

УДК 534.222:681.883

## Метод обнаружения нелинейных явлений в океане от движущихся подводных объектов и их теоретическое объяснение

Владимир А. Щепетильников\*

Павел А. Стародубцев†

Валерий И. Трасковский‡

Алексей Г. Сенченко

Роман Н. Алифанов§

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

Россия

---

Получена 18.10.2009, окончательный вариант 12.02.2010, принята к печати 20.03.2010

*В работе представлены теоретические исследования современных технологических пояснений процессов возникновения различных возмущений в водной среде от движущихся подводных объектов и возможные практические реализации их обнаружения гидроакустическими средствами.*

*Ключевые слова: солитон, подводный объект.*

---

В современной нелинейной гидроакустике существует ряд незавершенных гипотетических представлений о механизмах возмущений, связанных с нестационарностью движения подводных объектов (ПО) в морской среде.

Незавершенность данных гипотез в возможностях обнаружения ПО проявляется в том, что на основе морских и частных (модельных) экспериментов сотрудниками Института прикладной физики РАН, Института общей физики РАН, Сахалинского конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Тихоокеанского военноморского института имени С.О.Макарова рассматриваются раздельно возмущения в толще океана и на поверхности без единого логического механизма причинности и взаимосвязи. При этом все рассматриваемые модели формирования ореольных возмущений в морской среде, по их мнению, связаны с вертикальным перемещением ПО.

В результате такого перемещения образуются торроидальные вихри или долгоживущие структуры, которые способны за счет гидродинамических свойств вращательного движения частиц водной среды переносить в вертикальной плоскости большую массу воды, заключенную в данном образовании.

Однако в опубликованных работах [1–4], дополнительно к вышеизложенному, не раскрыто влияние горизонтального перемещения ПО на распространение торроидальных вихрей.

Возможность теоретического и экспериментального объяснения этого процесса, основанного на теории возникновения солитонов, и представлена авторами в данной статье.

---

\*osp@mail.ru

†spa1958@mail.ru

‡nbvc@mail.ru

§gidra 518@mail.ru

Солитон — это уединенная волна в средах различной физической природы, сохраняющая неизменной свою форму и скорость при распространении. Солитоны возникают на поверхности воды и на глубине. Океанские глубины очень неоднородны, в них имеются слои воды с разной температурой, плотностью, соленостью. Граница между слоями, как правило, довольно резкая. По такой поверхности распространяются волны и солитоны. Известный специалист в области солитонов А.Т.Филиппов высказал предположение, что подобные солитоны ответственны за загадочные аварии ПО в море.

Солитоны в морской среде могут быть вызваны также различными источниками сингулярного возмущения. Так, например, крупные морские животные в воде двигаются не прямолинейно и с различной скоростью. При определенных условиях на поверхности воды возникает волна "сопровождения", которая может оторваться от тела движения и самостоятельно двигаться по курсу движения тела животного. Если при этом эффекты нелинейности и дисперсии компенсируются, может образоваться солитон.

Известны случаи, когда небольшие солитоны возникали от движения судна. С появлением быстроходных судов стали наблюдаться спутные волны, если скорость корабля была близка к критической:  $V = \sqrt{gh}$ , где  $V$  — скорость судна;  $g$  — ускорение свободного падения;  $h$  — глубина моря.

Самое замечательное в солитоне — его многоликость. Сейчас изучают солитоны в кристаллах, магнитных материалах, сверхпроводниках, в живых организмах, в атмосфере Земли, в космических галактиках. Многие ученые считают, что солитоны играли важную роль в процессе эволюции Вселенной. Начинается применение солитонов в передаче и хранении информации.

