

УДК 537.8

БЕРЕГОВОЙ ЭФФЕКТ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2023 г. В. С. Исмаилов¹ *, Ю. А. Копытенко¹, М.С. Петрищев¹,
П. А. Сергушин¹, А. В. Петленко¹

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН),
Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: ivs@izmiran.spb.ru

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.

После доработки 14.12.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Приведены 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. Компонента E_x устанавливалась ортогонально береговой линии в направлении от берега, компонента E_y направлена вдоль береговой линии. В прибрежной зоне в полосе контакта море–суша выявлена примыкающая к кромке воды зона аномального увеличения амплитуды УНЧ-вариаций ($F < 1$ Гц) E_x -компоненты напряженности электрического поля. На расстоянии ~30 м от кромки воды наблюдается дополнительная узкая зона аномального усиления величины УНЧ-вариаций электрического поля. Максимальный береговой эффект наблюдается возле кромки воды в береговой зоне и уменьшается с удалением от берега моря.

DOI: 10.31857/S0016794023600114, EDN: PKWZDS

1. ВВЕДЕНИЕ

Береговой эффект в вариациях магнитного поля (в основном в вертикальной компоненте) изучен достаточно хорошо. Он представляет собой сложное 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. В 70-х гг. прошлого века появляется ряд работ по изучению берегового эффекта на основе экспериментальных данных геомагнитных обсерваторий и магнитотеллурического зондирования. Данное явление было исследовано в различных районах [Ваньян и др., 1967; Greenhouse, 1972; Мардерфельд, 1977; Никифорова и др., 1980]. В этих исследованиях показано, что локальные аномальные магнитовариационные эффекты, связанные с берегом, затухают на расстоянии

нескольких километров, а величина берегового эффекта зависит от глубины моря, отношения проводимости суши и моря и конфигурации береговой линии.

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.

Региональные горизонтальные электрические поля создаются переменными низкочастотными (10^{-5} –10 Гц) полями ионосферного и атмосферного происхождения. Одна из основных причин возникновения региональных теллурических токов состоит в изменении состояния ионосферы под воздействием ультрафиолетового и корпускулярного солнечного излучения [Брагин и др., 1972]. Напряженность электрического поля также изменяется во время сильных магнитных возмущений [Freir, 1967]. Естественные электриче-

ские поля возникают также на контакте различающихся химическими свойствами и составом горных пород [Ковтун, 1980]. Амплитуды напряжения регионального переменного электрического поля обычно колеблются около $(0.3-1) \times 10^{-6}$ В/м; на средних широтах они достигают на суше 1×10^{-5} В/м, на поверхности моря – $(0.5-1.5) \times 10^{-5}$ В/м. Локальные факторы рассеяны по всей земной поверхности. Их эффект в какой-либо большой области на значительном удалении от источника возбуждения поля практически не ощущается.

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.

2. 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.

Поверхность берега, на которой были установлены электроды, состоит из сухого песчаного слоя, покрывающего мелкую, а глубже и крупную гальку. В течение эксперимента стояла малооблачная погода с температурой $10^{\circ}-16^{\circ}$, ветер преимущественно северо-восточного направления

