

УДК 534.222:681.883

Физические основы современных низкочастотных технологий дистанционного мониторинга объектов морской биосферы и их теоретические объяснения

Павел А. Стародубцев*

Светлана В. Гуторова†

Роман Н. Алифанов‡

ТОВМИ имени С.О.Макарова,
Днепровский пер.7, Владивосток, 690006,

Россия

Получена 07.12.2008, окончательный вариант 02.03.2009, принята 05.05.2009

В работе представлены результаты теоретических исследований физических моделей и технологических решений, объясняющие процесс взаимодействия низкочастотных сигналов с физическими явлениями и объектами в морской среде для проведения широкомасштабного научного мониторинга океанской среды с целью выявления физических параметров их пространственного обнаружения.

Ключевые слова: низкочастотные технологии дистанционного мониторинга, объекты морской биосферы.

Для мониторинга морских акваторий в целях изучения гидрологических условий, состояния морской биосферы используются в основном гидролокаторы и эхолоты звукового диапазона частот, имеющие небольшие дальности их обнаружения. Неоднократно предпринимались попытки проведения научного мониторинга протяженных акваторий, изучения характеристик дна путем использования низкочастотных сигналов (НС). Они проводились на экспериментальной морской базе СКБ САМИ ДВО РАН в зимний период с 1987 по 1989 гг. прошлого столетия. Данный акустический эксперимент выполнялся на Всероссийском научном уровне, поэтому достаточно детально обсуждался, планировался и хорошо обеспечивался. В его проведении участвовали авторы. Разработка и оборудование просветной гидроакустической измерительной линии о. Итуруп – м. Левенорна (о. Сахалин), как универсального измерительного инструмента гидроакустических и гидрофизических полей, создаваемых рыбными косяками (РК), проводились также с участием авторов.

Но отсутствие физических моделей и технологических решений, объясняющих процесс взаимодействия НС с РК не дали положительных результатов в решении этой научной задачи.

К физическому объяснению данной проблемы ближе всех подошел в 2003 г. профессор прикладной механики Николс Макрис из Северо-Восточного Университета США.

Он испытал разработанную им систему удаленных датчиков, позволяющую отслеживать изменения морской среды на площади более 10 000 км². В начале исследований он пытался с помощью этого прибора изучать характеристики морского дна, определять местонахождение древних русел рек на дне океана. Но после того как были получены их изображения, выяснилось, что они сильно искажены. Физическое объяснение этого явления оказалось

*e-mail: spa1958@mail.ru

†e-mail: uen@mail.ru

‡e-mail: gidra 518@mail.ru

© Siberian Federal University. All rights reserved

очень простым, это были рыбные скопления (РК), а именно десятки миллионов особей. Впервые, на дистанции более 500 км, им были получены изображения, сформированные РК [1].

К сожалению, из всего достаточно интересного экспериментального материала, полученного Николсом Макрисом, не были опубликованы в периодических изданиях пояснения физических основ и технологии наблюдаемого процесса. Поэтому авторы сочли необходимым дать свое объяснение физики представленного эксперимента [2].

Первое: условия облучения водной среды НС в данном эксперименте, их взаимодействие с РК (другими объектами в морской среде или на морском дне) по физике процессов, протекающих в морской среде, и технологии построения полностью соответствуют характеристикам бистатической локации, когда на приемнике анализируются прямые и переизлученные пассивной моделью РК сигналы [2].

Второе: отдельные элементы РК и сформированные ими физические объекты хорошо представляются фрактальными структурами, состоящими из конечного числа самоподобных элементов [2].

Третье, и самое интересное, в этой цепочке предположений является ответ на вопрос: по каким физическим процессам и параметрам можно обнаружить „фрактальные модели“ или результаты их воздействия на водную среду на расстоянии в 500 км движущейся горизонтальной приемной антенной (рис. 1)[2]?

Четвертое, проведенный авторами анализ результатов своих численных исследований вертикальных сечений геометрических фрактальных моделей РК в морской среде показал, что с близкого расстояния они похожи на грампластинку (рис. 2), т.е. они как бы расслоены на тысячи отдельных узких колечек с темными прогалинами между ними. По физике формирования это соответствует кольцевым структурам, существующим около некоторых планет солнечной системы.