При исследовании возмущений на границе тангенциального разрыва скорости нестратифицированной и стратифицированной сред при движении подводного объекта установлено [1, 5], что амплитуда внутренних возмущений при одинаковом силовом воздействии определяется соотношением

$$\alpha = \frac{u_0 W}{g'} + \frac{W^2}{2g'}, \quad (1)$$

где  $g' = g\Delta\rho/\rho_h$ ,  $W = \frac{r_1 u_0}{h}$  — вызванная скорость дипольного источника массы,  $r_1$  — наибольший диаметр тела,  $u_0$  — скорость тела,  $h$  — глубина погружения тела.

В 1834 г. Дж.С.Рассел, наблюдая за движением баржи, которую тянула пара лошадей, обнаружил необычное явление на водной поверхности. "Когда баржа остановилась, масса воды собралась около носа судна, в состоянии бешеного движения оставила судно и с большой скоростью покатила вперед. Форма этой волны имела вид округлого водяного холма. Не меняя своей формы и не снижая скорости, волна мчалась вдоль канала со скоростью 8-9 миль в час. Длина ее составляла приблизительно около тридцати футов и высота — от фута да фута с половиной". Эту волну в своем "Докладе о волнах" Рассел назвал волной трансляции. Он установил следующие свойства подобных волн:

1. Постоянство скорости и неизменность формы.
2. Зависимость скорости движения  $\nu$  от глубины канала  $h$  и высоты волны  $y_0$ :

$$\nu = [g(y_0 + h)]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

3. Распад достаточно большой волны на две или более волны.

"Волна примет ... свою обычную форму ... и будет идти вперед, сохраняя объем и высоту: она освободится от лишнего вещества, которое двигалось с ней, оставит его позади,

и эта оставшаяся волна будет следовать за ней, но с меньшей скоростью, так что, хотя сначала две волны были соединены в одну составную, они затем отделяются друг от друга и все больше и больше расходятся по мере продвижения" (рис. 1).

"Большие первичные волны трансляции проходят друг через друга без каких-либо изменений, таким же образом, как и малые колебания, производимые упавшим на поверхность воды камнем".

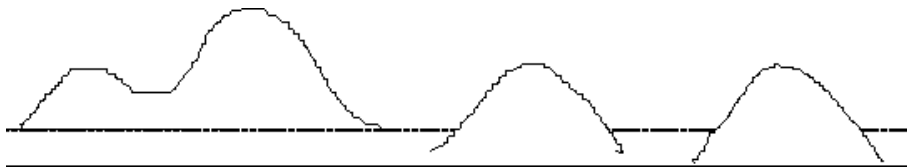


Рис. 1. Форма волны по Расселу

Эти волны, как и волны Герстнера, имеют несинусоидальную форму и становятся приближенно синусоидальными только тогда, если их амплитуда очень мала. При увеличении длины волны они как бы расходятся, и при большой длине волны остается один горбик, который и соответствует уединенной волне.

Работы Рассела об уединенных волнах были встречены научной общественностью того времени неоднозначно. В 1845 г. Д.Б.Эри в своей работе "Приливы и волны" подверг острой критике выводы Рассела. Он, в частности, отмечал, что формула Рассела для скорости уединенной волны не соответствует теории длинных волн на мелкой воде, подобные волны в каналах не могут сохранять постоянную форму. Основатель современной гидроакустики Д.Г.Стокс в своей работе "О колебательных волнах" (1847 г.) утверждал, что волны не могут сохранять постоянную форму даже в случае пренебрежимо малой вязкой жидкости. После такой резкой критики об уединенной волне забыли. Однако итоги размышлений Рассела об уединенной волне были опубликованы в книге "Волны трансляции в океанах воды, воздуха и эфира", которая вышла уже после его смерти.

Еще при жизни Рассела молодой ученый Жозеф Валентин де Буссинеск и лорд Рэлей нашли приближенное математическое описание формы и скорости уединенной волны на мелкой воде. Несколько позже были повторены и подтверждены опыты Рассела.

