

ОТКЛИК НАЗЕМНОЙ АНТЕННЫ НА ВАРИАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА ИОНОСФЕРЫ

Для изучения короткопериодных глобальных вариаций атмосферного электричества предлагалось регистрировать плотности максвелловского вертикального тока в двух удаленных друг от друга местах, используя для этого длинные атмосферно-электрические антенны [1]. В соответствующем эксперименте [2] были получены записи, в которых выделяются синхронные вариации, однако в некоторых записях вариации сигнала одной антенны на десятки секунды сдвинуты по времени от таких же вариаций сигнала другой антенны. Последний результат остался необъясненным. Для получения ясности надо, с одной стороны, повторить эксперимент при уверенности в отсутствии технических ошибок синхронизации наблюдений, а с другой стороны, тщательно проанализировать сам метод измерения относительно возможных эффектов, приводящих к сдвигу сигналов.

Для выявления основных закономерностей передачи глобальных вариаций атмосферного электричества от ионосферы к нижним слоям атмосферы и наземным антеннам используется упрощенная математическая модель динамики электрического поля в локально-однородной атмосфере. За основу принята классическая модель Вильсона. Предполагается, что:

- 1) потенциал земной поверхности нулевой и ионосфера эквипотенциальна,
- 2) в области с размерами порядка высоты ионосферы атмосфера горизонтально однородна,
- 3) отсутствует вертикальный механический перенос зарядов,
- 4) отсутствует электродный эффект у поверхности Земли,
- 5) собственный переходный процесс измерительной антенны совпадает с переходным процессом некоторого простого RC-контура,
- 6) удельное сопротивление воздуха не меняется со временем.

В численных примерах дополнительно принимается, что удельное сопротивление воздуха r зависит от высоты над уровнем моря h , согласно трехчленной модели Швейдлера—Гиша:

$$r(h) = \sum_{i=1}^3 G_i e^{-h/H_i}. \quad (1)$$

Значения параметров G_i и H_i зависят от локальных условий. Стандартное распределение сопротивления вдоль вертикального столбца определяется следующими значениями параметров:

$$G_1 = 50 \text{ тОм} \cdot \text{м}, \quad G_2 = 20 \text{ тОм} \cdot \text{м}, \quad G_3 = 2 \text{ тОм} \cdot \text{м},$$

$$H_1 = 0,5 \text{ км}, \quad H_2 = 4 \text{ км}, \quad H_3 = 12 \text{ км}.$$

Это распределение близко к новым результатам измерения [3, 4]. Приведенные значения параметров описывают некоторую среднюю ситуацию. При $j=2 \text{ пА} \cdot \text{м}^{-2}$ [3] они приведут к напряженности около поверхности Земли $E=144 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ и потенциалу ионосферы $U_\infty = 258 \text{ кВ}$.

Упрощения приводят к расхождению модельных расчетов от действительности. Однако можно надеяться, что общие закономерности, которые будут описаны ниже, сохраняются в условиях реальных отклонений от принятых предположений.

Математическая модель

Используем систему единиц измерения СИ.
Динамика электрического поля описывается системой трех уравнений:

уравнение Ома $E = rj$,

уравнение Гаусса $\partial E / \partial h = \rho / \epsilon$, (2)

уравнение непрерывности $\partial j / \partial h = -\partial \rho / \partial t$.

Здесь t обозначает время, E — напряженность поля, j — плотность тока проводимости, ρ — плотность объемного заряда и ϵ — абсолютную электрическую проницаемость воздуха.

Из системы уравнений (2) можно вывести сводное уравнение:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial h \partial t} + \frac{1}{\epsilon r} \frac{\partial E}{\partial h} - \frac{1}{\epsilon r^2} \frac{\partial r}{\partial h} E = 0. \quad (3)$$

Уравнения (1) или (2) могут быть проанализированы и решены разными методами. Ниже будет использована электротехническая модель, которая описывается уравнениями, эквивалентными уравнениям (2), а затем используются стандартные методы анализа электротехнических цепей. Электротехническая аналогия в атмосферном электричестве была развита Х. Каземиром и Л. Рунке (см., например, [5]) и оказалась весьма плодотворной.