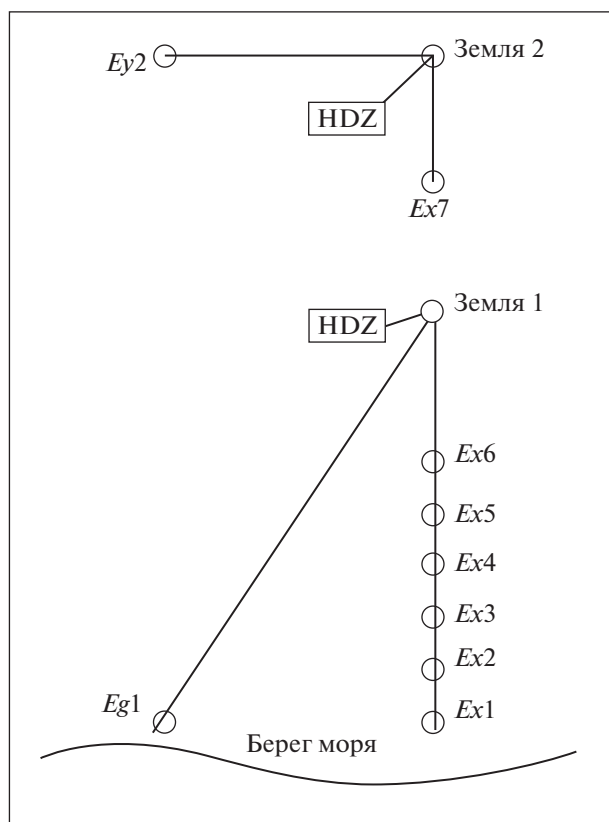


Рис. 1. Схема эксперимента 2019 г. на северном берегу Белого моря.

(с моря на берег) усиливался до 8–15 м/с в светлое время суток длительностью более 20 ч и ослабевал до 1–2 м/с в темное время суток.

На рис. 2 на верхней панели за период 16–22.07.2019 г. приведена магнитограмма D -компоненты индукции магнитного поля, зарегистрированная магнитометром на прибрежной геофизической станции (рис. 1). Именно эта компонента используется нами далее для проведения магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Изменение величины разности потенциалов электрического поля ΔU , зарегистрированное между всеми 7 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. 3 представлены изменения параметров магнитного и электрического поля в зависимости от расстояния до кромки воды за период 16–22.07.2019 г. На рис. 3 сверху вниз в зависимости

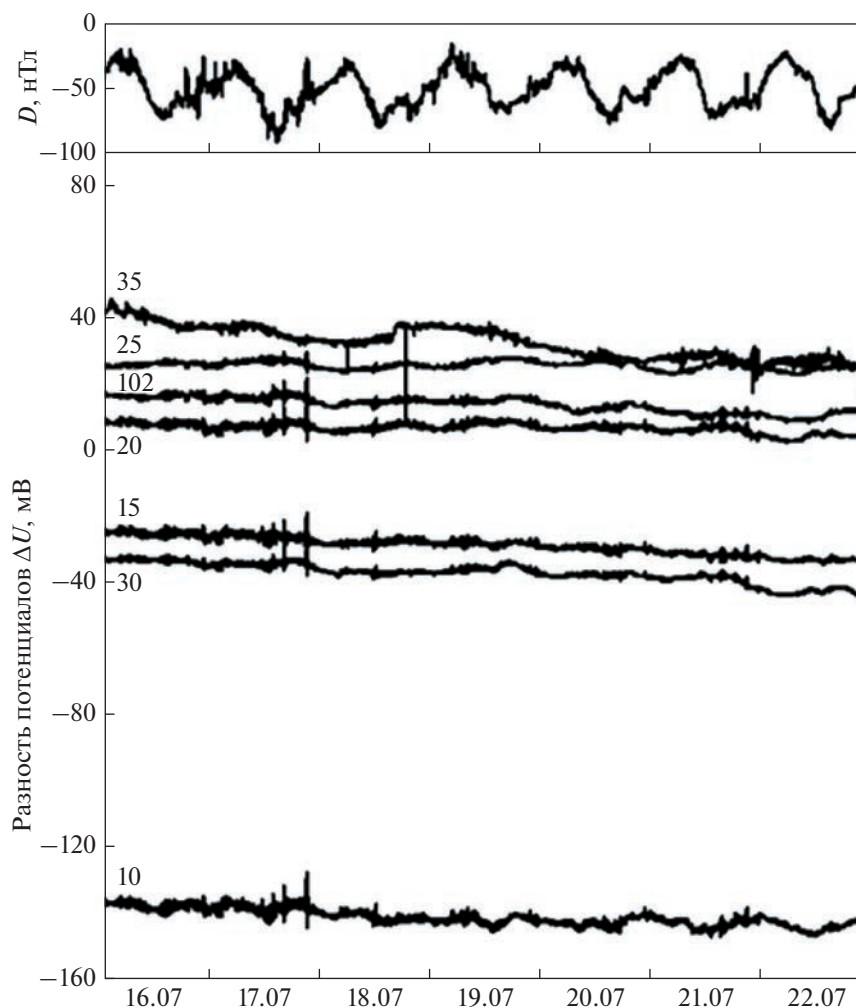


Рис. 2. Вариации разности потенциалов электрического поля в прибрежной зоне Белого моря. Умба, 16–22.07.2019 г. Расстояние от кромки воды до измерительного электрода указано возле кривых.

