

**УДК 577.3**

*И. А. Степанюк*

## **ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ЭМ-ПОЛЕЙ В ПРИВОДНОМ СЛОЕ НАД МОРЕМ КАК ФАКТОР ЭКОЛОГИИ ГИДРОБИОНТОВ**

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ**

Генерация свободных зарядов морской поверхностью в условиях волнения приводит к тому, что в приводном слое формируется статистически устойчивое распределение этих зарядов по вертикали [1]. При этом поверхность моря имеет отрицательный потенциал по отношению к потенциалу воздуха. Если не учитывать статическое электрическое поле атмосферы, то устойчивое распределение получается при условии, если вертикальный профиль потенциала создаваемого в воздухе отрицательно заряженной поверхностью, соответствует аналогичному профилю положительного потенциала, формируемого в этом же слое распределенными свободными зарядами. Для такого условия минимальны кулоновские силы. При этом заряд поверхности должен быть уравновешен полным зарядом приводного слоя. Ввиду того, что источник генерации непрерывно функционирует, полный заряд системы в условиях волнения должен возрастать вплоть до значений, когда напряженность электрического поля в системе становится такой, что препятствует процессу дальнейшего разделения зарядов по вертикали, обеспечивая одинаковую интенсивность этого процесса разделения и сопутствующего ему процесса релаксации на поверхности.

Поскольку оба процесса пространственно разделены (источником генерации являются преимущественно вершины волн), то закономерно возникают замкнутые системы электрического тока, привязанные к отдельным волнам и перемещающиеся с ними. В силу гидродинамических причин – формированием вихрей на подветренных склонах (например – “кошачьи глаза” Тейлора [2] ) – эти системы возбуждают вариации магнитного поля с преимущественно вдольребневым компонентом.

В среднем по акватории эти аномалии нивелируются и в целом поверхность моря в сочетании с приводным слоем в условиях волнения можно рассматривать как некоторую эквивалентную заряженную емкость – плоскопараллельный конденсатор, одна из обкладок которого (приводный слой) является диффузной. При этом уместны аналогии с двойным электрическим слоем, характерным для электрохимических контактов, например, металл-морская вода, где диффузная обкладка заряженной емкости распределена в воде в слое толщиной 100-200 мкм. Отличие здесь, естественно, состоит в масштабах явления.

В силу указанной аналогии, а также и из общих электрофизических соображений, можно ожидать, что прохождение переменного электромагнитного поля через подобную заряженную емкость сопровождается эффектом частичного выпрямления (точнее – детектирования) с выделением сверхнизкочастотного амплитудно-модулирующего сигнала. Такой процесс известен для электрохимических двойных слоев, например, типа металл-вода [3], где получил название редоксокинетического эффекта, однако там он связан преимущественно с различиями коэффициентов анодной и катодной реакций и результирующей нелинейностью условий поляризации. В нашем же случае этот эффект обуславливается нелинейностью взаимодействия поля с диффузной частью системы.

Представим, что в области приводного слоя действует внешнее поле с вертикальной ориентацией вектора  $E_{эм}$ . Когда вектор  $E_{эм}$  (рис.1) направлен сверху вниз (1), кулоновские силы, действуя на свободные заряды в диффузной части, приводят к частичному “сжатию” этой части и к уменьшению заряда системы вследствие релаксации на границе раздела. При противоположном направлении вектора  $E_{эм}$  (2) происходит незначительное “растяжение” слоя (незначительное потому, что  $E_{эм} \ll E_{ст}$  – статической напряженности электрического поля внутри системы), а заряд при этом остается неизменным.