Для наглядности построим электротехническую модель непосредственно путем физических рассуждений. Рассмотрим вертикальный столбец атмосферы площадью основания S . Атмосфера в столбце и его окружности горизонтально однородна, по предположению. Любая горизонтальная поверхность в столбце эквипотенциальна, и в столбец можно мысленно вставить изолированные друг от друга бесконечно тонкие горизонтальные проводящие листы. Объемный заряд воздуха можно мысленно переместить на проводящие листы. Тогда столбец станет явно эквивалентным последовательной цепи RC -контуров, изображенной на рис. 1. Обозначим для одного RC -контура: сопро-

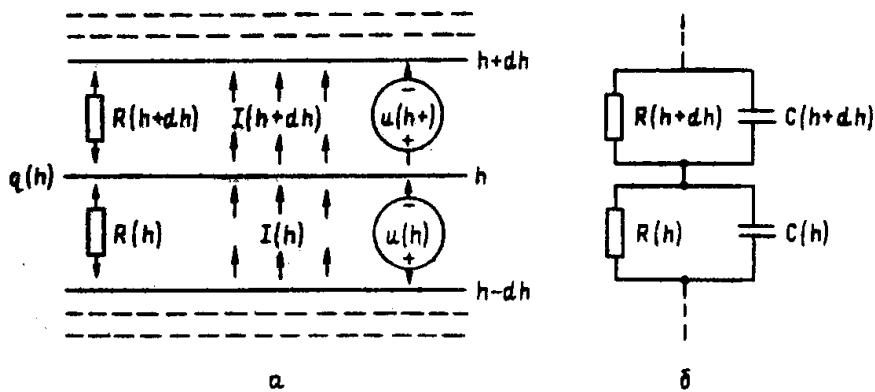


Рис. 1. Построение электротехнической модели:

а — фрагмент вертикального столбца, б — фрагмент эквивалентной цепи

тивление воздуха R , емкость C , ток проводимости I и напряжение, отсчитываемое снизу вверх, u . Заряд листа в столбце q равен сумме зарядов соседних пластин двух соседних конденсаторов. Соответствие

цепи (рис. 1, б) столбцу атмосферы формально устанавливается правилами постановки:

$$\left. \begin{aligned} R &= r dh / S, \\ C &= \varepsilon S / dh, \\ I &= j S, \\ u &= E dh, \\ q &= \rho S dh. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для формального доказательства эквивалентности построенной модели столбцу атмосферы запишем уравнения, непосредственно описывающие электротехническую цепь (рис. 1, б):

$$\left. \begin{aligned} u(h) &= R(h) I(h), \\ q(h) &= C u(h + dh) - C u(h), \\ \partial q(h) / \partial t &= I(h) - I(h + dh). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Легко проверить, что при подстановке электротехнических величин по правилам (4) в уравнения (5) и переходе к пределу $dh \rightarrow 0$ уравнения (5) преобразуются в уравнения (2), что является признаком эквивалентности.

Прямое численное интегрирование уравнений (5) требует составления десятистрочной программы и в случае 20 слоев и 1000 моментов времени — около пяти минут счета на персональной ЭВМ.

Рунке [1] указал способ использования преобразования Лапласа для решения задачи динамики электрического поля в вертикальном столбце атмосферы. Мы отдаем предпочтение преобразованию Фурье, которое позволяет лучше проследить общие закономерности на избранных численных примерах.

