

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.019

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ МОРСКИХ ВОЛН

В.С. Исмагилов, Ю.А. Копытенко

СПбФ ИЗМИРАН, С.-Петербург, Россия; e-mail: [ivs@izmiran.spb.ru](mailto:ivs@izmiran.spb.ru)

**Аннотация.** Приведены результаты исследований возмущений горизонтальной компоненты электрического поля в морских прибрежных зонах. Показано, что кроме естественных вариаций электрического поля ионосферно-магнитосферного происхождения возникают возмущения, связанные с морской средой. В узкой береговой полосе (~50 м) прибрежной зоны Охотского моря (о. Сахалин) выявлены возникающие в периоды отливов широкополосные возмущения электрического поля ( $F = 0.001-1$  Гц). На северном побережье Кольского п-ва (Баренцево море) обнаружено возникновение 2-3 узких гармоник вариаций электрического поля в диапазоне частот 0.2-0.5 Гц, возникающих на берегу длинного разлома, соединяющегося с морем. Гармоники изменяют свою частоту в зависимости от фазы прилива. Высокие частоты возникают во время отлива, а более низкие – во время прилива. В прибрежной зоне Белого моря (п. Умба) в диапазоне частот  $F = 0.05-0.5$  Гц выделены вариации электрического поля, созданные морскими волнами. Амплитуда этих вариаций зависит от высоты волн, максимальна возле кромки воды и быстро уменьшается с удалением от берега.

### Введение

Исследованиям электромагнитных полей над и под поверхность морской среды посвящено большое количество работ. В работах [Бычков и др., 1979], [Доронин и Степанюк, 1992] исследуется электромагнитное поле, образующееся при морском волнении в приводном слое атмосферы. [Thomson, 2009] обнаружил, что геомагнитно-индуцированное переменное электрическое поле сильно зависит от локального поверхностного импеданса, что приводит к большим амплитудам электрического поля вдоль побережья.

В упомянутых выше работах рассматривались возмущения УНЧ естественных электрических полей ионосферно-магнитосферного происхождения. В отличие от предыдущих исследований в данной работе представлены результаты исследований возмущений УНЧ электрических полей в морских прибрежных зонах Белого, Баренцева и Охотского моря созданные морской средой.

### Обсуждение результатов экспериментов

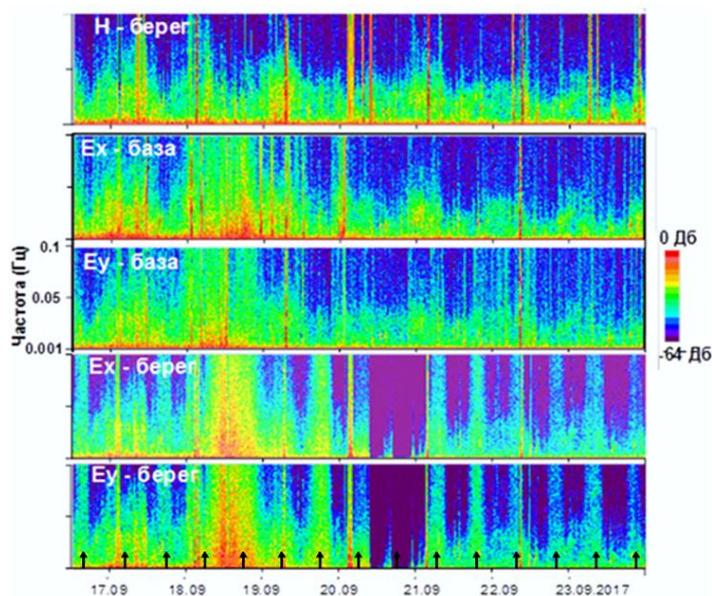
На рис. 1 для 7-дневного периода (17–23.09.2017 г.) представлены результаты экспериментальных работ на побережье Охотского моря (восточное побережье о. Сахалин). На верхней панели представлен динамический спектр горизонтальной компоненты вариаций магнитного поля ( $H$ ) в диапазоне частот  $F = 0.001 - 0.1$  Гц в точке, расположенной на берегу в ~30 м от кромки воды. На двух средних и двух нижних панелях представлены динамические спектры горизонтальных компонент вариаций электрического поля ( $E_x$ ,  $E_y$ ) в точке, удаленной от берега на ~150 м и на берегу на расстоянии 5-30 м (в зависимости от фазы прилива) от кромки воды. Экспериментальные данные регистрировались геофизическими станциями GI-MTS-1 [Сергушин и Петрищев, 2022] расположенными непосредственно на берегу и в удаленной (базовой) точке. В состав каждой станции входили две горизонтальные теллурические линии длиной ~50 м (электрические датчики  $E_x$  и  $E_y$ ) и три трехкомпонентных магнитных датчика торсионного типа, измеряющих индукцию магнитного поля.  $E_x$  компонента устанавливалась ортогонально берегу, а  $E_y$  компонента – вдоль берега. Среднеквадратическая погрешность регистрируемой индукции магнитного поля составляет <10 пТл на частоте 1 Гц, разности потенциалов электрического поля – <0.02 мкВ.

