
ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО. АКУСТИКА

УДК 584.17

П.А. Стародубцев^{1,2}, Е.Н. Бакланов², Н.Л. Халаев¹, Э.В. Москаленко¹

¹ Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова,
690006, г. Владивосток, Днепровский переулок, 6

² Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

АМФИДРОМИЧЕСКИЕ ТОЧКИ ЗАМКНУТЫХ АКВАТОРИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассмотрены особенности приливных явлений в акваториях дальневосточных морей, их влияние на формирование акустических полей различных физических объектов.

Ключевые слова: акустическое поле, прилив, сейши, амфидромическая точка, звуковой канал.

P.A. Starodubtcev, E.N. Baklanov, N.L. Khalaev, E.V. Moskalenko
AMPHYDROMIC POINTS OF CLOSED AQUATORIES AND THEIR INFLUENCE
ON THE ACOUSTIC FIELD CHARACTERISTICS

The article is devoted to the peculiarities of tidal phenomena in the water areas of the Far Eastern seas, their influence on the formation of acoustic fields of various physical objects.

Key words: acoustic field, tide, seiches, amphidrome point, sound channel.

Введение

Приливные движения в Японском море формируются преимущественно *полусуточной* приливной волной, которая является по многим параметрам чисто стоячей («квазистоячей» волной), с несколькими амфидромическими (от греч. *ἀμφί* – вокруг и *δρόμος* – бег) точками (АТ), расположенными вблизи границ Корейского и Татарского проливов [1].

АТ возникают благодаря интерференции первичной приливной волны и её отражений от береговой линии шельфовой зоны Японского моря и подводных препятствий. Амплитуда приливной волны в АТ практически равна нулю. При этом высота прилива увеличивается с удалением от АТ в сторону Корейского и Татарского проливов и центральной глубоководной части Японского моря. Приливная волна «обегает» эту точку вокруг по часовой (Корейский пролив) или против часовой (Татарский пролив) стрелки. В них же сходятся котидальные линии с фазовым интервалом в 30°. Синхронные колебания приливного профиля уровня моря и приливных течений в Татарском и Корейском проливах осуществляются по закону двухузловых сейш (франц. *seiche*), пучность которых охватывает всю центральную глубоководную часть Японского моря, а узловые линии расположены вблизи границ Корейского и Татарского проливов. *Seiche* как стоячие волны всегда возникают в замкнутых или частично замкнутых водоемах, чем отчасти и является Японское море [2].

У южного входа в Корейский пролив величина прилива достигает 3 м. По мере продвижения на север она быстро уменьшается и уже у Пусана не превышает 1,5 м. В средней части Японского моря приливы невелики. Вдоль восточных берегов Кореи и Приморья до входа в Татарский пролив они не больше 0,5 м. Такой же величины приливы у западных берегов Хонсю, Хоккайдо и юго-западного Сахалина. В Татарском проливе величина приливов резко возрастает до 2,3–2,8 м (для сравнения: в Корейском проливе величина прилива достигает 3 м). Возрастание величин приливов в северной части Татарского пролива обуславливается также его воронкообразной формой (рис. 1) [3].