Разложим зависящий от времени потенциал ионосферы на гармонические слагаемые и опишем слой вертикального столбца комплексными импедансами, зависящими от частоты сигнала ω . Импеданс вертикального столбца при $dh \rightarrow 0$

$$Z_{\infty} = \frac{1}{S} \int_{h_0}^{\infty} \frac{r dh}{1 + (\varepsilon \omega r)^2} - i \frac{\varepsilon \omega}{S} \int_{h_0}^{\infty} \frac{r^2 dh}{1 + (\varepsilon \omega r)^2}, \quad (6)$$

где h_0 — высота поверхности Земли над уровнем моря. Для согласования с измерительной антенной площадь сечения вертикального столбца S выбирается равной эффективной площади антенны. Эффективная площадь уединенной проволоки длиной l_a и радиусом r_a , натянутой на удалении h_a от поверхности Земли, может быть вычислена по формуле:

$$S = \frac{2\pi h_a l_a}{\ln(2h_a/r_a)}. \quad (7)$$

Импеданс антенны

$$Z_a = \frac{R_a}{1 + (\omega \tau_a)^2} - i \frac{\omega \tau_a R_a}{1 + (\omega \tau_a)^2}, \quad (8)$$

где R_a и τ_a — сопротивление и собственная постоянная времени антенны.

Вертикальный столбец и антенна образуют делитель напряжения ионосфера—антенна, причем $|Z_{\infty}| \gg |Z_a|$. Если амплитуда гармонической составляющей потенциала ионосферы равна U_{∞} , то амплитуда той же составляющей потенциала антенны равна $U = K U_{\infty}$, где

$$K = \frac{|Z_a|}{|Z_{\infty}|} \quad (9)$$

— коэффициент передачи гармонического сигнала от ионосферы к антенне. Сдвиг гармонического сигнала в фазе от соответствующей составляющей потенциала ионосферы

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im} Z_a}{\operatorname{Re} Z_a} - \arctg \frac{\operatorname{Im} Z_\infty}{\operatorname{Re} Z_\infty}. \quad (10)$$

В случае положительного значения угла φ сигнал опережает вариации потенциала ионосферы, а в случае отрицательного значения — запаздывает относительно этой вариации.

Отклик антенны

Характер отклика антенны на вариации потенциала ионосферы зависит от ее собственной постоянной времени. Отклик антенны с $\tau_a = 0$, независимо от частоты, пропорционален плотности максвелловского вертикального тока. Антенна с $\tau_a = \varepsilon r$, где r — удельное сопротивление воздуха около Земли, эквивалентна узкому приземному слою воздуха, пропорционален напряженности электрического поля у поверхности Земли. Соответствующие практические устройства называются пассивными антеннами [6] и используются для измерения напряженности электрического поля.

Рис. 2, а описывает отклик антенны, расположенной на уровне моря, при стандартном распределении сопротивления вдоль вертикального

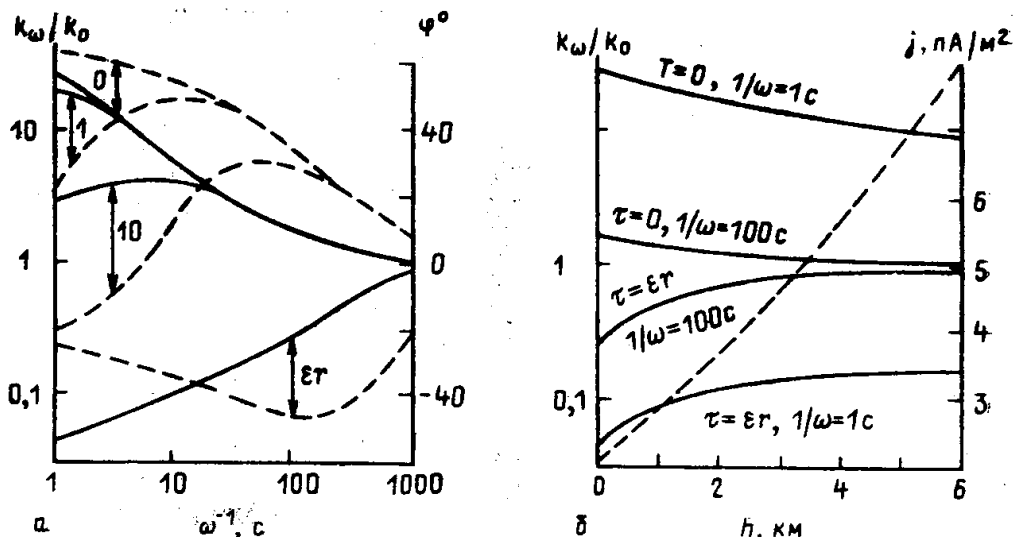


Рис. 2. Зависимость сигнала антенны от времени вариации $1/\omega$ (а) и от высоты поверхности земли над уровнем моря (б). Цифры у кривых — постоянные времени антенн (в секундах). Штриховые кривые — сдвиг фазы (а) и средняя плотность вертикального тока (б)