Слой атмосферы над морем является сильно ионизированной средой. Ионизация создается за счет поверхностных эффектов - из-за разрушения пузырьков на поверхности, срыва аэрозоли ветром с вершечек волн, воздействием ультрафиолета, испарением морской воды, дроблением капель при обрушении волн на берег и другими процессами [Кондратьев, 2005]. Значительным фактором ионизации аэрозоли в береговой зоне является наличие радиоактивных минералов в прибрежной почве не покрытой слоем морской воды.

Земля заряжена отрицательно, поэтому отрицательные заряды стремятся вверх вдоль вертикальной компоненты электрического поля Земли (~130 В/м), а положительные заряды оседают на морскую поверхность и сносятся ветром на берег и в небольшом слое над земной поверхностью возникает ~20% превышение содержания положительных зарядов (~ $10^{10}/\text{м}^3$ ) над отрицательными [Кондратьев и др., 1983]. В зоне проведения эксперимента на Сахалине во время отливов происходило обнажение песчано-каменистого морского дна на большой площади. Усиленное испарение воды и естественная радиация, которую теперь не поглощает морская вода, приводят к повышению концентрации морской аэрозоли и ее ионизации в береговой

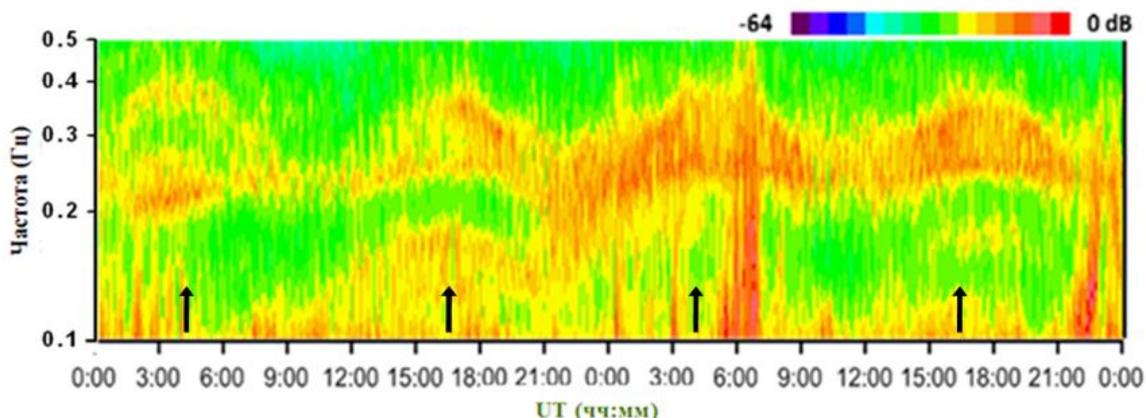
зоне [Кондратьев, 2005]. Следовательно, в периоды отливов в приземном слое атмосферы концентрация избыточных положительных зарядов также возрастает.