Для переменного внешнего (из атмосферы) амплитудно-модулированного электромагнитного поля (АМ ЭМП), имеющего частоту  $\omega_{эм}$ , условия прохождения через приводный слой удобнее всего рассматривать с помощью адмитанса – комплексной проводимости. Для упрощения задачи активной частью проводимости пренебрегаем. В таком случае адмитанс слоя  $Y_c$  можно определить как

$$Y_c = j \omega_{эм} C_{эkv} \quad (1)$$

где  $C_{эkv}$  – эквивалентная емкость системы

В общем случае  $C_{эkv} = F(E_n)$ , где  $E_n$  – полная напряженность действующего в системе электрического поля. Учитывая зависимость от направления вектора внешнего поля, качественно рассмотренную выше, можно записать:

$$C_{эkv} = f(E_n) \text{sign}(E_{эм}) \quad (2)$$

где  $\text{sign}(E_{эм})$  – функция направления вектора  $E_{эм}$ .

Пренебрегая “растяжением” слоя, в ситуации (2) можно считать  $\text{sign}(E_{эм}) = 1$ . Для обратной ситуации (1) представим функцию  $\text{sign}(E_{эм})$  в виде

$$\text{sign}(E_{эм}) = \exp[-\alpha_{\omega} E_{эм}], \quad (3)$$

где  $\alpha_{\omega} = \psi(1/\omega_{эм})$  – коэффициент, характеризующий кулоновские взаимодействия в слое и являющийся обратной функцией частоты.

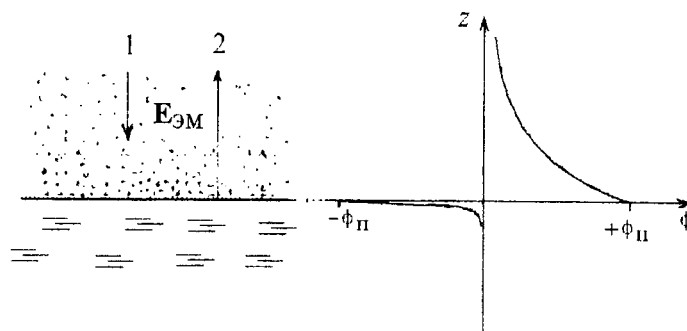


Рис. 1. Схема прохождения АМ ЭМП через приводной слой

Вид функции  $\text{sign}(E_{\text{эм}})$  качественно показан на рис.2, где положительные значения  $E_{\text{эм}}$  соответствуют направлению вектора  $E_{\text{эм}}$  сверху вниз (см. рис.1).

В области малых сигналов  $E_{\text{эм}}$ , т.е. когда амплитудное значение  $E_{\text{эм}}^m \ll E_{\text{ст}}$ , можно считать  $f(E_{\text{п}}) = \text{const} = Q_{\text{сл}} / E_{\text{ст}}$ . Тогда адмитанс слоя для проходящей волны:

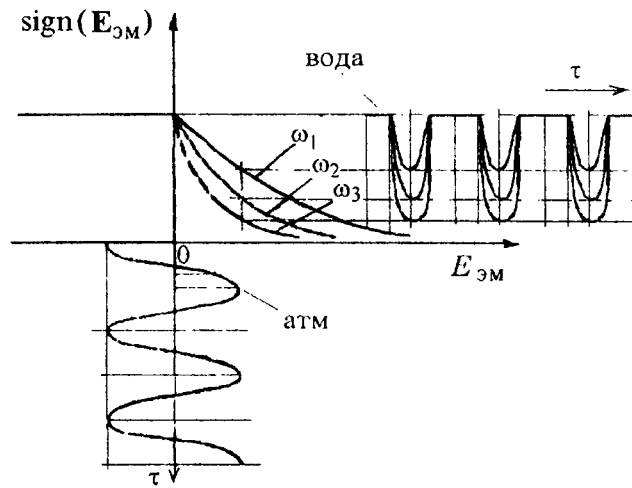
$$Y_c = (j \omega_{\text{эм}} Q_{\text{сл}} / E_{\text{ст}}) \text{sign}(E_{\text{эм}}) \quad (4)$$

где  $Q_{\text{сл}}$  – полный заряд системы приводного слоя.