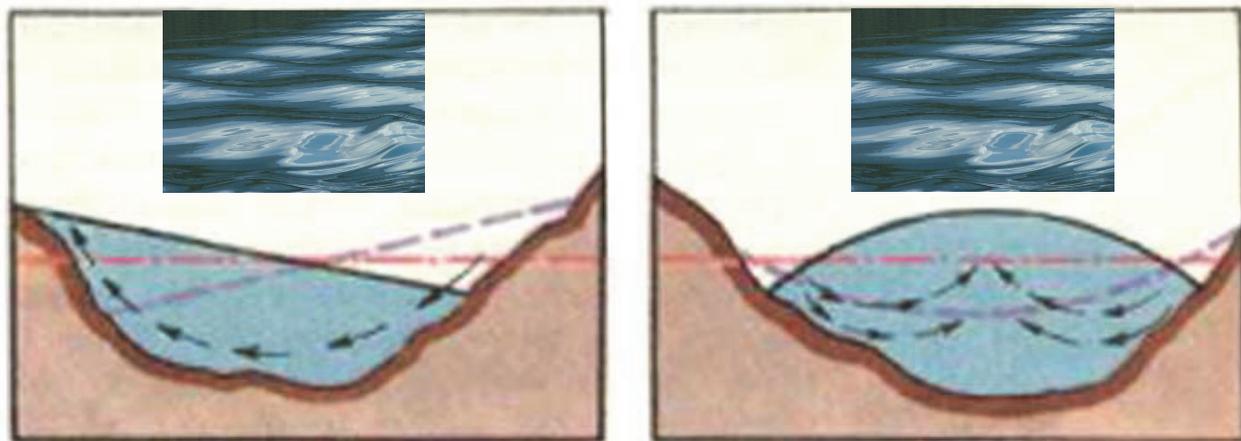


Рис.1. Синхронные колебания приливного профиля уровня моря и приливных течений в Татарском и Корейском проливах, осуществляющиеся по закону «одно- и двухузловая» сейши (волны хорошо видны со спутника на фото) [4]

Fig. 1. Synchronous oscillations of the tidal profile of sea level and tidal currents in the Tatar and Korean Straits, carried out under the law «one and two-node» seiches

Основная часть

Для того чтобы определиться в степени влияния на процесс формирования акустического поля от различных физических объектов в АТ (например, Японского моря), надо, в первую очередь, найти и объяснить причинно-следственную связь между понятиями «прилив» и «сейши» как явлениями, возникающими на поверхности водной среды. И, соответственно, ответить на вопрос: «приливы» и «сейши» – это колебания или волны? За основу дальнейших рассуждений можно взять объяснения, представленные в [5].

В [5] приливами и сейши называют пространственно-временные колебания поверхности акватории:

- для приливов – синхронизированные с орбитальными движениями Луны и Солнца и имеющие гладкую функцию изменения амплитуды и фазы всего процесса в целом как по времени, так и пространству;

- для сейши – с гладкой функцией изменения амплитуды по пространству и времени и гладкой функцией фазы во времени, но функцией поля фаз по пространству с разрывами (первого порядка).

Хотелось бы напомнить, что гладкая функция или непрерывно дифференцируемая функция – это функция, имеющая непрерывную производную на всём множестве определения. Очень часто под гладкими функциями подразумевают функции, имеющие непрерывные производные всех порядков (рис. 2) [6].