Рис. 1. РК как фрактальная структура, состоящая из конечного числа самоподобных элементов

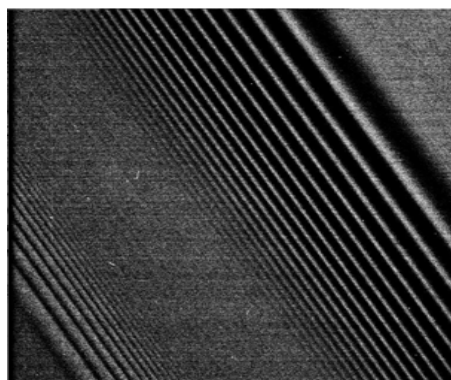


Рис. 2. Круговые вертикальные волны плотности [2].

Вследствие движения этих прогалин происходит изменение вертикальной стратификации водной среды и возникают "вертикальные круговые волны плотности" от спирали Архимеда (рис. 3), являющиеся первым физическим параметром для мониторинга морских

акваторий в целях изучения гидрологических условий, состояния морской биосферы и позволяющие выделять их частотные составляющие. Физическая основа такой тонкой структуры может быть объяснена тем, что равномерное распределение отдельных элементов РК по плоскости колец механически неустойчиво. Это происходит по следующей причине: интервал значений хаотических скоростей (дисперсия скоростей) у больших объектов значительно больше, чем меньших. Поэтому большие объекты более чувствительны к флуктуациям гравитационного притяжения Земли и радиальной скорости. Затем, скатываясь в потенциальную яму спирального рукава, они увеличивают скорость своего хаотического движения по крайней мере вдвое, что приводит к увеличению их пространственной плотности.

В результате значительно возрастает частота взаимного столкновения отдельных объектов, увеличивается интенсивность их взаимодействия с водной средой, и все это инициирует изменение горизонтальной стратификации водной среды и образование круговых горизонтальных волн плотности малой интенсивности, являющихся следующим физическим параметром для широкомасштабного мониторинга морских акваторий в целях изучения состояния РК в гидрологических условиях [2].



Рис. 3. Вид спирали Архимеда в морской среде [2]

Очень интересное физическое явление, подтверждающее данный вывод, возникает в процессе слияния двух РК. Графически оно напоминает собой две спирали Архимеда, где отдельные элементы РК стремятся заместить объемы противоположных структур.

После рассмотрения данных предположений и теоретических выводов о влиянии на водную среду РК можно вполне объективно утверждать, что поле воздействия от них в ближней зоне и сами волны плотности сильно зависят от деталей обтекания РК, как элементов фрактала, или от формы фрактальной модели [2]. Сопротивление формы, как и сопротивление трения, обусловлено вязкостью воды и зависит от конфигурации движущихся в ней фрактальных моделей.

Таковы, с точки зрения авторов, физика и современное технологическое решение широкомасштабного мониторинга морских акваторий и его теоретические объяснения как в ближней ($Nt \sim 1$) [2, 3], так и в дальней зоне ($Nt > 20$) (N — частота плавучести или частота Брента-Вяйсяля на горизонте движения РК, t — время от его прохода через точку наблюдения [2, 3]).

Но полного объяснения всей физики данного процесса в науке на данный момент пока

нет. Есть в основном только теоретические догадки, в том числе и у авторов статьи. В [2] наиболее подробно исследовано ближнее поле от фрактальной модели для случая сферы, буксируемой с постоянной скоростью, или геометрических фрактальных моделей.

При обтекании потоком воды гладкого шара на его поверхности возникает пограничный слой, который тянется на длину радиуса шара. После его разрушения образуется обширная область сильных завихрений, создающих торможение (рис. 4).