Наблюдаемые на береговом пункте интервалы возникновения широкополосных УНЧ возмущений электрического поля (две нижние панели на рис. 1) совпадают с временными интервалами отливов и, по-видимому, возникают при перемещении под воздействием ветра объемов воздуха с неоднородной плотностью положительных электрических зарядов над электродами теллурических линий.



**Рисунок 1.** Динамические спектры горизонтальных компонент вариаций электрического и магнитного поля на береговых и базовых точках в диапазоне частот  $F = 0.001 - 0.1$  Гц. Сахалин, 17 – 23.09.2017 г. Моменты отливов на рис. 1 указаны черными стрелками.

На рис. 2 представлен динамический спектры плотности мощности  $E_y$  горизонтальной компоненты вариаций электрического поля в диапазоне частот  $F = 0.1 - 0.5$  Гц, построенный за двухсуточный период по данным, зарегистрированным на берегу Баренцева моря (мыс Териберский) в 2017 г. В этом эксперименте на каменистом берегу Баренцева моря электрод заземления располагался на расстоянии  $\sim 60$  м от береговой кромки. Теллурические линии длиной  $\sim 50$  м были протянуты от электрода заземления вдоль береговой линии в направлении запад-восток ( $E_y$  компонента) и юг-север ( $E_x$  компонента). Измерительный электрод  $E_y$  располагался на расстоянии  $\sim 50$  м от морского берега на кромке сообщающегося с морем длинного узкого разлома шириной 5 - 10 м ориентированного почти ортогонально к береговой линии.



**Рисунок 2.** Динамический спектр ( $F = 0.5-0.1$  Гц) горизонтальной компоненты вариаций электрического поля ( $E_y$ ) в точке, расположенной на берегу разлома. Мыс Териберский, 14 – 15.08.2017 г. Черные стрелки – моменты максимальных отливов.

В период сильного морского волнения были зарегистрированы вариации электрического поля с узкими частотными полосами. На рис. 2 отчетливо видно возникновение двух-трех узкополосных гармоник вариаций электрического поля в диапазоне частот 0.25-0.35 Гц. Гармоники изменяют свою частоту в зависимости от фазы прилива. Частота повышается в период отлива и понижается во время прилива. Морские волны – случайный процесс, создающий электрическое поле с достаточно широким спектром. По-видимому, когда волны из открытого моря непрерывно приходят в разлом, могут возбуждаться стоячие колебания поверхности воды (суперпозиция встречных гравитационных волн) поперёк разлома. При приливе расстояние между стенками разлома и слой воды в нем возрастает и период этих колебаний уменьшается, при отливе – увеличивается. Уровень приливов составлял ~4.2 м, что, вероятно, способствовало заметному изменению величин частотных мод.

В период эксперимента 2019 г. на северном берегу Белого моря (п. Умба) шесть измерительных электродов устанавливались вдоль линии ортогональной берегу с шагом 5 м. Схема эксперимента показана на рис. 3. Ближайший к кромке воды электрод 1 располагался на расстоянии 5 – 10 м от берега (в зависимости от фазы прилива высотой ~2.2 м). Самый удаленный электрод 6 располагался на расстоянии ~35 м от береговой линии. Заземляющий электрод для всех измерительных электродов располагался на расстоянии ~60 м от кромки воды.

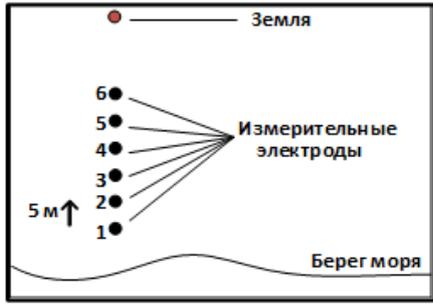


Рисунок 3. Схема эксперимента на Белом море. Умба, 2019 г.