от расстояния от береговой линии показаны изменения: R – электрическое сопротивление земной среды; $\Delta\Phi$ – среднее значение разности потенциалов между заземлением и измерительными электродами; Ea – среднее значение E_x -компоненты электрического поля, определенное в точках между измерительными электродами; Ec – среднеквадратичная амплитуда вариаций электрического поля для периодов $T = 2, 10$ и 300 с; Ra – кажущееся удельное сопротивление и H – скин-слой, определенные методом МТЗ.

Измерения электрического сопротивления земной среды между электродами “Земля” и измерительными электродами производились омметром. Необходимо учесть, что в отрезок электрической цепи (параллельно расположенные теллурическая линия и земная среда), в которой омметр измеряет сопротивление, включены источники напряжения (индуцированные заряды на геоэлектрических аномалиях). По этой причине по-

казания омметра не будут совпадать, возможно, существенно, с действительными значениями сопротивления земной коры. В полевых условиях при расстановке измерительных электродов для проведения МТЗ при необходимости (сложный рельеф, заболоченность почвы) часто выполняют такие измерения с целью избежать установки электрода в локальную приповерхностную аномалию с повышенной проводимостью, что приводит к занижению вычисленной глубины исследуемых слоев земной коры. Показания омметра включены в рис. 3 поскольку они хорошо коррелируют с кривыми, представленными на рис. 3 ниже, и показывают наличие геоэлектрической аномалии. 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 ре-

льефа и уменьшением толщины слоя песка (фактически – локальная геоэлектрическая неоднородность).

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 для каждой пары электродов. Геоэлектрическая аномалия четко видна в понижении величины поля на таком же расстоянии. Нефильтрованное (полное) электрическое поле определялось как производная разности потенциалов на паре измерительных электродов (1–2, 2–3, 3–4 и т.д.) [Бердичевский, 1968]:

$$E_x = -\partial\Delta\Phi/\partial x. \quad (1)$$

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

Ниже на рис. 3 представлены кривые изменения среднего значения переменного электрического поля (E_c) для периодов $T = 300, 10$ и 2 с. Переменное электрическое поле получено фильтрацией исходных значений разности потенциалов (рис. 2), затем для получения значений электрического поля по формуле (1) проводились те же действия, что и для нефильтрованного электрического поля.

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 ($T = 300$ 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).

На двух нижних панелях рис. 3 для периодов $T = 2, 10$ и 300 с представлены кажущееся удельное сопротивление земной среды Ra и скин-слой H (глубина проникновения электромагнитной волны, на которой она затухает в $e = 2.71828$ раз), определенные методом МТЗ. Кажущееся удельное сопротивление для $T = 300$ с находится в пре-