Наибольшую ясность в проблему теории уединенных волн внесли голландские ученые Иоханнес Кортевег и Густав де Фриз, которые в 1895 г. нашли уравнение, наиболее точно описывающее основные эффекты, что наблюдал Рассел. Они получили относительно простое дифференциальное уравнение для волн на мелкой воде и показали его периодическое волновое решение. Уравнение Кортевега–де Фриза сокращенно называют КдФ-уравнением.

В 1946 г. М.А.Лаврентьев дал доказательство существования уединенных волн, в котором они рассматриваются как предел периодических волн в случае, когда их длина неограниченно возрастает. Доказательство М.А.Лаврентьева начинается с нелинейного первого приближения.

Линейная теория волн малой амплитуды при слабом возмущении приводит к движению, в котором появляются бесконечно большие возвышения свободной поверхности. Таким образом, линейная теория волн малой амплитуды оказалась совершенно непригодной для первого члена разложения. Следовательно, для описания уединенных волн необходимо использовать нелинейный подход.

Существование периодических перманентных волн при бесконечной глубине моря было доказано Леви-Чивита. Он применил разложение в ряд по степеням некоторого параметра  $\varepsilon$  - величины возвышения гребня волны над впадиной. В качестве независимых переменных он использовал потенциал и функцию тока волнового движения.

К.О.Фридрихс и Д.Г.Хайерс решили задачу о существовании уединенной волны при следующем условии: горизонтальная и вертикальные оси подвижной системы координат связаны с уединенной волной так, что ось  $y$  проходит через гребень волны, а начало координат находится на дне.

При таком выборе осей движение можно рассматривать как установившееся двумерное потенциальное течение, что позволило ввести потенциал скоростей  $\phi'$  и функцию тока  $\psi$ . Дальнейшее преобразование приводит к выражениям для определения профиля волны  $y$  и скорости движения  $v$ :  $y = 1 + 3a^2 \operatorname{sech}^2 \left( \frac{3ax}{2} \right)$ .

Выражения для профиля совпадают с формулами Буссинеска, Рэлея и Кеплера. Безразмерная величина  $a$  может быть найдена из уравнения  $a = \sqrt[3]{\frac{1}{g^2 h^2}}$ .

Вблизи гребня волна имеет форму клина с углом раствора  $120^\circ$ , что подтверждает вывод Стокса. Уединенные волны существуют только в том случае, когда скорость волны  $v$  больше критической, то есть  $v > \sqrt{gh}$ , где  $h$  — глубина жидкости в бесконечности (предполагается, что она одинакова на обоих концах канала),  $g$  — ускорение силы тяжести.

Для каждого значения дроби  $\frac{v}{\sqrt{gh}}$  или для каждого значения приведенной глубины  $\varphi = ghv^{-2}$  существует единственная симметричная уединенная волна.

Свойства уединенных волн имеют сходство с элементарными частицами. Эти частицы несколько своеобразны. Еще Рассел заметил, что большая частица (высокая волна) всегда движется быстрее. Когда две уединенные волны соприкасаются, то большая волна замедляется и уменьшается, а малая, наоборот, ускоряется и растет. Большая волна "сдвигается" вперед, то есть уходит немного дальше того положения, которое она занимала бы, если бы никакого взаимодействия не было, а малая, наоборот, отстает, "сдвигается" назад. Волны не проходят друг через друга, они словно сталкиваются и отталкиваются друг от друга, подобно теннисным мячам. Это самое удивительное свойство уединенных волн.

Установлено [2, 6-8], что при движении ПО амплитуда поверхностной волны зависит от глубины погружения, скорости движения и линейных размеров тела, при этом стратификация среды существенного влияния на амплитуду поверхностной волны не оказывает. Весь вышерассмотренный математический аппарат, описывающий поверхностную волну, был выведен из предположения, что ПО движется стационарно.

На практике же стационарность движения ПО отсутствует. При этом нестационарность движения вызывает срыв масс воды с поверхности подводного объекта, которые являются причиной образования солитоноподобных волн.