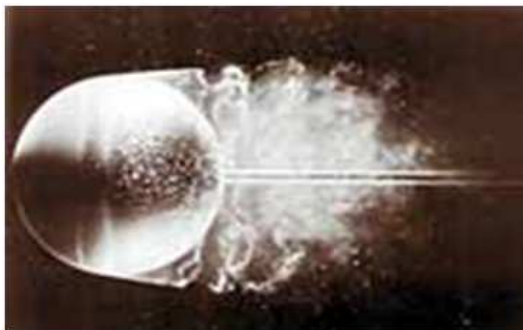


Рис. 4. Гидродинамика обтекания шарика [2]

Так, в [3] на основе наблюдений оптическими способами была введена классификация типичных течений по числам Фруда $F_r = 2U_t/ND$ и Рейнольдса $Re = U_t D/v$, где D — диаметр сферы, U_t — скорость буксировки, v — коэффициент вязкости. В дальнем следе за сферой (РК), движущейся в стратифицированной жидкости, можно наблюдать два типа движений: внутренние волны [2, 3] и вихревая квазидвумерная моды (течения) [3], что является третьим и четвертым возможными источниками мониторинга морских акваторий в целях изучения гидрологических условий и состояния морской биосферы.

Процесс возникновения внутренних волн в научной литературе рассмотрен достаточно хорошо, и они не являются предметом рассуждений авторов. В свою очередь, общая теория квазидвумерных течений в стратифицированной жидкости частично изложена в [2, 3].

Как отмечено в [2, 3], это течения неволновой природы, которым во вращающейся стратифицированной жидкости соответствует дисперсионная ветвь инерционно-гравитационных волн. Положительным для их обнаружения является то, что они имеют большие характерные времена изменчивости по сравнению с внутренними волнами тех же пространственных масштабов и распространяются на большие расстояния.

Авторами данной статьи и работы [3] была выдвинута гипотеза о том, что эволюцию дальнего следа можно объяснить развитием гидродинамической неустойчивости квазидвумерного течения по отношению к квазидвумерным возмущениям.

При больших числах Ричардсона в стратифицированной жидкости существует мода квазигоризонтальных медленных движений неволновой природы (вихревая мода или волна плотности), поле горизонтальной скорости, в котором $u(x, y, z, t) = (u, v)$ и удовлетворяет системе уравнений квазидвумерной гидродинамики [3]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u, \nabla)u + \frac{1}{\rho} \nabla p = v \left(\Delta u + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$\text{div} \langle u \rangle = 0. \quad (2)$$

Здесь операторы $\nabla, \Delta, \text{div}$ двумерные, они вычисляются по горизонтальным координатам (x, y) . Рассмотрим простое обобщение системы (1), (2) [3], позволяющее учесть турбулентный перенос импульса. Поле скорости представим в виде суммы средних компонент $\langle u \rangle$ и мелкомасштабных турбулентных флуктуаций u' , считая, что среднее поле двумерно, а его мелкомасштабная компонента имеет три компоненты. Усредняя горизонтальную проекцию уравнений гидродинамики по турбулентным флуктуациям, получим [3]:

$$\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial t} + (\langle u \rangle, \nabla) \langle u \rangle + \frac{1}{\rho} \nabla \langle \rho \rangle + \frac{\partial}{\partial x_i} \langle u'_i u' \rangle = v \left(\Delta \langle u \rangle + \frac{\partial^2 \langle u \rangle}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$\text{div} \langle u \rangle = 0. \quad (4)$$

В системе (3), (4) [3] $\langle u \rangle$ — двумерный вектор, а суммирование производится по трем повторяющимся индексам $i = 1, 2, 3$. Для замыкания уравнения (1) воспользуемся простейшей градиентной гипотезой:

$$\langle u'_i u'_j \rangle = K_T \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right), \quad \text{при } i, j = 1, 2, \quad (5)$$

$$\langle u'_i u'_j \rangle = K_{Tz} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial z} \right). \quad (6)$$

Здесь K_T и K_{Tz} — горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной вязкости, равные $K_T \sim \delta u'$, и $K_{Tz} \sim \delta_z w$, где δ и δ_z — горизонтальный и вертикальный масштабы следа, а u' и w — масштабы пульсаций скорости. При этом, очевидно, $K_T \geq K_{Tz}$. Дальнейшее решение задачи удобно проводить в переменных завихренности (w) функции тока (ψ), где (ψ) определяется по формулам [2, 3]:

$$\langle u \rangle = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad \langle v \rangle = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (7)$$