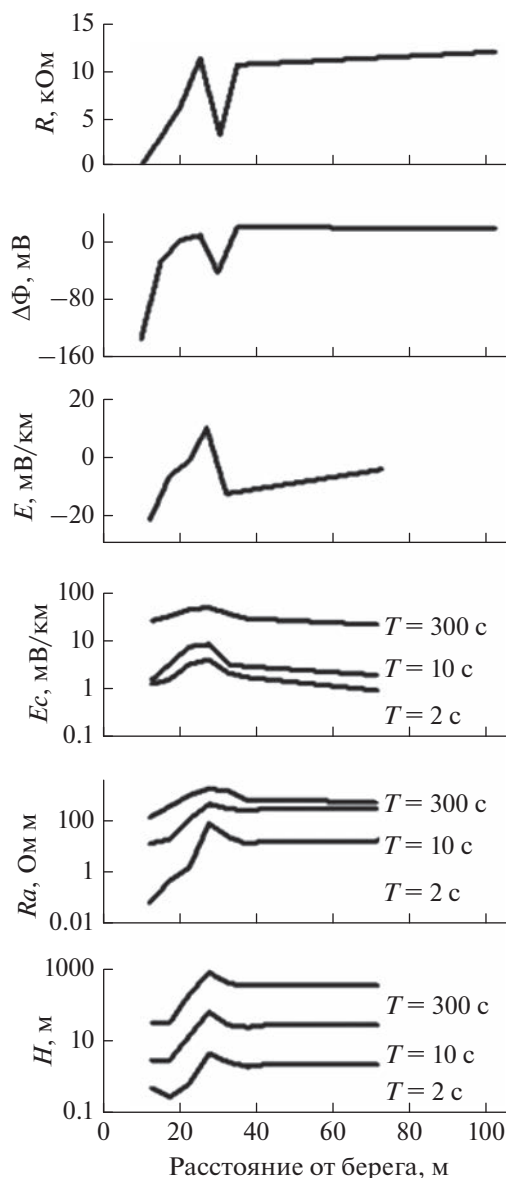


Рис. 3. Изменение параметров электрического поля в зависимости от расстояния до кромки воды. Умба, 16–22.07.2019 г. R – электрическое сопротивление земной среды; $\Delta\Phi$ – среднее значение разности потенциалов между заземлением и измерительными электродами; E_x – среднее значение горизонтальной компоненты электрического поля; E_c – среднеквадратичная амплитуда вариаций электрического поля для периодов $T = 2, 10$ и 300 с; Ra – кажущееся удельное сопротивление; H – скин-слой.

делах 200–800 Ом м, а скин-слой составляет 300–1000 м.

В основе метода МТЗ лежит упрощенная модель естественного электромагнитного поля [Бердичевский, 1968]. Предполагается, что первичное поле, возбуждаемое внешними источниками, однородно на поверхности горизонтально однородной Земли. В этом случае отношение взаимно

перпендикулярных горизонтальных компонент электрического и магнитного полей, измеренных на поверхности Земли, будет зависеть только от периода вариации и распределения проводимости по глубине. Это отношение, названное импедансом Z , может быть вычислено по любой паре ортогональных компонент: $Z = E_x/H_y = -E_y/H_x$ (H_x и H_y – напряженность магнитного поля). Чем больше период вариаций, тем глубже проникает поле внутрь Земли. Изменение импеданса с ростом периода отражает изменение удельного сопротивления с глубиной. Удельное сопротивление R_a определяется формулой [Жданов, 1989]

$$R_a = (\omega\mu)^{-1} |Z|^2 \quad Z = E_x/H_y. \quad (2)$$

Здесь $\omega = 2\pi/T$, $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м.

На практике измеряют индукцию магнитного поля, и удобнее кажущееся удельное сопротивление R_a определять по формуле [Ковтун, 1980]

$$R_a = 0.2 |Z|^2 T \quad Z = E_x/B_y, \quad (3)$$

где T – период вариации в секундах; E_x – напряженность электрического поля в мВ/км; B_y – индукция магнитного поля в нТл.

Значения R_a только в предельных случаях близки к истинному значению удельного сопротивления. Например, при очень малых значениях периода, когда поле не проникает в нижележащий слой, значение R_a равно удельному сопротивлению первого слоя [Ковтун, 1980], поэтому удельное сопротивление R_a называют “кажущимся”.

Регистрируя вариации естественного электромагнитного поля в широком интервале периодов, можно построить зависимость кажущегося удельного сопротивления от периода.

Скин-слой H (глубина проникновения электромагнитной волны, на которой она затухает в $e = 2.71828$ раз) определяется через длину электромагнитной волны в земной среде:

$$H = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\sqrt{10R_a T}}{2\pi}. \quad (3)$$

Здесь H определяется в м; R_a – в Ом м; T – в секундах.

На кривых R_a и H , приведенных на двух нижних панелях рис. 3, отчетливо виден скачок величин как кажущегося удельного сопротивления, так и скин-слоя. Это указывает на наличие приповерхностной аномалии с повышенной проводимостью, на которой отмечается увеличение амплитуды электромагнитного поля.

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. Более корректное проведение вычислений по методу МТЗ предполагает включение

определенной формы аномалий проводимости в простую модель однородно слоистой земной коры. Однако цель нашей работы состоит не в изучении геоэлектрических свойств земной коры, а в исследовании особенностей электрических полей в береговых зонах.

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 [Краев, 1965; Ковтун, 1980]. 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.

