

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.020

БЕРЕГОВОЙ ЭФФЕКТ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В.С. Исмагилов, Ю.А. Копытенко, М.С. Петрищев, П.А. Сергушин, А.В. Петленко

СПбФ ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ivs@izmiran.spb.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований возмущений электрического поля, созданных источниками ионосферного происхождения в прибрежных зонах Белого и Баренцева морей. Регистрация данных выполнялась геофизическими станциями GI-MTS-1. Горизонтальное электрическое поле регистрировалось теллурическими линиями длиной ~50 м. E_x компонента напряженности электрического поля устанавливалась ортогонально береговой линии в направлении от берега, компонента E_y - вдоль береговой линии. В прибрежной полосе контакта море-суша выявлена зона аномального увеличения амплитуды в полной и переменной E_x компоненты, примыкающая к кромке воды (береговой эффект). На расстоянии ~30 м от кромки воды наблюдается дополнительная узкая зона аномального усиления величины УНЧ-вариаций электрического поля, связанная с локальной геоэлектрической аномалией. Максимальный береговой эффект наблюдается возле кромки воды в береговой зоне и уменьшается с удалением от берега моря.

Введение

Береговой эффект в вариациях магнитного поля (в основном, в вертикальной компоненте) изучен достаточно хорошо. Он представляет собой явление, связанное с влиянием геоэлектрической неоднородности (море) на поле геомагнитных вариаций и теллурических токов. Береговой эффект проявляется на относительно небольшом расстоянии от береговой линии на суше или на море. Первые работы по изучению берегового эффекта были проведены на obs. «Мирный» (Антарктида) [Мансуров, 1958]. Было отмечено, что вблизи берега нормальная и вертикальная компоненты магнитного поля характеризуются сильными изменениями, а ток в море поляризован линейно и течет вдоль берега, повторяя его конфигурацию. Данное явление было исследовано в различных районах [Greenhouse, 1972].

Земная поверхность заряжена отрицательно, и вертикальная компонента напряженности земного электрического поля составляет в среднем ~130 В/м на всей поверхности Земли [Редичкин и Самсонова, 2015]. Горизонтальная компонента электрического поля много меньше и определяется как геоэлектрическими особенностями земной коры, т.е. зависит от электрических свойств горных пород, так и электрическим полем атмосферы, зависящим от метеорологических факторов. Напряженность электрического поля также изменяется во время сильных магнитных возмущений [Freir, 1967]. Естественные электрические поля возникают и на контакте различающихся химическими свойствами и составом горных пород.

В морских прибрежных зонах измерения электрических полей практически не проводились. Цель данной работы – исследование естественных электрических полей ионосферного происхождения в прибрежных зонах Белого и Баренцева морей.

Обсуждение результатов экспериментов

В проведенных экспериментах регистрация данных выполнялась геофизическими станциями GI-MTS-1 [Сергушин и Петрищев, 2022]. В состав каждой станции входят 3 трехкомпонентных магнитных датчика торсионного типа и две горизонтальные теллурические линии (датчики электрического поля) длиной ~50–70 м (E_x - и E_y - компоненты). Регистрируемые данные поступают в расположенный рядом с магнитометрами блок АЦП-24 и записываются на флэш-память. Схема эксперимента 2019 г. на северном берегу Белого моря (п. Умба) представлена на рис.1. Заземляющий электрод «Земля 1», относительно которого измерялась разность потенциалов, располагался на расстоянии ~60 м от береговой линии. Измерительные электроды (E_x1 - E_x6) первой станции GI-MTS-1 устанавливались вдоль линии, ортогональной берегу, с шагом 5 м. Ближайший к кромке воды электрод располагался на расстоянии 5 – 10 м от кромки воды в зависимости от фазы прилива (высота прилива составляла ~2.2 м). Измерительный электрод E_x7 второй станции GI-MTS-1 располагался на расстоянии 102 м от кромки воды, электрод «Земля 2» был установлен на расстоянии 47 м от измерительного электрода. Магнитометры (обозначено [H D Z] на рис. 1) устанавливались на расстоянии ~10 м от электродов заземления. Погрешность измерений по магнитному полю составляла <0.01 нТл, по потенциалу электрического поля <0.02 мкВ.