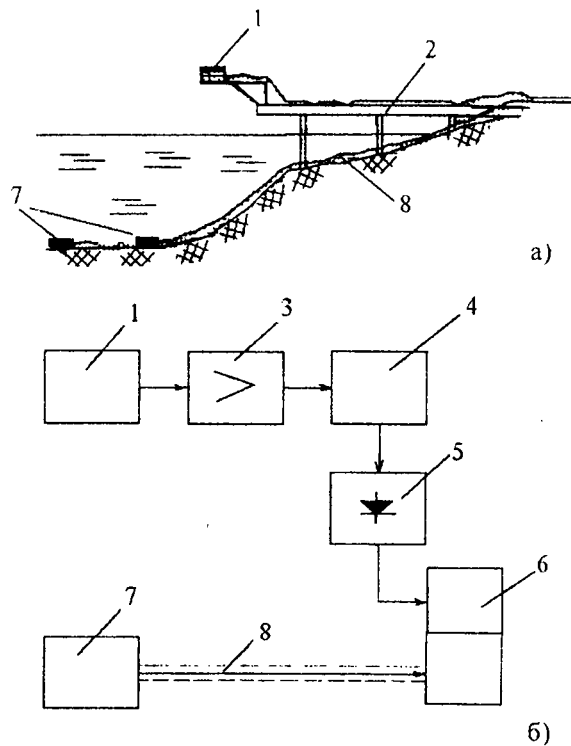
В результате того, что в выражение для адмитанса входит нелинейная функция, получается, что волна  $E_{\text{эм}}$  частично выпрямляется, что качественно показано на рис. 2, а при наличии амплитудной сверхнизкочастотной модуляции – детектируется. При этом, в силу зависимости  $\alpha_{\omega} = \psi(1/\omega_{\text{эм}})$  эффект проявляется преимущественно в области крайних низких частот (КНЧ) и мало существенен в области радиочастот ( $\alpha_{\omega} \rightarrow 0$  а  $\text{sign}(E_{\text{эм}}) \rightarrow 1$ ).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотренный эффект подтвержден экспериментально в природных условиях при исследовании естественных электромагнитных полей, возбуждаемых облачностью. Регистрация поля проводилась в прибрежной зоне Баренцева моря (б. Дальние Зеленцы) по двум синхронным каналам (рис. 3). Измерительный преобразователь поля 1 контрольного канала располагался на высоте 5 м над поверхностью моря на оконечности эстакады 2. Преобразователь был выполнен в виде многовитковой катушки с ферромагнитным сердечником ( $w=5 \cdot 10^4$ , сердечник 600 НН размерами 60 x 60 x 500 мм). Экранированный кабелем преобразователь соединялся с устройством измерения и регистрации (рис.3 б), содержащем усилитель 3, полосовой фильтр 4, настроенный на диапазон 3-30 Гц, схему линейного детектирования 5, выполненную на основе двух операционных усилителей, и самописец 6. Измерительным преобразователем второго (подводного) канала являлась линия (электрическая подводная антенна) с двумя неполяризуемыми электродами 7. С помощью экранированного кабеля 8 линия подключалась ко второму каналу самописца 6.



ис. 2. Схема формирования эффекта детектирования при прохождении АМ ЭМП системы приводного слоя



ис. 3. Схема постановки эксперимента по выявлению эффекта детектирования и функциональная схема измерительного комплекса

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При прохождении над пунктом наблюдений фронтальной облачности, возбуждающей амплитудно-модулированное электромагнитное поле в диапазоне частот 3-30 Гц, синхронная регистрация по описанным принципиально различным каналам показала наличие устойчивой корреляции сигналов (рис. 4). Поскольку подводный сигнал  $E_x$  регистрировался без детектирования в измерительной цепи, то это однозначно подтверждает эффект детектирования в приводном слое. Эксперименты проводились при состоянии поверхности моря 4 балла.