Проявления берегового эффекта в вариациях электрического поля в прибрежных зонах Белого и Баренцева моря представлены на рис. 4 и рис. 5. В верхней части рис. 4 приведены записи двух горизонтальных компонент напряженности электрического поля (E_x – черный цвет, E_y – серый), зарегистрированных на ближайшем к кромке воды измерительном электроде E_{x1} (рис. 1). Используются данные E_x - и E_y -компонент, регистрируемых одновременно геофизической станцией GI-MTS-1. Нижняя кривая E_x на рис. 2, теллурическая линия для E_y -компоненты проложена параллельно берегу на расстоянии ~50 м от берега моря.

Измерительный электрод E_{g1} располагался на берегу западнее электрода E_{x1} и на том же расстоянии от береговой линии и измерял одновременно проекции E_{x1} - и E_{y1} -компонент на направление между электродами Земля 1 – E_{g1} (рис. 1). Поскольку все расстояния, разности потенциалов между электродами и угол $\alpha = 28^\circ$ в треугольнике Земля1, E_{x1} , E_{g1} нам известны, то компонента E_{y1} определяется следующим преобразованием:

$$E_{y1} = (E_{g1} - E_{x1}\cos(\alpha))/\sin(\alpha). \quad (4)$$

Для обработки выбирался интервал данных с квазисинусоидальными пульсациями типа $Pc1$ – $Pc3$, позволяющих получить качественный эллипс поляризации. Данные отфильтрованы в диапазо-

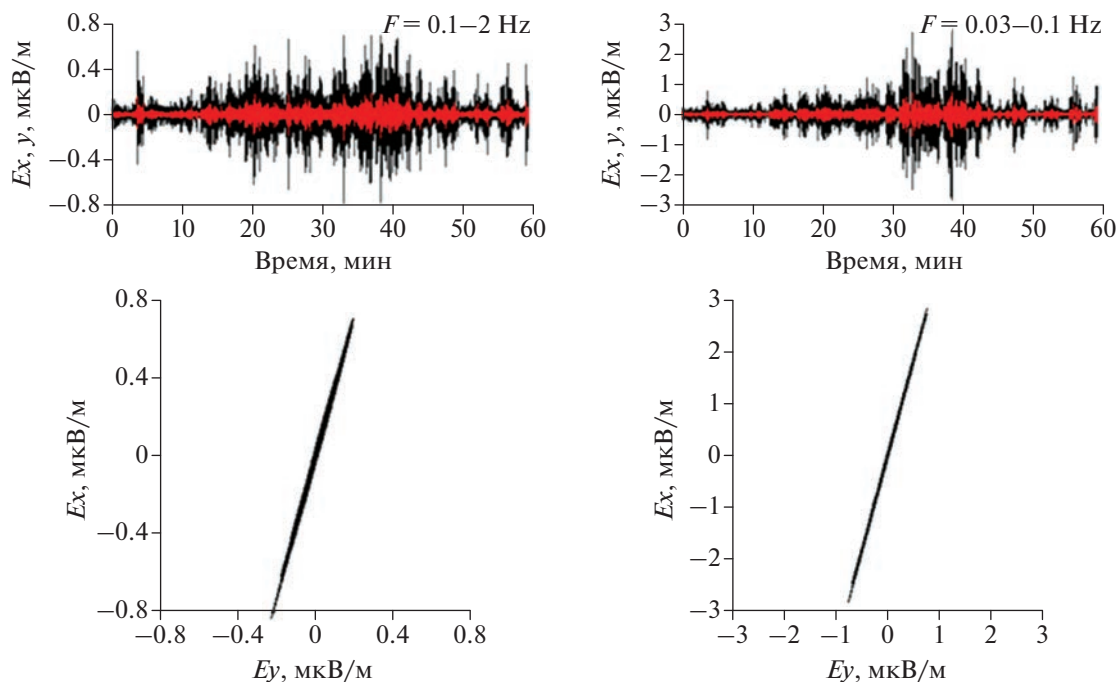


Рис. 4. Вариации электрического поля в диапазоне частот $F = 0.1-2$ Гц и $F = 0.03-0.1$ Гц и эллипсы поляризации горизонтальной компоненты переменного электрического поля ($E_x - E_y$) на берегу Белого моря. Умба, 04–05 UT 08.07.2019 г. E_x -компонента показана черным цветом, E_y – серым/красным.