столбца. На рисунке указаны сдвиг фазы гармонических составляющих и относительный коэффициент передачи амплитуды K_ω/K_0 , где K_ω — абсолютный коэффициент передачи амплитуды [формула (9)] на рассматриваемой частоте и K_0 — то же на нулевой частоте или для постоянной составляющей электрического поля. Свойства разных антенн весьма различны в случае изучения быстрых вариаций и выравниваются при увеличении времени вариации.

Эффект, который достигается при переносе точки наблюдения в высокогорье, описывается на рис. 2, б. Свойства разных антенн с высотой выравниваются. Однако рис. 2, б не выражает основного преимущества высокогорья при изучении глобальных вариаций — уменьшения локальных вариаций с высотой.

Фазовый сдвиг сигнала антенны зависит от параметров вертикального столбца атмосферы, которые в разных местах разные. Поэтому возможен сдвиг между сигналами удаленных друг от друга антенн, используемых для синхронных наблюдений. Электропроводность ионосферы синхронизирует вариации не плотности максвелловского тока, а потенциала высоких слоев. Вариации плотности максвелловского тока в разных местах имеют разный сдвиг во времени по отношению к вариациям потенциала ионосферы. Примеры приведены в таблице.

Сдвиг гармонической вариации сигнала антенны от вариации потенциала ионосферы в зависимости от коэффициентов формулы (1) при $h_0=0$ и $1/\omega=100$ с

G_1	G_2 (тОм·м)	G_3	τ , с		Средняя плотность тока \bar{j} , пА·м ⁻²
			$\tau_{a=0}$	$\tau_{a=\epsilon r}$	
50	40	2	77	—68	1,23
50	20	5	61	—82	1,56
100	20	2	64	—84	1,68
50	20	2	62	—80	2,00
50	20	1	63	—78	2,21
0	20	2	57	—53	2,48
0	10	2	39	—43	4,03

Поскольку средняя плотность вертикального тока скоррелирована с распределением сопротивления воздуха по высоте, то ожидается корреляция сдвига между сигналами двух удаленных друг от друга антенн и отношением средних плотностей тока в местах расположения этих антенн.

ABSTRACT

A simple mathematical model is used to study the dependence of atmospheric electric field on ionospheric potential variations. The three-term Schweidler-Gish formula is used to describe air resistivity in a vertical column of the atmosphere. Phase shift between the signals of two widely spaced antennas is demonstrated in examples. The shift is expected to be in correlation with the ratio of vertical current densities in the neighbourhoods of the antennas.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ruhnke L. H. Area averaging of atmospheric electric currents // J. Geomagnetism: Geoelectricity. 1969. Vol. 21, № 1. P. 453—462.
2. Ruhnke L. H., Tammert H. F., Arold M. Atmospheric electric currents at widely spaced stations // Proc. in atmospheric electricity. Hampton: A. Deepak Publ., 1983. P. 76—78.
3. Markson R. Aircraft measurements of the atmospheric electrical global circuit during the period 1971—1984 // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90, № D4. P. 5967—5977.
4. Кихтенко В. Н., Брагин О. А. Результаты исследований электропроводности средней атмосферы // III Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству. Тез. докл. Тарту, 1986. С. 28.
5. Kasemir H. W., Ruhnke L. H. Antenna Problems of measurement of the air-earth current // Recent advances in atmospheric electricity. London, N. Y., Paris, Los Angeles: Pergamon Press, 1959. P. 137—147.
6. Crozier W. D. Measuring atmospheric potential with passive antennas // J. Geophys. Res. 1963. Vol. 68, № 18. P. 5173—5179.