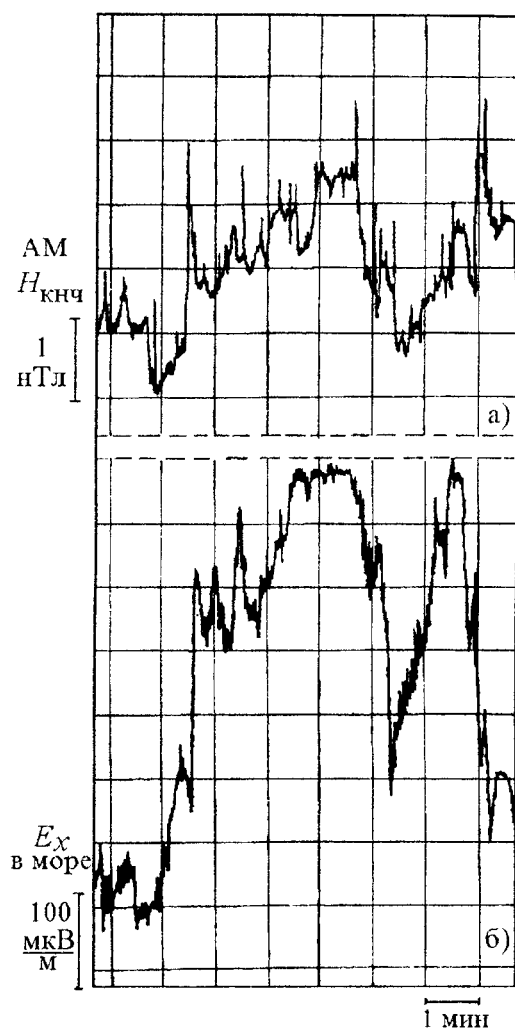


Рис. 4. Фрагмент синхронной записи по параллельным каналам измерительного комплекса

Соответствие подводного сигнала, зарегистрированного без искусственного детектирования, сигналу амплитудной модуляции АМ ЭМП, выделенному надводным каналом, оценивалось путем кросс-спектрального анализа (рис.5). По

АМ-составляющей в диапазоне периодов примерно 1,5–3,0 мин, выделяемых в отдельных спектрах, наблюдается очень высокое соответствие в кросс-спектре при значениях функции когерентности до 0,65, соответственно, при коэффициенте корреляции примерно 0,8 (расчеты выполнены О.М.Гороховой).

Выявленный эффект детектирования имеет большое прикладное значение в рамках проблемы получения информации об источниках ЭМП, находящихся в атмосфере, в частности, о приближающихся циклонах и о конвективной облачности. Действительно, как следует из ряда ранее полученных результатов (например [4]), информация об облачности заключена преимущественно в огибающей возбуждаемых в облаках сигналов в КНЧ-диапазоне, т.е. в характере амплитудной модуляции. Естественно, диапазон частот модуляции существенно ниже КНЧ-диапазона несущих частот. При наличии частичного детектирования в приводном слое в условиях волнения в водную толщу проникает фактически совокупность двух полей: исходного амплитудно-модулированного поля на несущих частотах КНЧ-диапазона и выделенного приводным слоем поля в диапазоне частот амплитудной модуляции.