В 1871–1872 гг. были опубликованы результаты французского ученого Жозефа Валентина Буссинеска (1842-1929), посвященные теоретическим исследованиям уединенных волн в каналах (подобных уединенной волне Рассела).

Исследуемые волны Буссинеск называл вспучиваниями и рассмотрел вспучивания положительной и отрицательной высоты. Буссинеск обосновал устойчивость положительных вспучиваний тем, что их малые возмущения, возникнув, быстро затухают. В случае отрицательного вспучивания образование устойчивой формы волны невозможно, как и для длинного и положительного очень короткого вспучиваний. Несколько позже, в 1876 г., опубли-

ликовал результаты своих исследований англичанин лорд Рэлей.

Еще одной удивительной особенностью солитонов (отмеченной еще Расселом) является их способность сохранять свои скорость и форму при прохождении друг через друга (рис. 2). Единственное напоминание о состоявшемся взаимодействии — постоянные смещения наблюдаемых солитонов от положений, которые они занимали бы, если бы не встретились. Есть мнение, что солитоны не проходят друг через друга, а отражаются, подобно столк-

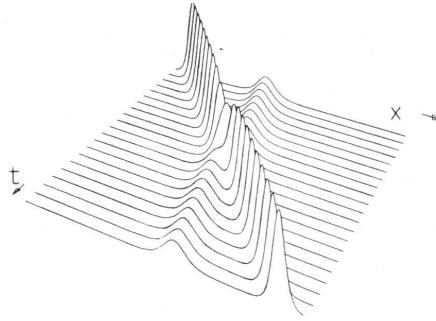


Рис. 2. Столкновение двух солитонов

нувшимся упругим шарам. В этом также проявляется аналогия солитонов с частицами.

Изучение неодномерных солитонов (рис. 3) осложнялось трудностями доказательства

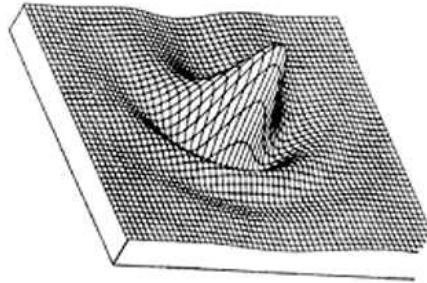


Рис. 3. Неодномерный солитон

их устойчивости, однако в последнее время получены экспериментальные наблюдения неодномерных солитонов (например, подковообразные солитоны на пленке стекающей вязкой жидкости, изучавшиеся В.И.Петвиашвили и О.Ю.Цвелодубом). Двумерные солитонные решения имеет уравнение Кадомцева-Петвиашвили, используемое, например, для описания акустических (звуковых) волн:  $(u_t + \sigma uu_x + u_{xxx})_x = u_{yy}$ .

Известно, что солитоны могут существовать при условии равновесия между эффектами нелинейности и дисперсии [3]. Это условие можно выразить выражением

$$S = \frac{3}{4} \frac{y_0 l^2}{h^3} = 1, \quad (3)$$

где  $S$  — отношение между эффектами нелинейности и дисперсии,  $y_0$  — высота волны,  $l$  — длина волны,  $h$  — глубина.

Необходимо отметить, что уединенная волна, движущаяся с неизменной формой и скоростью, может существовать и в линейной среде. В самом деле, в силу отсутствия нелинейных эффектов, диссипации энергии и дисперсии уединенная бегущая волна, конечно, будет распространяться в такой "линейной" среде без изменения формы и скорости. Более того, при возникновении в такой среде двух и более уединенных волн их столкновение друг с другом не приведет к изменению формы и скорости вследствие простого характера их взаимодействия — линейной суперпозиции волн. Поэтому называть подобные линейные волны солитонами можно лишь условно. При наличии дисперсии, но в отсутствие нелинейности возникновение солитонов невозможно в силу расширения подошвы волны. При наличии нелинейности без дисперсии возможность существования солитонов также исключена из-за непрерывного перехода энергии первоначально уединенной волны в энергию волн более высоких частот — эта особенность в большинстве случаев проявляется как формирование ударной волны. Таким образом, возникновение и существование солитонов возможно только при наличии дисперсии и нелинейности.