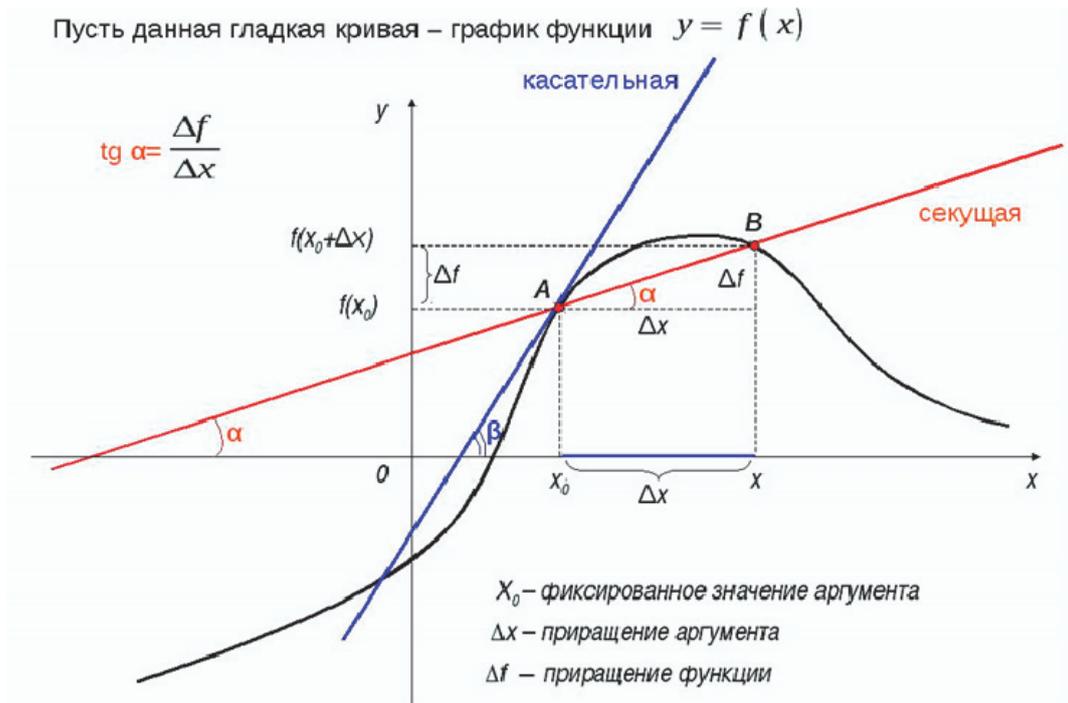


Рис. 2. Определение производной функции $y = f(x)$ в точке [6]
 Fig. 2. The definition of the derivative of the function $y = f(x)$ at the point [6]

При нахождении точек разрыва функции для АТ можно руководствоваться следующими правилами:

- 1) элементарная функция может иметь разрыв только в отдельных точках, но не может быть разрывной на определенном интервале;
- 2) элементарная функция может иметь разрыв в точке, где она не определена при условии, что она будет определена хотя бы с одной стороны от этой точки;
- 3) неэлементарная функция может иметь разрывы как в точках, где она определена, так и в тех, где она не определена.

Например, если функция задана несколькими различными аналитическими выражениями (формулами) для различных интервалов, то на границе стыка может быть разрывной.

Данная функция определена на всей числовой прямой, т.е. для каждого значения « x » существует своё значение « y » $y = f(x)$. В частности, если $k = x$, то $y = f(k) = m$. Заметим, что другая точка выколота, ведь по определению функции значению аргумента должно соответствовать единственное значение функции. Таким образом, область определения нашей функции: $D(f) = R$. Однако эта функция не является непрерывной на R . Совершенно очевидно, что в точке $k = x$ она терпит разрыв. Позже мы рассмотрим классификацию точек разрыва (рис. 3) [6].

Это характерно для АТ, где фаза по пространству не может быть определена в каждый момент времени. Возможным объяснением связи между понятиями «прилив» и «сейши» [7] и основной информативной составляющей, определяющей причинно-следственную связь между понятиями «прилив» и «сейши» как физическими явлениями, является функция изменения пространственной фазы колебаний [5]:

- для прилива – это гладкая функция пространственной фазы;
- для сейши – это поле функции пространственной фазы с разрывами (первого порядка).

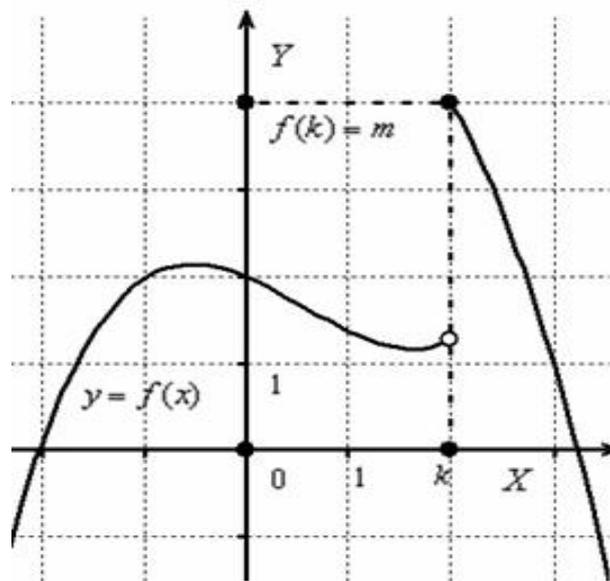


Рис. 3. Непрерывность и разрыв функции [6]
Fig. 3. Continuity and discontinuity of the function [6]

Поэтому основной задачей дальнейших рассуждений является выяснение возможного процесса изменения во времени и пространстве физических величин, однозначно характеризующих тот или иной тип пространственного движения.

Из [5] следует, что топологические методы анализа полей фаз приводят к следующим результатам.

