593.
5. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1991. № 5. С. 68 (Moscow University Phys. Bull. 1991. No. 5. P. 66).
6. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. // Там же. 1995. № 1. С. 61 (Ibid. 1995. No. 1. P. 56).
7. Григорьев В.И., Григорьева Е.В., Ростовский В.С. // Прикл. физика. 1995. № 3–4. С. 154.
8. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М., 1995.

Поступила в редакцию
03.06.98