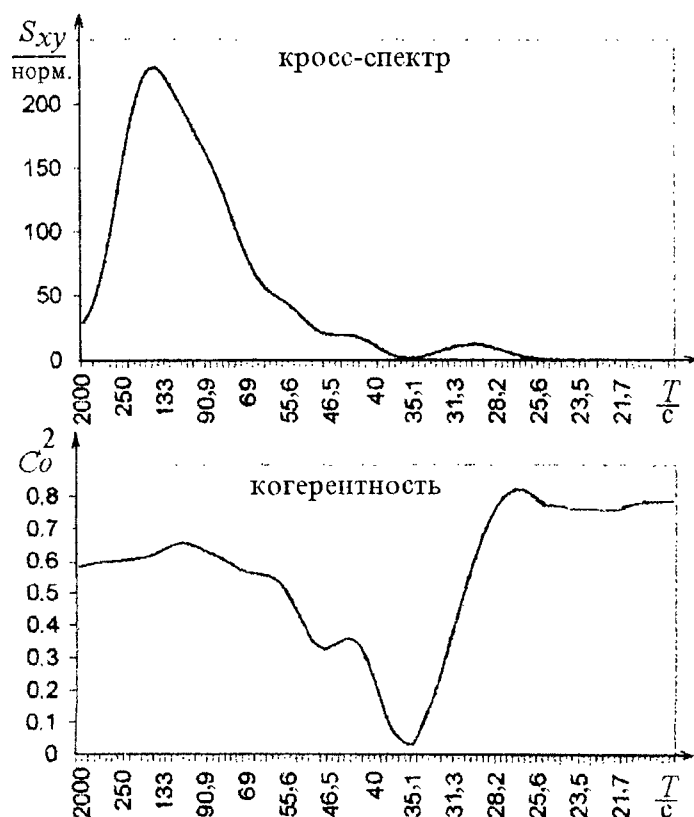


Рис. 5. Кросс-спектральные характеристики надводного и подводного сигналов

В силу известной зависимости коэффициента затухания от частоты электромагнитного поля, проникающего в водную толщу, выделенная приводным слоем часть поля проходит значительно глубже, чем исходная. Тем самым, регистрация информации об источниках поля в атмосфере может производиться на повышенных глубинах (до  $10^3$  м).

### **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ**

Выявленный эффект, по-видимому, с успехом используется морскими животными для получения информации, особенно, животными, находящимися на повышенных глубинах. Для выявления возможности такого непосредственного восприятия информации о процессах на поверхности были проведены физиологические эксперименты с баренцевоморскими скатами *Raja radiata*. Эксперименты проводились совместно с сотрудниками Мурманского морского биологического института (Муравейко В.М.) и Института физиологии им. Павлова (Броун Г.Р.).

При проведении экспериментов наркотизированное животное жестко фиксировалось в экспериментальном аквариуме береговой лаборатории, а через его жаберы пропускалась проточная морская вода с температурой  $2-4^{\circ}$  С. Исследовалась импульсная активность одиночных нервных волокон, связанных с электрочувствительными органами – ампулами Лоренцини. Методика отведения биопотенциалов от одиночных волокон соответствовала общепринятой [5] и состояла в том, что выделенное и перерезанное волокно отводилось от животного и помещалось в отдельную чашечку, заполненную раствором КСl. В эту же чашечку опускался приемный электрод. Потенциалы действия, воспринимаемые приемным электродом, через катодный повторитель подавались на усилитель биопотенциалов, контролировались на экране осциллографа и одновременно подавались на вход интегратора для формирования сигнала скользящей средней частоты импульсации нервного волокна. Этот сигнал регистрировался на одном из каналов скоростного самописца.

Электрическое поле, формирующееся под водой в бухте, воспринималось электрической линией с неполяризуемыми электродами на концах (по схеме подводного канала) и по экранированному кабелю подавалось в аквариум через согласующие цепочки резисторов, подбираемые так, чтобы напряженность поля (мкВ/см) в аквариуме, воздействующая на животное, была равна реальной напряженности поля в бухте. Направление поля в аквариуме соответствовало оси тела животного. Одновременно вариации электрического поля регистрировались на синхронном канале самописца.

На третьем канале самописца регистрировался детектированный сигнал вариаций магнитного поля в диапазоне 3-30 Гц в соответствии со схемой контрольного канала на рис. 3.

Опыты проводились при прохождении фронтальной облачности циклона над пунктом наблюдений. Состояние поверхности моря оценивалось в 4 балла по общепринятой шкале.

На рис.6 показан пример синхронной регистрации сигналов, из которого следует, что скаты *Raja radiata* способны воспринимать ампулами Лоренцини

продетектированную в приводном слое часть электромагнитного поля, возбуждаемого облачностью, и тем самым опосредовано получать информацию об изменениях гидрометеорологических условий во внешней среде.