На верхней кривой рис. 4 приведена разность потенциалов между самым удаленным от кромки воды измерительным электродом 6 и заземлением, фильтрованная в диапазоне частот  $F = 0.05 - 0.5$  Гц. Расстояния до кромки воды указано над кривыми. Пять нижних кривых на рис. 4 являются разностью в том же диапазоне частот

$$d\Phi_j = \Phi_6 - C_j\Phi_j \quad (1)$$

где  $\Phi_6$  – среднее за двухсуточный период значение разности потенциалов между заземлением и самым удаленным от кромки воды электродом;  $\Phi_j$  – среднее за тот же период значение разности потенциалов электрического поля, измеренное между заземлением и пятью ближайшими к берегу электродами ( $j=1 \div 5$ ) – пять нижних кривых на рис. 4;  $C_j$  – вычисленные коэффициенты компенсации, позволяющие удалить естественные вариации внешнего электрического поля и выделить поле морских волн.

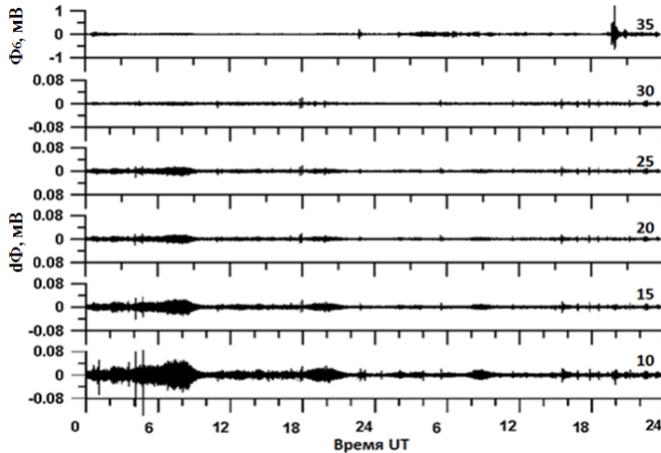
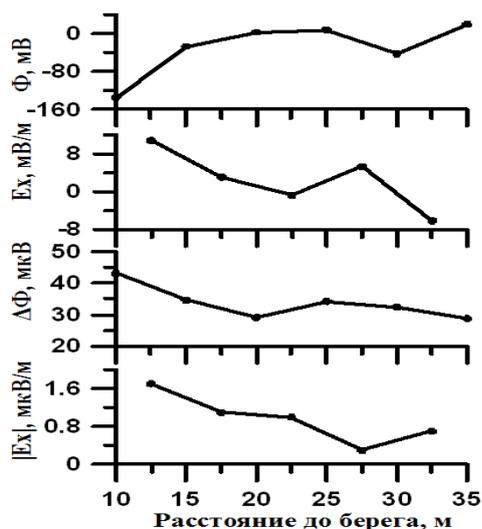


Рисунок 4. Величина разности потенциалов электрического поля ( $F = 0.05 - 0.5$  Гц) в зависимости от расстояния до кромки морской воды. Умба, 08-09.07.2019 г. Верхняя кривая – разность потенциалов между электродом 6 и заземлением. Пять нижних кривых – разность потенциалов между парами соседних электродов. Расстояние от кромки воды указано над кривыми.

Подставляя коэффициенты  $C_j$  в (1) получаем поле, очищенное от естественных полей ионосферного происхождения – нижние пять кривых на рис. 4. Применение формулы (1) основано на том, что градиент электромагнитного поля сильного, но удаленного источника (ионосферного происхождения) много меньше градиента слабого, но близкого источника. Из рис. 4 видно, что электрическое поле быстро уменьшается с удалением от берега.