Теоретические обоснования и наблюдения, изложенные выше, не дают практического решения реального способа обнаружения поверхностной и внутренней волн от движущегося ПО в нелинейной океанской среде, где условия существования солитонов (7) выполняются. Обнаружение внутренней и поверхностной волн поможет решить ряд практических задач, от возникновения цунами до обнаружения движущихся подводных объектов.

Для решения этой задачи в 1997 г. в испытательном гидроакустическом бассейне на кафедре гидроакустики ТОВМИ им. С.О.Макарова были проведены эксперименты, при которых получены и исследованы уединенные волны и был разработан акустический метод обнаружения уединенных волн [9], который основывается на свойствах движения частиц в волне.

Известно, что частицы воды в волне движутся, следовательно, возникает трение и вязкость. При этом возникает дополнительное поглощение, отражение, преломление и рассеивание акустических волн. Наибольшее влияние оказывает поглощение. А.Г.Сенченко произвел вывод формулы, определяющей дополнительное поглощение акустических волн в солитоне:

$$\alpha = \alpha_{\text{кл}} + \alpha_{\text{рел } 1} + \alpha_{\text{рел } 2} + \alpha_{\text{рас}}. \quad (4)$$

Первый член уравнения (4)  $\alpha_{\text{кл}}$  учитывает поглощение, обусловленное сдвиговой вязкостью согласно классической теории Стокса, второй  $\alpha_{\text{рел } 1}$  — обусловлен релаксационными потерями за счёт соли  $\text{MgSO}_4$ , третий  $\alpha_{\text{рел } 2}$  — учитывает релаксационные потери соли  $\text{MgCO}_3$ , четвертый член  $\alpha_{\text{рас}}$  характеризует поглощение за счет рассеяния акустических колебаний солитоном.

На рис. 4 приведены зависимости поглощения акустических колебаний от частоты в морской среде, полученные различными авторами [10], а также коэффициент поглощения акустических колебаний в солитоне.

Эксперименты заключались в следующем. В специализированном бассейне (рис. 5) на стенках были закреплены излучатель и приемник, находящиеся на одной оси. Перпендикулярно оси распространения звуковых колебаний по направляющей перемещалась модель. Для создания неоднородностей модель совершала резкое торможение на разных расстояниях перед осью излучатель – приемник.

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 6 а, 6 б. Анализ полученных результатов показывает:

- 1) происходит затухание сигнала;

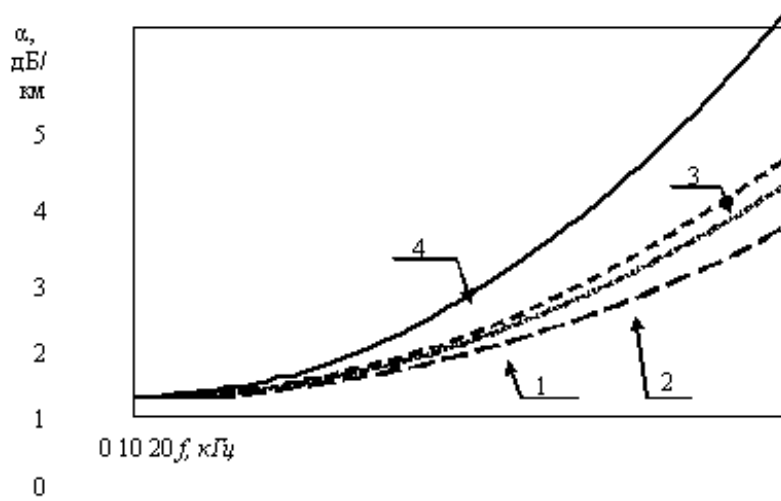


Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения акустических колебаний от частоты: 1 — график по формуле Торпа; 2 — график по формуле Шулькина и Марша; 3 — график по формуле Шихи и Хелли; 4 — график поглощения акустических колебаний в солитоне, полученный авторами