На рис. 2 на верхней панели за период 16–22.07.2019 г. приведена магнитограмма D-компоненты индукции магнитного поля, зарегистрированная магнитометром на береговой геофизической станции (рис. 1). Изменение величины разности потенциалов электрического поля ΔU , зарегистрированное между всеми семи

установленными измерительными электродами и заземлением за тот же 7-суточный период времени, представлено на нижней панели рис. 2. Возле кривых на рис. 2 указано расстояние от измерительного электрода до кромки воды. На самой удаленной точке хорошо заметны суточные вариации как в магнитном, так и в электрическом поле. Приливные полусуточные эффекты наиболее отчетливо видны на самой ближней к кромке воды точке (нижняя кривая на рис. 2).

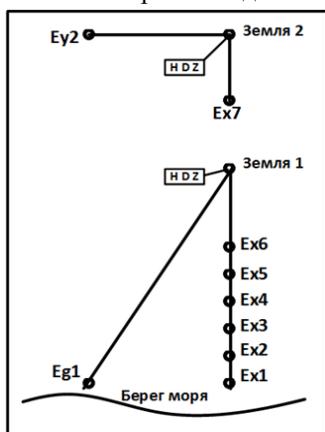


Рисунок 1. Схема эксперимента 2019 г. на северном берегу Белого моря.

измерительными электродами; E_c – среднеквадратичная амплитуда вариаций электрического поля для периодов $T = 2, 10$ и 300 с. Измерения электрического сопротивления земной среды производились омметром. Необходимо учесть, что поскольку в отрезок электрической цепи между электродами «Земля» и измерительными электродами, в которой омметр измеряет сопротивление, включен источник напряжения (индуцированные заряды на геоэлектрической аномалии). По этой причине показания омметра не будут совпадать, возможно, существенно, с действительными значениями сопротивления земной коры. На рис. 3 видно, что величина R растет с увеличением расстояния от берега, так как песок становится все более сухим и менее проводящим. Однако на расстоянии ~ 30 м от кромки воды наблюдается уменьшение сопротивления, что, вероятно, связано с небольшим понижением рельефа и уменьшением толщины слоя песка (фактически – локальная геоэлектрическая аномалия).

На второй сверху панели рис. 3 в зависимости от расстояния до кромки воды показано изменение для всего 7-суточного периода средней величины разности потенциалов $\Delta\Phi$ между измерительными электродами и заземлением. Как видно из рисунка, на расстоянии ~ 30 м от кромки воды наблюдается локальная геоэлектрическая аномалия.

На третьей сверху панели рис. 3 в зависимости от расстояния до кромки воды показано изменение средней величины горизонтальной E_x -компоненты поля. Средняя величина также определяется для всего 7-суточного периода между каждой парой электродов. Исходное электрическое поле определялось как производная разности потенциалов на паре измерительных электродов (1–2, 2–3, 3–4 и т.д.) [Бердичевский, 1968]:

$$E_x = -\partial \frac{\Delta\Phi}{\partial x}. \quad (1)$$

Здесь $\Delta\Phi$ – разность потенциалов в точке посередине между парами измерительных электродов, определенная линейной интерполяцией, координатная ось направлена ортогонально берегу вдоль цепочки электродов.

Нижние кривые на рис. 3 показывают изменения среднего значения УНЧ переменного электрического поля (E_c) для периодов $T=600, 10$ и 2 с. Переменное электрическое поле получено фильтрацией исходных значений разности потенциалов (рис. 2), затем для получения значений электрического поля использована формула (1).