Измеренная исходная разность потенциалов ( $\Phi_{и}$ ) между шестью электродами и заземлением (нефильтрованная) представлена на верхней кривой на рис. 5 в зависимости от расстояния до кромки воды. Для построения второй сверху кривой на рис. 5 использованы данные, представленные на рис. 4 (пять нижних кривых) и все пять точек на кривой являются среднеквадратичными значениями разности потенциалов ( $\Delta\Phi$ ) между заземлением и всеми измерительными электродами в частотном диапазоне  $F = 0.05 - 0.5$  Гц за двухсуточный период 08-09.07.2019 г.



**Рисунок 5.** Разность потенциалов и электрические поля в прибрежной зоне. Умба, 08-09.07.2019 г.

На рис. 5 представлены исходная разность потенциалов ( $\Phi$ ) и электрическое поле  $E_x$  между электродами и заземлением представлены на двух верхних кривых, среднеквадратичная амплитуда вариаций разности потенциалов между заземлением электродами ( $\Delta\Phi$ ) и величина модуля горизонтального электрического поля ( $|E_x|$ ) в полосе частот  $F = 0.05 - 0.5$  Гц в зависимости от расстояния до кромки воды (нижние кривые). Две верхние кривые на рис. 5 показывают наличие локальной геоэлектрической аномалии на расстоянии 25–30 м от берега. Значение среднеквадратичной величины электрического поля определяется как производная разности потенциалов между парами электродов [Бердичевский, 1968]:

$$E_x = -\partial \Delta\Phi / \partial x \quad (2)$$

Здесь  $\Delta\Phi$  – разность потенциалов между парами измерительных электродов (1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6), определенная по верхней кривой на рис. 5.

### Заключение

Представлены результаты исследований возмущений УНЧ электрических полей, созданных морской средой в различных морских прибрежных зонах.

В прибрежной зоне Охотского моря в узкой береговой полосе обнаружены возникающие в периоды отливов широкополосные ( $F=0.001-0.1$  Гц) возмущения горизонтальной компоненты электрического поля. При усилении ветра эти возмущения в электрическом поле возникают как на берегу моря, так и на точке, удаленной от берега на расстояние ~150 м. В магнитном поле такие возмущения не наблюдаются. В береговой зоне Баренцева и Белого моря такие возмущения электрического поля не наблюдаются что, вероятно, связано с небольшими площадями обнажения морского дна и более низкими температурами воздуха, что не способствует испарению воды и увеличению избыточных положительных зарядов в приповерхностной атмосфере.

На побережье Баренцева моря обнаружено возникновение узких гармоник вариаций электрического поля в диапазоне частот 0.25-0.35 Гц, изменяющих свою частоту в зависимости от фазы прилива.

На северном берегу Белого моря в диапазоне частот  $F = 0.05-0.5$  Гц выполнена компенсация естественных УНЧ возмущений и выделены вариации электрического поля, созданные морскими волнами. Амплитуда этих вариаций максимальна возле кромки воды и уменьшается с удалением от берега.

### Список публикаций

- Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом электрического профилирования // Труды НИИЗМ, М., 250 с., 1968.
- Бычков В.С., Жмур В.В., Лапшин В.Б. Об электромагнитных эффектах при колебаниях заряженной поверхности моря // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 19, № 4, С. 15-18, 1979.
- Доронин Ю.П., Степанюк И.А. Электромагнитное поле океана // Учебное пособие СПб, изд. РГГМИ, С.87, 1992.
- Кондратьев К.Я. Свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля // СПб, изд. ВВМ, 312 с., 2005.
- Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль // Л, Гидрометеоздат, с.283, 1983.
- Сергушин П.А., Петрищев М.С. Геофизическая станция GI-MTS-1 и возможности её 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.
- Thomson A.W., McKay A.J., Viljanen A. A review of progress in modelling of induced geoelectric and geomagnetic fields with special regard to induced currents // Acta Geophys. 57(1), P. 209–219, 2009.