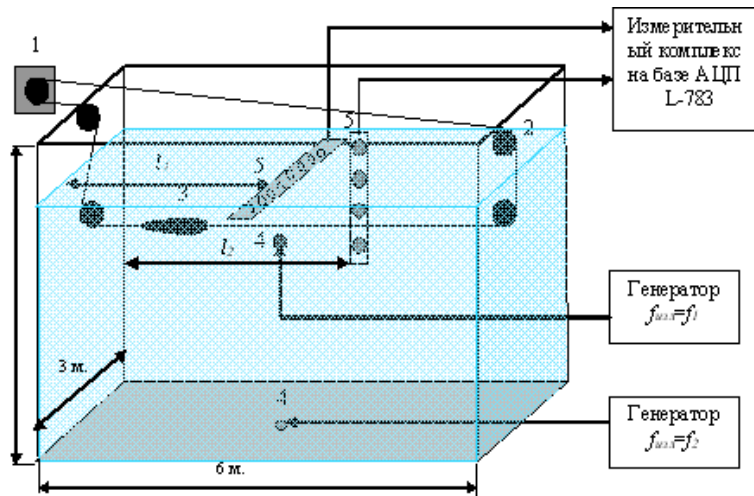


Рис. 5. Внешний вид экспериментальной установки: 1 — двигатель привода движения модели, 2 — система протяжки модели, 3 — модель, 4 — излучатель, 5 — приемники

2) затухание сигнала составляет до 0,005 дБ (относительно сигнала, принятого при невозмущенной среде);

3) происходит фиксирование волны-предвестника, отраженной от стенки бассейна (15–17 с).

По результатам исследований был сделан вывод, что возможно обнаружение уединенных волн от движущегося ПО акустическим методом. Причем происходит обнаружение