Как видно из этого рисунка, средние амплитуды вариаций максимальны на ближайшей к кромке воды точке (~ 10 м) и уменьшаются с увеличением расстояния от берега. На локальной аномалии происходит изменение амплитуды вариаций. Амплитуда длиннопериодных вариаций электрического поля ($T=600$ с) изменяется с расстоянием от берега таким же образом, что и короткопериодные вариации (4-я сверху панель на рис. 3). Это позволяет предположить, что наблюдаемый эффект характерен для вариаций всего диапазона УНЧ-вариаций ($F < 1$ Гц) и для исходного постоянного поля.

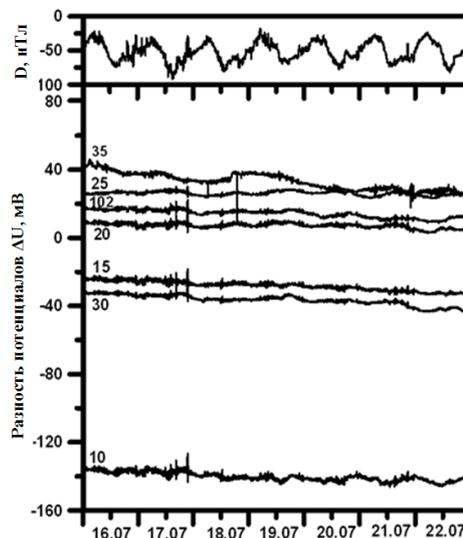


Рисунок 2. Вариации разности потенциалов электрического поля в прибрежной зоне Белого моря. Умба, 16–22.07.2019 г. Расстояние от кромки воды до измерительного электрода указано возле кривых.

Таким образом, результаты, представленные на рис. 3, показывают наличие двух аномалий с повышенной проводимостью: полоса контакта море–суша и узкая приповерхностная аномалия, удаленная от берега на ~30 м.

При падении переменной электромагнитной волны на земную поверхность индуцируются электрические заряды. В области контакта двух сред с различными геоэлектрическими свойствами (море–суша) касательная компонента напряженности электрического поля (E_y) не меняется при переходе из одной среды в другую, а нормальная компонента (E_x) меняется скачком. Это означает наличие избыточных электрических зарядов в переходной зоне контакта. Плотность избыточных зарядов в зоне изменения электропроводности синхронно изменяется с частотой возмущения и направлением электрического поля. По этой причине в области контакта суша–море возникает усиление амплитуды E_x -компоненты естественного переменного электрического поля («береговой эффект»). Максимальный береговой эффект наблюдается возле кромки воды и убывает с удалением от берега моря (рис. 3). Влияние геоэлектрической неоднородности на расстоянии ~30 м от берега проявляется в виде увеличения амплитуды вариаций.

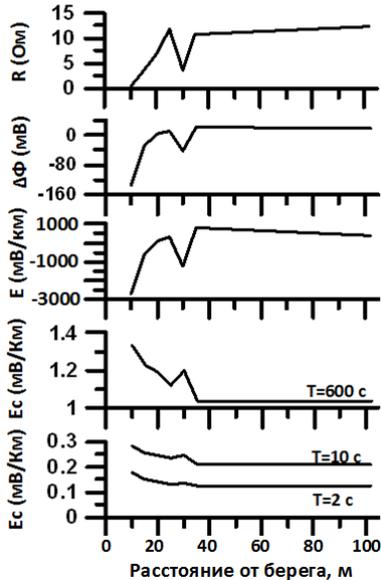


Рисунок 3. Изменение параметров электрического поля в зависимости от расстояния до кромки воды. Умба, 16–22.07.2019 г.

в нижней части рисунка показаны эллипсы поляризации (E_x – E_y) горизонтального переменного электрического поля на морском берегу. Из рисунка 4 видно, что большая ось эллипсов поляризации в обоих случаях почти перпендикулярна береговой линии ($E_x > E_y$). Такой же эффект наблюдается и на побережье Баренцева моря.

