

Измерение деформации пресноводного ледяного покрова горизонтальной электрической антенной

© В.К. Балханов, Ю.Б. Башкуев, В.Б. Хаптанов

Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН,
670047 Улан-Удэ, Россия
e-mail: ballar@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 11 апреля 2006 г.)

Приведены результаты измерений электрических полей, возникающих при деформации и взаимодействии блоков ледового покрова. Дано описание ледового покрова оз. Байкал. Вычислена частота изгибных колебаний ледяной пластины, плавающей на воде. Для квадратной пластины со стороной a частота колебаний f (Hz) = $222/a$ (m). Колебания ледового покрова вызывают колебания наводимого в горизонтальной незаземленной антенне электрического потенциала порядка 10 мV в интервале 1–13 Hz.

PACS: 05.40: 41.20.Gb: 46.40

Введение

Одной из актуальных научных задач сейсмоэлектромагнетизма является поиск электромагнитного предвестника землетрясений. Достаточная редкость и непредсказуемость землетрясений подвигла на поиск аналогов, приводящих к разрушительным явлениям в других средах. В этом отношении перспективным является изучение речного и озерного массивного пресного льда, моделирующего литосферу Земли. В работе Епифанова В.П. и Юрьева Р.В. [1] изучался речной лед. Вследствие разности температур на границах ледового покрова с воздушной и водной средами, а также из-за особенностей роста сплошной лед является градиентной средой. В [1] было установлено, что по упругим свойствам в первом приближении речной лед можно рассматривать макрооднородным. Это положение можно применять и для озерного льда. Авторами настоящей работы проведено экспериментальное изучение электромагнитных явлений при деформировании и взаимодействии блоков ледового покрова оз. Байкал. Измерения заключались в регистрации электромагнитных сигналов от различных датчиков, расположенных на льду.

Электрические низкочастотные (в интервале 1–10 Hz) колебания измерялись незаземленной горизонтальной антенной, представляющей собой линейный провод 25 м в изоляции. Исключительная особенность такой антенны — ее чувствительность к изменению квазипостоянного и низкочастотного электрического потенциала на поверхности льда. На рис. 1 представлен пример реализации сигналов с незаземленной горизонтальной антенны. Отчетливо видны колебания электрического поля в интервале 1–13 Hz как с резкой сменой частот, так и с небольшой вариацией. Амплитуда колебаний составляет 10 мV. Поскольку горизонтальная антенна лежит на льду, то естественно связать наводимый в ней потенциал изгибными колебаниями льда, в связи с этим необходимо рассчитать собственные поперечные колебания ледового покрова.

Ледяной покров

Байкальский лед характеризуется ровным характером поверхности практически на всей своей обширной площади. Максимальная толщина льда в разные годы составляет от 0.8 до 1.1 м. Температура воды близка к 0°C. Температура воды соответствует зимнему периоду. В результате различных физических причин, таких как период температур, кругооборот воды в озере, ледовое поле испещрено густой сетью трещин. Трещины имеют размер от ~ 1 см до нескольких метров у „становых“ щелей (рис. 2). Таким образом, ледовый покров оз. Байкал состоит из ледяных блоков размером в несколько сотен метров различной конфигурации и разной степенью связности между собой. Для определения изгибных колебаний ледяных блоков необходимо решить

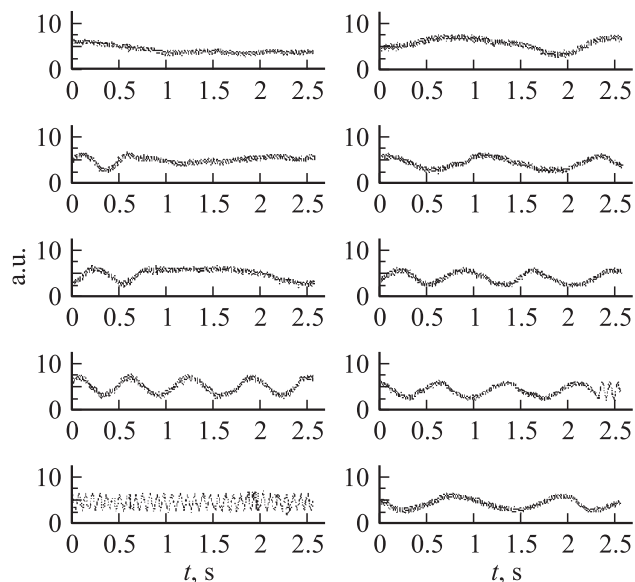


Рис. 1. Потенциалы, наводимые в горизонтальной электрической антенне, которая колеблется при изгибных деформациях льда в градиентном электрическом поле Земли.