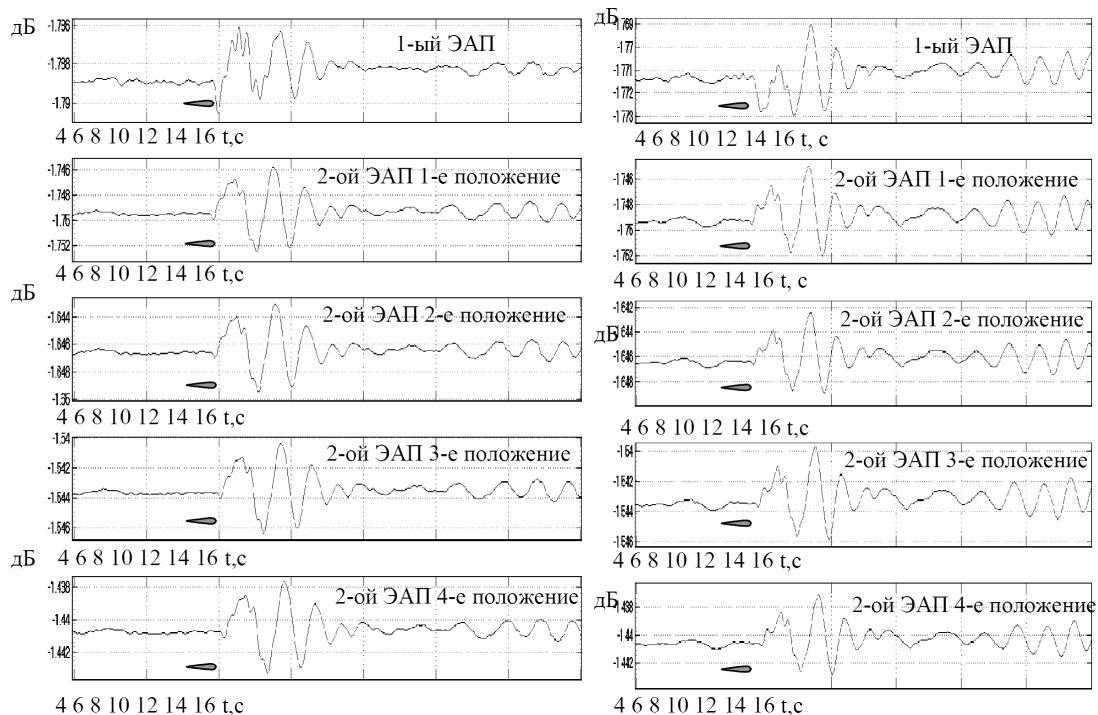


Рис. 6 а. Результат исследований при резком изменении режима движения при лоцировании в горизонтальной плоскости

Рис. 6 б. Результат исследований при резком изменении режима движения при лоцировании в вертикальной плоскости

волн-предвестников, которые тоже имеют солитонное происхождение. Этот вывод в дальнейшем был рекомендован для применения с целью предупреждения подхода волн цунами к побережью Камчатки и Приморского края, а также прогнозирования движения ПО по акватории Охотского моря.

## Список литературы

- [1] А.Т. Филиппов, Многоликий солитон, М., Наука, 1990.
- [2] Р. Додд, Дж. Эйлбек, Дж. Гиббон, Х. Морис, Солитоны и нелинейные волновые уравнения, М., Мир, 1988.
- [3] К.О. Фридерихс, Д.Г. Хайерс, Теория поверхностных волн, М., ИЛ, 1959.
- [4] Г.И. Казанцев, В.А. Щепетильников, Уединенные волны в слоях морской среды с различным волновым сопротивлением, *36 Всероссийская межвузовская НТК*, Владивосток, ТОВВМУ, 1(1993), №1, 127–130.
- [5] Б.К. Бобылев, В.А. Щепетильников, Генерация уединенных волн на границе тангенциального разрыва скорости движущимся объектом, *Доклады 7 Дальневосточной НТК по судовой радиоэлектронике*, Владивосток, 1994, 24.



- [6] Б.К. Бобылев, В.А. Щепетильников, Эволюция волны сопровождения при движении объекта под свободной поверхностью, *Доклады 7 Дальневосточной НТК по судовой радиоэлектронике*, Владивосток, 1994, 28–32.
- [7] В.И. Трасковский, В.А. Щепетильников, Математическое описание уединенной волны в морской среде, *Доклады Российской гидроакустической конференции*, Владивосток, ТОВВМУ, 1(1996), №1, 77–81.
- [8] П.В. Гуменюк, Г.И. Казанцев, В.А. Щепетильников, К вопросу описания уединенных волн, вызванных движением подводного объекта в слоисто-неоднородной среде, *37 Всероссийская межвузовская НТК*, Владивосток, ТОВВМУ, 1(1994), №1, 66–69.
- [9] А.Г. Сенченко, В.А. Щепетильников, Моделирование поверхностных возмущений, распространяющихся впереди погруженного в водную среду тела, *Тр. ун-та*, Владивосток, Дальрыбвтуз, (2001), №14, 95–98.
- [10] В.А. Щепетильников, Г.И. Казанцев, А.Г. Сенченко, Вопросы взаимодействия акустических и уединенных волн, *Специальные вопросы прикладной гидроакустики*, Владивосток, ТОВМИ, 2001, 306–312.

## Method of the Finding the Nonlinear Phenomenas in Ocean from Moving Undersea Object and their Theoretical Explanation

Vladimir A. Schepetilnikov  
Pavel A. Starodubtsev  
Valery I. Traskovskiy  
Aleksey G. Senchenko  
Roman N. Alifanov

---

*We present theoretical research on modern technological explanations of processes of emerging of various perturbations in water media caused by moving underwater objects as well as possible practical methods of finding them by hydroacoustic means.*

*Keywords: soliton, the undersea object.*