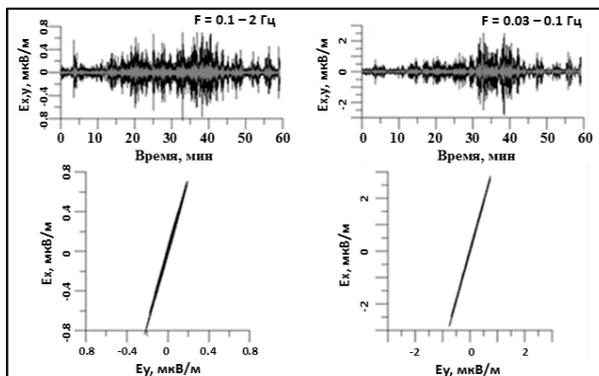


Рисунок 4. Вариации электрического поля в диапазоне частот $F = 0.1–2$ Гц и $F = 0.03–0.1$ Гц и эллипсы поляризации горизонтальной компоненты переменного электрического поля (E_x – E_y) на берегу Белого моря. Умба, 04–05 UT 08.07.2019 г. E_x - компонента показана черным цветом, E_y - серым.

Для обработки выбирался интервал данных с квазисинусоидальными пульсациями типа $Pc1 – Pc3$, позволяющих получить качественный эллипс поляризации. Данные отфильтрованы в диапазонах частот $F1 = 0.1–2$ Гц и $F2 = 0.03–0.1$ Гц. Компонента E_x (черный цвет) направлена ортогонально берегу, компонента E_y (серый цвет) направлена вдоль береговой линии. В нижней части рисунка показаны эллипсы поляризации

($E_x - E_y$) горизонтального переменного электрического поля на морском берегу. Из рисунка 4 видно, что большая ось эллипсов поляризации в обоих случаях почти перпендикулярна береговой линии ($E_x > E_y$). Такой же эффект наблюдается и на побережье Баренцева моря.

Заключение

Предварительные экспериментальные результаты были представлены в работе [Kopytenko et al., 2018]. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований естественных электромагнитных полей ионосферного происхождения в прибрежных морских зонах. В узкой береговой полосе (~50 м) выявлено аномальное усиление горизонтальной компоненты напряженности электрического поля, ортогональной к береговой линии. Максимальный береговой эффект наблюдается возле кромки воды и убывает с удалением от берега моря. Береговой эффект наблюдается в широком диапазоне УНЧ-возмущений электрического поля в полной и переменной E_x -компоненте электрического поля и возникает вследствие изменения в зоне суша–море плотности индуцированных зарядов синхронно с частотой возмущения внешнего электрического поля. Аномальное усиление E_x -компоненты электрического поля наблюдается на расстоянии ~30 м от кромки воды, что связано с наличием геоэлектрической особенности в районе этой точки. Погрешность этого расстояния составляет ~5 м и связана с перемещением кромки воды во время отливов и приливов.

Список литературы

- Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом электрического профилирования. М: "Недра", 254 с. 1968.
- Мансуров С.М. О причинах локальности магнитных вариаций в районе Мирного // Инф. бюлл. сов. антаркт. эксп. № 2. С. 37–41. 1958.
- Редичкин Н.Н., Самсонова Н.В. Физика Земли и атмосферы: учебное пособие // Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 148 с., 2015.
- Сергушин П.А., Петрищев М.С. Геофизическая станция GI-MTS-1 и возможности ее применения для локализации источников электромагнитных возмущений // Научно-практический семинар «Исследование магнитного поля земли как фактор прогресса национальной безопасности России». Сборник докладов СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПбФ ИЗМИРАН. С. 68–70. 2022.
- Freir G.D. Auroral effects on the Earth electric field // J. Geophys. Res. V. 66. P. 2695–2702. 1967.
- Greenhouse J.P. Geomagnetic time variations on the sea floor off southern California // Ph.D. thesis. Univ. of Calif, San Diego, 248 p., 1972.
- Kopytenko Yu.A., Ismagilov V.S., Petrishchev M.S., Sergushin P.A., Petlenko A.V. Broadband ULF perturbations of the electric field in coastal zone of the Okhotsk sea // 41th Annual Seminar, Apatity, p. 58–61. 2018.