Рис. 2. Трещина шириной 0.5 м в ледяном покрове.

задачу на собственные колебания ледяной пластины, плавающей на воде. Собственные колебания упругого сплошного материала, каким является массивный лед, относятся к акустическим волнам. Длина таких волн заведомо больше размеров структурных образований льда, поэтому для описания упругих свойств льда достаточно использовать три постоянные — плотность ρ_L , модуль Юнга E и коэффициент Пуассона σ . Для массивного льда, каким является лед озера Байкал, при температуре -1°C известно следующее [2]:

$$\rho_L = 917 \text{ kg/m}^3, \quad E = 9400 \text{ МПа}, \quad \sigma = 0.345.$$

Эти значения близки к аналогичным, приведенным в [1] для температуры -15°C .

Упругие колебания

Ледовый покров имеет естественные ограниченные размеры, связанные с системой трещин и границами берегов. В связи с этим он имеет спектр собственных колебаний. Возникает задача вычисления спектра собственных колебаний ледяной пластины, лежащей на воде. Аналогичная задача для бесконечной пластины была рассмотрена в [3]. При решении поставленной задачи будем использовать формулы и обозначения из [3].

Если лед занимал бы полупространство, то в нем распространялись бы продольные C_l , поперечные C_t и поверхностные C_r волны со скоростями

$$C_l = 4010, \quad C_t = 1950 \quad \text{и} \quad c_r = 1820 \text{ м/с}.$$

Однако в действительности лед является тонкой пластиной толщиной h порядка 1 для оз. Байкал. В этом случае возможны продольные колебания с двумя скоростями

$$C_{l1} = 2760 \text{ м/с}, \quad C_{l2} = C_t.$$

Из-за ограничения льда по толщине ($0 < z < h$) для поперечных упругих колебаний появляется следующее дисперсионное уравнение:

$$\omega = hV_p k^2, \quad (1)$$

где волновой вектор k лежит в плоскости xu , ω — круговая частота, параметр

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{12\rho_L(1-\sigma^2)}} = 985 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Если лед представляет собой прямоугольную пластину размером $a \times b$, то появляется спектр собственных частот

$$\omega_{nm} = hV_p \left[\left(\frac{\pi n}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi m}{b} \right)^2 \right],$$

где n и m — целые числа. Наличие спектра означает существование минимальной частоты

$$f = \frac{\omega_{\min}}{2\pi} = \frac{\pi h V_p}{2a^2}. \quad (3)$$

Для массивного байкальского льда $f(\text{Hz}) = [40/a(\text{m}^3)]^2$; если $a = 200 \text{ м}$, то $f = 0.04 \text{ Hz}$. Поскольку толщина пластины много меньше своего поперечного размера и длины волны, то частота ограничена сверху, она не может быть больше, чем 2 kHz .

Если бесконечная пластина лежит на воде, то вместо закона (1) колебания подчиняются следующему дисперсионному уравнению [3]:

$$\omega = \frac{V_p}{h} \sqrt{\frac{(kh)^5}{\rho_V/\rho_L + kh}}, \quad (4)$$

где ρ_V — плотность воды при температуре 0°C . При уменьшении длины волны соотношение (4) переходит в выражение (1).

Колебания ледяной пластины на воде

Для расчета собственных поперечных колебаний ледового покрова рассмотрим колебания вертикально (по оси z) поляризованной звуковой волны на воде. Такая волна имеет одну ненулевую компоненту скорости $V_z(x, \varepsilon)$, где z — нормальная к поверхности раздела „лед–вода“ координата, x — одна из поперечных координат, ε — значения координаты z в воде, когда $z < 0$. Уравнения Навье–Стокса для такой волны сводятся к одному уравнению

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_V} \frac{\partial P}{\partial \varepsilon}, \quad (5)$$

где P — давление. Мы примем, что оз. Байкал имеет достаточную глубину, чтобы акустические колебания

