

## МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В МОРСКОЙ ВОДЕ

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

Макроскопические движения морской воды, как и всякой проводящей среды, могут сопровождаться возникновением электрических токов. Механизмы возникновения таких токов могут быть различными. Возможность возникновения в морской воде электрических токов обусловлена наличием в ней положительных и отрицательных ионов солей. При движении морской воды на эти ионы действуют различные силы, что и приводит к возникновению токов. Пусть  $\mathbf{v}_+$  и  $\mathbf{v}_-$  скорости положительных и отрицательных ионов соответственно, а  $\mathbf{v}$  - скорость движения воды. Запишем уравнения движения ионов при наличии электрического поля  $\mathbf{E}$ , геомагнитного поля  $\mathbf{F}$  и индуцированного магнитного поля  $\mathbf{B}$ , полагая, что на них действует сила Лоренца и «сила трения», которую мы будем считать пропорциональной разнице скоростей ионов и скорости воды:

$$m_{\pm} \frac{d\mathbf{v}_{\pm}}{dt} = -\alpha_{\pm}(\mathbf{v}_{\pm} - \mathbf{v}) + q_{\pm}(\mathbf{E} + [\mathbf{v}_{\pm}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})]). \quad (1)$$

Здесь  $m_{\pm}$  - эффективные массы положительных и отрицательных ионов,  $\alpha_{\pm}$  - коэффициенты, связанные с подвижностью ионов, а  $q_{\pm}$  - их заряды. Запишем уравнения (1) в виде

$$\mathbf{v}_{\pm} = \mathbf{v} - \frac{m_{\pm}}{\alpha_{\pm}} \frac{d\mathbf{v}_{\pm}}{dt} + \frac{q_{\pm}}{\alpha_{\pm}} (\mathbf{E} + [\mathbf{v}_{\pm}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})]). \quad (2)$$

Скорости ионов  $\mathbf{v}_{\pm}$  мало отличаются от скорости воды  $\mathbf{v}$ , поэтому в первом приближении  $\mathbf{v}_{\pm}$  можно оценить, подставив в правые части (2)  $\mathbf{v}$  вместо  $\mathbf{v}_{\pm}$ . В принципе же, на уравнения (2) можно смотреть как на рекуррентные соотношения, из которых определяются  $\mathbf{v}_{\pm}$  с любой необходимой степенью точности. В дальнейшем, мы ограничимся только первым приближением для  $\mathbf{v}_{\pm}$ . Вводя обозначения  $\gamma_{\pm}$  для объемных плотностей положительного и отрицательного зарядов, запишем в этом приближении выражение для плотности тока  $\mathbf{j}$ :

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{v} - \left( \frac{m_+ \gamma_+}{\alpha_+} + \frac{m_- \gamma_-}{\alpha_-} \right) \mathbf{a} + \left( \frac{q_+ \gamma_+}{\alpha_+} + \frac{q_- \gamma_-}{\alpha_-} \right) (\mathbf{E} + [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})]). \quad (3)$$

Здесь  $\gamma = \gamma_+ + \gamma_-$ ,  $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$  - ускорение среды. Обозначим

$$K = \frac{m_+\gamma_+}{\alpha_+} + \frac{m_-\gamma_-}{\alpha_-} \quad \text{и} \quad \sigma = \frac{q_+\gamma_+}{\alpha_+} + \frac{q_-\gamma_-}{\alpha_-}. \quad (4)$$

Величина  $\sigma$  есть электрическая проводимость морской воды, а величина  $K$  определяется главным образом различием в массах и подвижностях отрицательных и положительных ионов. Рассмотрим отдельно смысл каждого слагаемого в правой части уравнения (3). Третье слагаемое, которое мы обозначим  $\mathbf{j}_{ind} = \sigma(\mathbf{E} + [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})])$ , - это индукционный ток, возникающий под действием силы Лоренца. Эта компонента тока и индуцированное ей магнитное поле рассматривалось нами, в частности, в [1-5]. Второе слагаемое  $\mathbf{j}_{in} = K\mathbf{a}$  - ток, возникающий по «инерционному механизму». В работе [6] показано, что существуют ситуации, когда это слагаемое играет важную роль в геофизических процессах. Первое слагаемое  $\mathbf{j}_c = \gamma\mathbf{v}$  - конвекционный ток, связанный с переносом макроскопической плотности заряда при движении морской воды. Даже для очень интенсивных движений морской воды, величина  $|\gamma|$  значительно меньше, чем  $|\gamma_{\pm}|$ . Поэтому будем считать, что величины  $K$  и  $\sigma$ , определяемые формулами (4) являются константами, а плотность свободных зарядов  $\gamma$ , а значит и  $\mathbf{j}_c$ , равны нулю. Таким образом, будем считать, что индуцированный в морской воде электрический ток возникает в результате действия двух механизмов – индукционного и инерционного:

$$\mathbf{j} = -K\mathbf{a} + \sigma(\mathbf{E} + [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})]) \quad (5)$$

В работе [6] приведена оценка вклада каждого из этих слагаемых в общую плотность тока для случая, когда все гидродинамические параметры являются периодическими функциями времени с частотой  $\omega$ . Показано, что инерционное слагаемое начинает преобладать для частот, превышающих  $\omega_c = \sigma F / K$ , что для морской воды соответствует примерно 50 Гц.

Магнитное поле может быть рассчитано для заданной системы токов с помощью уравнений Максвелла. В зависимости от пространственной структуры и скорости изменения поля, можно применять те или иные приближения. Если пренебречь токами смещения, то для магнитного поля  $\mathbf{B}$  получим уравнение:

$$\mu_0\sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0\sigma \text{rot} [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})] - \mu_0 K \text{rot} \mathbf{a}. \quad (6)$$

Если пренебречь явлением самоиндукции (отбросить слагаемое содержащее  $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ ), получим уравнение Пуассона, решение которого имеет вид:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0 \sigma}{4\pi} \int \frac{[\mathbf{v}(\mathbf{r}', t), \mathbf{F}] - (K / \sigma) \mathbf{a}(\mathbf{r}', t), (\mathbf{r} - \mathbf{r}')]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d\mathbf{r}'. \quad (7)$$

Если движение воды является безвихревым ( $\text{rot } \mathbf{v} = 0$  и  $\text{rot } \mathbf{a} = 0$ ) то электрический ток не возникает по инерционному механизму и в (6) и (7) не будет содержаться слагаемых с  $\mathbf{a}$ .

### Литература

1. Савченко В.Н., Смагин В.П., Фонарев Г.А. Вопросы морской электродинамики. Владивосток, ВГУЭС, 1999, 208 с.
2. Смагин В.П., Савченко В.Н., Семкин С.В. Морские электромагнитные поля, Часть II, Поля береговых, корабельных и акустических волн и крупномасштабных движений океана, Владивосток, ВГУЭС, 2004, 148 с.
3. Семкин С.В., Смагин В.П., Савченко В.Н., Генерация звуковых волн при взаимодействии гидроакустического и электромагнитного полей в морской среде, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2008, том 44, № 2, с. 271-275.
4. Семкин С.В., Смагин В.П., Савченко В.Н., Магнитное поле инфразвуковой волны в океаническом волноводе, Геомагнетизм и аэронавигация, 2008, том 48, № 3, с. 332 – 335.
5. Семкин С.В., Смагин В.П., Савченко В.Н., Гидроакустическая волна во внешнем переменном магнитном поле, Геомагнетизм и аэронавигация, 2008, том 48, № 3, с. 336 – 339.
6. Гульельми А.В., Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и магнитосфере Земли. УФН, 2007, том 177, № 13, с. 1258-1276.