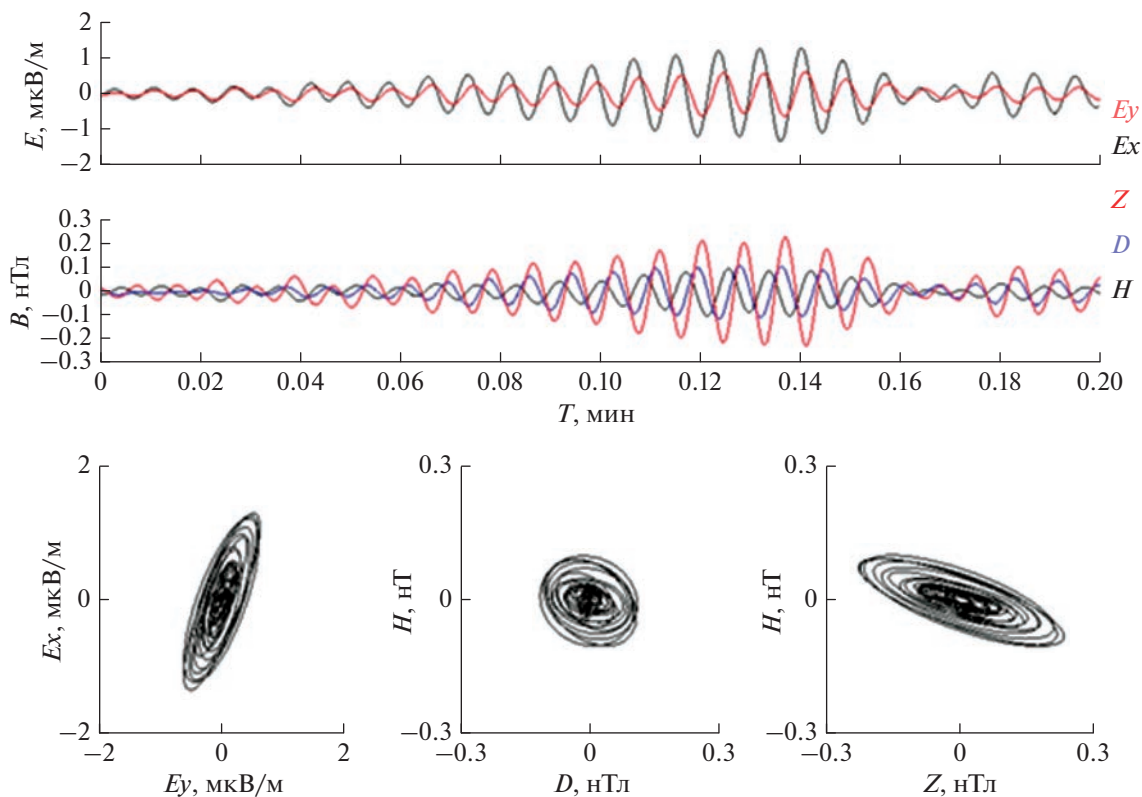


Рис. 5. Горизонтальные компоненты вариаций электрического, три компоненты вариаций магнитного поля типа $Pc4$ ($0.02-0.0067$ Гц) и эллипсы поляризации $E_x - E_y$, $H - D$ и $H - Z$ на берегу Баренцева моря, Териберка, 16.08.2017 г. E_x -компонента превосходит E_y - по амплитуде, Z -компонента по амплитуде превосходит H - и D -компоненты.

нах 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 рис. 4 показаны эллипсы поляризации ($E_x–E_y$) горизонтального переменного электрического поля на морском берегу. Из рис. 4 видно, что большая ось эллипсов поляризации в обоих случаях почти перпендикулярна береговой линии ($E_x > E_y$).