считать затухающими с глубиной. Это позволяет пренебречь отражением звука от дна водоема. Скорость распространения рассматриваемой волны будет

$$V_z = \frac{\partial z}{\partial t} = A \exp[i(kx - \omega t) + k\varepsilon], \quad (6)$$

где k — параметр, определяемый решением задачи. Подставив (6) в уравнение (5) и проинтегрировав полученное выражение, находим

$$P = -i\rho_V \frac{\omega}{k} A \exp[i(kx - \omega t) + k\varepsilon].$$

Полагая $\varepsilon = 0$, получаем давление, которое испытывает ледяная пластина, соприкасаясь с водой

$$P = -i\rho_V \frac{\omega}{k} A \exp[i(kx - \omega t)]. \quad (7)$$

Положив в (6) $\varepsilon = 0$ и проинтегрировав оставшееся выражение, находим поперечное смещение ледяной пластины

$$z = \frac{i\omega}{k} A \exp[i(kx - \omega t)]. \quad (8)$$

Далее, с одной стороны, малое смещение пластины описывается известным уравнением [3]:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + h^2 V_p^2 \nabla^2 \nabla^3 z = \frac{P}{h\rho_L}, \quad (9)$$

где ∇ — оператор Набла. Подставив (7) и (8) в (9), получаем дисперсионное уравнение (4). Этим самым определили параметр k в (6). С другой стороны, для малого смещения точек свободной поверхности прямоугольной пластины размером $a \times b$ можно получить

$$z = \frac{1}{12\pi\rho_L V_p^2} \frac{abP}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (10)$$

Подставив в (10) выражения (7) и (8), находим одну спектральную частоту

$$\omega = V_p \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}. \quad (11)$$

Видно, что при плавании на воде из всего спектра собственных частот у ледяной пластины реализуется только одна частота. Для квадратной ледяной пластины вместо (3) будет

$$f = \frac{V_p}{\sqrt{2}\pi a}, \quad \text{или} \quad f(\text{Hz}) = \frac{222}{a(\text{m})}. \quad (12)$$

При $a \sim 200$ м частота $f \sim 1$ Hz — типичная частота поперечных колебаний льда на воде.

Из-за вариации размеров ледяных блоков, согласно формуле (11), появляется спектр близко лежащих частот изгибных деформаций. Колебания электрического потенциала в горизонтальной незаземляемой антенне можно объяснить изменениями положения пункта наблюдения в градиентном электрическом поле вследствие

изгибных деформаций и колебаний ледового покрова. Атмосферное электрическое поле составляет примерно $E_{atm} \approx 100$ В/м. Изменение потенциала ΔU при изменении положения на Δz составит $\Delta U = E_{atm}\Delta z$. Отсюда следует, что наблюдаемое изменение потенциала $\Delta U = 10$ мВ будет вызвано изгибной деформацией $\Delta z = 0.1$ мм. Такая же по порядку величин деформация следует и из формулы (10). Действительно, положив $a = b$, из (10) получаем

$$z = \frac{aP}{12\pi\sqrt{2}\rho_L V_p^2}.$$

Подставив сюда атмосферное давление на поверхности Земли и другие известные величины, получим $z = 0.4$ мм.

Заключение

Система сбора и анализа данных на основе горизонтальной незаземленной антенны и цифрового осциллографа позволила провести измерения вариаций электрического потенциала порядка 10 мВ, связанные с деформацией и взаимодействием блоков, которые образуют ледяной покров оз. Байкал. Проведен теоретический анализ спектра собственных колебаний ледяной пластины, плавающей на воде. Установлено, что поперечные колебания ледяного блока в горизонтальной незаземленной антенне, находящейся в градиентном электрическом поле Земли, наводят периодический потенциал частотой 1–10 Hz. Для ледяного блока, плавающего на воде, проведен теоретический анализ, позволяющий установить, что изгибные колебания льда происходят с амплитудой в десятые доли миллиметра и с частотой ≈ 1 –10 Hz.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 05-01-97200, 05-02-97202.

Список литературы

- [1] Епифанов В.П., Юрьев Р.В. Вязкость разрушения пресного льда // ДАН. 2006. Т. 406. № 2. С. 187–191.
- [2] Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 204 с.