Тогда система уравнений движения примет вид [2, 3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} = & \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) K_T \omega + 2 \left(2 \frac{\partial^2 K_T}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 K_T}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 K_T}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Tz} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \omega. \quad (9)$$

На основе выражений (1–9) можно вполне объективно утверждать, что морской эксперимент, проведенный профессором прикладной механики Николсом Макрисом из Северо-Восточного Университета США, физически состоит из двух процессов [1, 3]:

- излучение НС со стационарного вертикального излучателя (ВИ) и прием результатов его взаимодействия с возмущениями от РК на движущийся горизонтальный протяженный приемник (ГПП);
- подсветка водной среды с судна с высокочастотным (ВЧ) эхолотом.

В них сформированы три физические модели [1, 3]:

1. Физическая модель поля полезного сигнала от РК в пассивном режиме. Она представляет РК как пространственный объект для обнаружения с формированием пассивно-активной томографической схемы.
2. Физическая модель поля эхо-сигнала от РК для ВЧ-эхолота. В общем случае, когда ВИ и РК, а также ГПП соединяют поверхностные, донные и водные лучи, поле эхо-сигнала представляет собой совокупность когерентной и некогерентной компонент.
3. Физическая модель РК в активной бистатической локации для случая излучения НС со стационарного ВИ и прием результатов его взаимодействия с возмущениями от РК на движущийся ГПП.

Основываясь на этих физических объяснениях эксперимента, движения РК в пределах фрактальной модели по спирали Архимеда можно отнести к особым типам возмущений. Данное физическое явление авторами статьи и работой [2, 3] было названо волнами плотности. Физической особенностью зарегистрированных в морской среде возмущений является то, что они представляют собой кольцевые структуры, имеющие осциллирующий характер и большие пространственные размеры зон. Нестационарное движение РК в пределах фрактальной модели по спирали Архимеда создает достаточно мощные нелинейные процессы в морской среде. Нестационарность связана как с непосредственным движением РК, так и с результатом случайного воздействия на него гидродинамических сил, неравномерного обтекания отдельных элементов РК, а также с физическими особенностями возникновения вихревых структур за РК [1, 4]. Все это приводит к образованию крупномасштабных пространственных гидродинамических тороидальных вихрей, низкочастотных внутренних волн, квазидвумерных возмущений, которые обнаруживаются с использованием современной гидроакустической аппаратуры, как физические явления, на сотни километров от первоначальной точки возмущения. Полученные объяснения современных технологических решений и физических основ, объясняющих процесс взаимодействия НС с РК, позволяют проводить научный мониторинг протяженных акваторий морской среды, состояния морской биосферы, изучать характеристики океанского дна.

Список литературы

- [1] П.А.Стародубцев, В.В.Карасев, К.А.Пичугин, Некоторые современные технологии дальнего обнаружения рыбных косяков и их теоретические объяснения, *Владивосток, Известия ТИНРО*, **152**(2008), 267-278.
- [2] П.А.Стародубцев, В.В.Карасев, В.А.Тахтеев, М.В.Мироненко, К.А.Пичугин, Е.В.Шевченко, Дальнее обнаружение слабозаметных неоднородностей морской среды маломощными низкочастотными просветными сигналами, Владивосток, ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2007.
- [3] Ю.И.Троицкая, Квазилинейная модель эволюции дальнего турбулентного следа за движущимся телом в стратифицированной жидкости при больших числах Рейнольдса и Фруда, Препринт ИПФ РАН № 610, Н.Новгород, 2002.

- [4] Б.Мандельброт, Фрактальная геометрия природы, М., Институт компьютерных исследований, 2002, 18-377.

Physical Bases of Modern Low-Frequency Technologies of Remote Monitoring of Objects of Sea Biosphere and their Theoretical Explanations

**Pavel A.Starodubtsev
Svetlana V.Gutorova
Roman N.Alifanov**

The paper presents the results of the theoretical investigations of physical models and technological solutions that explain the process of interaction of low-frequency signals with physical phenomena and objects in the ocean environment. The models under study are being used for a large-scale scientific monitoring of the ocean environment aimed at selection of the physical parameters for the spatial detection of the physical phenomena.

Keywords: low-frequency technologies of network monitoring, objects of sea biosphere.