На верхней части рис. 5 представлены вариации ($F = 0.02–0.0067$ Гц) в двух горизонтальных компонентах электрического (верхняя панель) и в трех ортогональных компонентах магнитного поля (вторая сверху панель), зарегистрированные на берегу Баренцева моря, состоящего из твердых горных пород. На рис. 5 видно, что E_x -компонента превышает E_y -компоненту электрического поля и вертикальная Z -компонента магнитного поля превышает горизонтальные H - и D -компоненты. Для обработки выбран 20-минутный интервал времени, в течение которого наблюдался всплеск пульсаций типа $Pc4$ с небольшой амплитудой, но не перекрывающийся с другими всплесками. Данные получены геофизической станции GI-MTS-1, установленной на расстоянии ~ 50 м от каменистого берега. Теллурические линии прокладывались от геофизической станции ортогонально и параллельно берегу. Компонента E_x направлена ортогонально береговой линии в направлении от берега, E_y ортогональна E_x и направлена вдоль береговой линии. Измерительный электрод E_x -компоненты располагался на расстоянии ~ 10 м от кромки воды. Эллипсы поляризации $E_x–E_y$, $Y–D$ и $H–Z$ представлены в нижней части рисунка. Как и на рис. 4, на рис. 5 видно, что в принятых координатах большая ось эллипсов поляризации $E_x–E_y$ почти перпендикулярна береговой линии ($E_x > E_y$). Большая ось эллипса поляризации компонент магнитного поля $H–Z$ отражает береговой эффект в вертикальной компоненте ($Z > H$).

3. 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 (нефильтрованной) и переменной E_x -компоненте электри-

ческого 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.

Величина берегового эффекта в электрическом поле зависит от особенностей геоэлектрических неоднородностей в прибрежной зоне. Метеорологические факторы – дождь, ветер, температура воздуха оказывают влияние на плотность морского аэрозоля и проводимость прибрежной поверхности и также могут оказывать влияние на величину берегового эффекта.

В работах [Surkov et al., 2022a; 2022b] теоретически исследован электрокинетический эффект (ЭК), вызываемый длинными океаническими волнами в пористых водонасыщенных породах морского дна и берега. В районе проведения эксперимента на Белом море 16–17.07.2019 г. был небольшой шторм, и высота волн достигала 2 м. Создаваемое волнами переменное давление на морское дно играет роль поршня, проталкивающего морскую воду через породы морского дна в песчаные или пористые породы морского берега, тем самым вызывая эффект ЭК, который усиливает естественный УНЧ-электромагнитный шум в прибрежной зоне.

Результаты работы могут быть полезны геофизикам при проведении МТЗ в прибрежных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом электрического профилирования. М: “Недра”, 254 с. 1968.
- Брагин Ю.А., Коненко А.Ф., Нестерова И.И., Филиппов А.Х., Эндиков Г.И., Федоров А.Н., Янчуковский В.Л. О связи напряженности электрического поля в атмосфере с солнечными вспышками и геомагнитными явлениями // Вопросы исследования нижней ионосферы. Сб. науч. трудов. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР. С. 135–139. 1972.
- Ваньян Л.Л., Мардерфельд Б.Е., Родионов А.В. Региональный и локальный береговой эффект в геомагнитных вариациях на островных дугах Дальнего Востока // Докл. АН СССР. Т. 176. № 4. С. 820–1967.
- Жданов М.С. Электроразведка // Учебник для вузов. М.: Недра, 316 с. 1986.
- Мансуров С.М. О причинах локальности магнитных вариаций в районе Мирного // Инф. бюлл. сов. антаркт. эксп. № 2. С. 37–41. 1958.
- Мардерфельд Б.Е. Береговой эффект в геомагнитных вариациях // М.: Наука, 80 с. 1977.

- *Ковтун А.А.* Использование естественного электромагнитного поля при изучении электропроводности Земли // Л.: Изд. Ленгосуниверситета. 195 с. 1980.
- *Краев А.П.* Основы геоэлектрики. Изд. второе. Л.: Недра, 295 с. 1965.
- *Никифорова Н.Н., Ахмадулин В.А., Порай–Кошиц А.М. и др.* Глубинные магнитотеллурические исследования в Хабаровском крае // Глубинные электромагнитные исследования Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. С. 42–49. 1980.
- *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. 2695–270. 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.
- *Surkov V.V., Sorokin V.M., Yashchenko A.K.* Electrokinetic effect in porous rocks of the sea coast provided by long sea waves // Acta Geod. Geophys. V. 57. P. 397–409. 2022a.
- *Surkov V.V., Sorokin V.M., Yashchenko A.K.* Electrokinetic effect provided by long oceanic waves coming on shore // Ann.-Geophys. V. 65. № 6. 2022b.