Биологическая роль такого механизма получения информации, на наш взгляд, состоит в следующем. Морские животные литоральной и сублиторальной зон моря, особенно столь малоподвижные как скаты *Raja radiata*, воспринимая прогностическую информацию о приближении циклона (в диапазоне 6-8 Гц), покидают прибрежную зону и уходят на глубину, избегая зоны действия поля этих частот (см. например [6]). Но при этом они лишаются источника информации, если не предполагать что заменой прежнему источнику (6-8 Гц) становится продетектированная часть поля, проникающая на значительно большую глубину. Поскольку уровень напряженности этой части таков, что воспринимается животными (это доказано выполненными экспериментами), то ее наличие обуславливает подавление стимула возвращения животного в прибрежную зону, а прекращение действия говорит о возможности возвращения. Иной поведенческой логики, например, периодических перемещений на меньшие глубины (зондирование возможностей возвращения) трудно ожидать от столь малоподвижных животных как скаты.

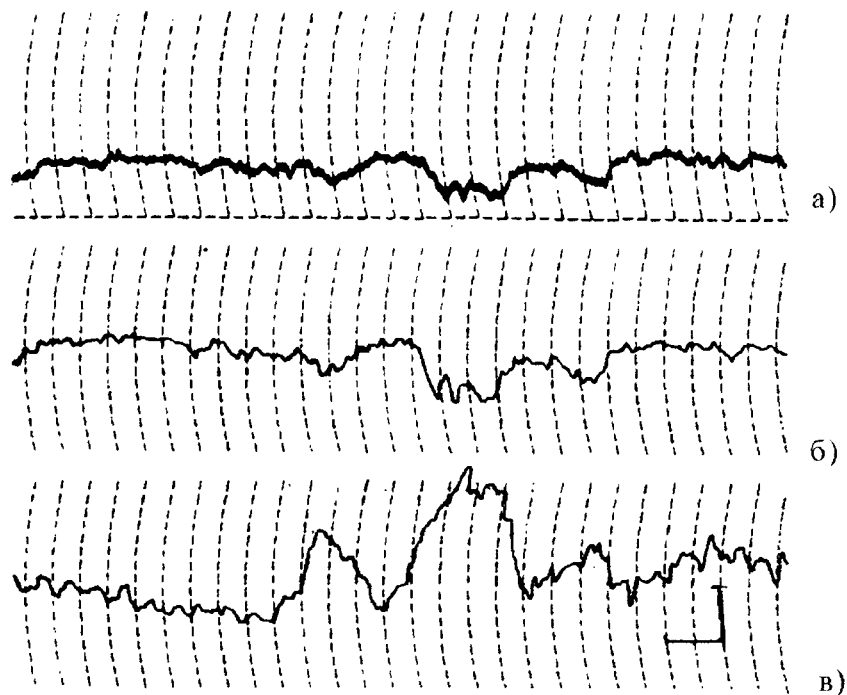


Рис. 6. Фрагмент синхронной регистрации интегральной импульсной активности ампул Лоренцини скатов (а), электрического поля в воде (б) и АМ-составляющей ЭМП (в)



### Список литературы

1. Степанюк И.А. Формирование вариаций электрического поля в приводном слое атмосферы в условиях волнения // Моделирование и экспериментальные исследования гидрологии шельфовых морей: Сборник научн. работ.– Вып. 100.– Л.: Изд-во ЛГМИ, 1988.– С. 135–142
2. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере.– М.: Мир, 1978.– 532 с.
3. Степанюк А.И. Источники и пути электромагнитного загрязнения прибрежных вод: Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук.– СПб.: изд. РГМУ, 2000. – 20 с.
4. Муравейко В. М., Степанюк И.А. К вопросу о возможном механизме предчувствия морскими животными биологически важных геофизических явлений // Морфофизиологические аспекты изучения рыб и беспозвоночных Баренцева моря: Сб. научн. трудов.– Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1982.– С. 85–92.
5. Муравейко В. М. Электросенсорные системы животных.– Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1988.– 108 с.
6. Муравейко В. М., Степанюк И.А. Электромагнитные поля циклона и их действие на рыб // Сигнализация и поведение рыб. Сб. научн. трудов.– Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1985.– С. 19–24.

*Поступила в редакцию 15.06.2002 г.*