

ДИПОЛЬНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ДЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПОДВОДНЫМ ВЗРЫВОМ

к.ф.-м.н., С.В. Сёмкин, ВГУЭС, г. Владивосток,
д.ф.-м.н., В.П. Смагин, ВГУЭС, г. Владивосток

Предположим, в морской среде происходит подводный взрыв, вызывающий интенсивное движение морской воды в пространственно ограниченной области. Движение проводящей морской воды в геомагнитном поле создает токи, магнитное поле которых существует и в самой воде, и над ее поверхностью, что дает возможность детектировать взрыв. Ранее [1] мы рассматривали генерацию магнитного поля инфразвуковыми волнами в океаническом волноводе. В данной работе оценивается величина магнитного поля, индуцированного взрывом и возможности определения положения и мощности взрыва по этому полю.

Рассмотрим случай, когда подводный взрыв происходит достаточно далеко и от дна, и от свободной поверхности, так что влияние этих границ можно не учитывать. Пусть $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ - поле гидродинамических (или гидроакустических) скоростей, возникающее в результате взрыва. Плотность индуцированных токов равна $\mathbf{j} = \sigma[\mathbf{v}, \mathbf{F}]$, \mathbf{F} - вектор магнитной индукции геомагнитного поля, σ - электрическая проводимость морской среды. Векторный потенциал $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ магнитного поля этой системы токов в магнитостатическом приближении имеет вид

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\mathbf{r}' . \quad (1)$$

Если считать, что размер области интенсивного движения воды при взрыве мал, по сравнению с расстоянием до точки наблюдения, то для вычисления векторного потенциала (1) можно использовать дипольное приближение

$$\mathbf{A}_d(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{[\mathbf{m}, \mathbf{r}]}{r^3} , \quad (2)$$

где

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} \int [\mathbf{r}', \mathbf{j}(\mathbf{r}')] d\mathbf{r}' \quad (3)$$

- дипольный момент системы токов. Индукция магнитного поля \mathbf{B} вычисляется следующим образом

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \text{rot} \frac{[\mathbf{m}, \mathbf{r}]}{r^3} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \text{grad} \frac{(\mathbf{m}, \mathbf{r})}{r^3} . \quad (4)$$

Для индуцированных токов

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} \int (\mathbf{v}(\mathbf{r}')(\mathbf{r}', \mathbf{F}) - \mathbf{F}(\mathbf{r}', \mathbf{v}(\mathbf{r}')) d\mathbf{r}' \quad (5)$$

Если движение воды при взрыве считать радиально симметричным, т.е. $\mathbf{v}(\mathbf{r}) = v(r)\mathbf{e}_r$, где \mathbf{e}_r - единичный вектор в направлении от места взрыва, то из (5) получим

$$\mathbf{m} = -\frac{\sigma}{2} \mathbf{F} \int (\mathbf{v}(\mathbf{r}'), \mathbf{r}') d\mathbf{r}' = -2\pi\sigma \mathbf{F} \int v(r') r'^3 dr' . \quad (6)$$

Подставляя (6) в (4) получим выражение для индукции магнитного поля в дипольном приближении

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \mu_0 \sigma F \left(\int_0^\infty v(r') r'^3 dr' \right) \text{grad} \frac{(\mathbf{e}_F, \mathbf{r})}{r^3} \quad (7)$$

Таким образом, для вычисления индукции магнитного поля необходимо оценить интеграл в выражении (7). На первых стадиях мощного подводного взрыва возможно образование сильной ударной волны. В этом случае скорость можно считать равной $v(r', t) = \frac{r'}{10t}$, а радиус фронта ударной волны $R(t) = At^{2/5}$ [2]. Константу A можно выразить через энергию взрыва W и невозмущенную плотность воды ρ_0 : $A = \left(\frac{225W}{2\pi\rho_0} \right)^{1/5}$. Подставляя эти выражения в (7), получим

$$\mathbf{B} = \frac{9}{8} \frac{\mu_0 \sigma W F t}{\pi \rho_0} \text{grad} \frac{(\mathbf{e}_F, \mathbf{r})}{r^3} . \quad (8)$$

Литература

1. Семкин С.В., Смагин В.П., Савченко В.Н., Магнитное поле инфразвуковой волны в океаническом волноводе, Геомagnetизм и аэрономия, 2008, том 48, № 3, с. 332 – 335.
2. Курант Р., Фридрихс К., Сверхзвуковое течение и ударные волны, Издательство иностранной литературы, Москва, 1950, с. 426.