Фаза прилива [5] – это монотонно возрастающая гладкая функция как по времени, так и по пространству. В поле фазы прилива с необходимостью должна присутствовать одна или несколько АТ. Это изолированные точки сингулярности в поле фазы. Для этих точек неприменимо понятие «фаза прилива». Характеристической особенностью приливных колебаний является то, что разность фаз колебаний между двумя произвольными точками, находящимися на акватории одной амфидромической системы, не равна нулю и постоянна во времени для акватории. В фиксированный момент времени изофазы на акватории с приливами представляют собой веерно расходящиеся из АТ линии. На окружности, проведенной вблизи каждой АТ, укладывается целое число полных оборотов фазы, т.е. $n \cdot 2\pi$, где $n = 1, 2, \dots$. Концы изофаз входят либо в другие АТ, либо под прямым углом выходят к береговой черте. С течением времени изолинии с фиксированными значениями фазы перемещаются по акватории, как бы вращаясь вокруг АТ, не изменяя направления вращения. Изоамплитуды представляются замкнутыми линиями, окружающими АТ. Положения изоамплитуд на акватории постоянны во времени. Амплитуда приливных колебаний возрастает по направлению к береговой черте. Значения уровня моря в любой момент времени не могут быть постоянными на любом интервале пространства. Значения амплитуд увеличиваются при удалении от АТ. В этой точке амплитуда прилива равна нулю.

В поле фазы сейши [5] с необходимостью присутствуют множество АТ, которые организованы в непрерывные линии. В океанологии эти линии принято назвать *узловыми линиями*. Положение узловых линий каждой главной формы колебаний можно определить, если насыпать на пластинку мелкий песок, который перемещается под влиянием вибрации пластинки в места с нулевыми амплитудами. Можно также пользоваться щупом, прикосновение которого к вибрирующим местам пластинки вызывает изменение амплитуды при постоянной частоте (рис. 4, 5) [8].



Рис. 4. Фигуры Хладни на поверхности песка [4]
 Fig. 4. Figures of Chladni on the surface of sand [4]

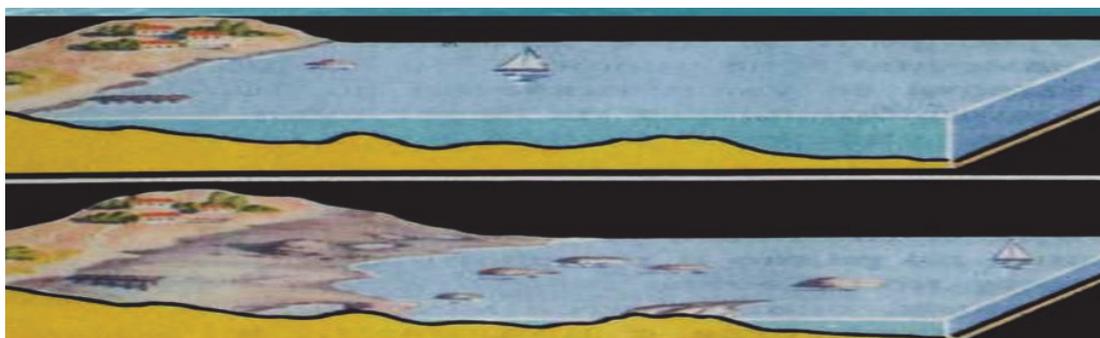


Рис. 5. Поверхность моря при приливах и отливах [4]
 Fig. 5. Surface of the sea at high and low tides [4]

В свою очередь, совокупность этих линий образует сеть на акватории. Внутри каждой ячейки колебания уровня происходят синфазно, а колебания в смежных ячейках – в противофазе. Разность колебаний между двумя произвольными точками в области одной ячейки равна нулю. Поэтому линии изофаз изобразить на карте акватории невозможно, они все как бы уложены на узловых линиях. Амплитуда колебаний в сейшах равна нулю на узловых линиях и максимальна в середине ячейки сейши или у береговой черты.

Типично изоамплитуды образуют замкнутые линии, формой повторяющие границы ячейки. Положение изоамплитуд и изофаз в сейшах постоянно. Толкование сейши как стоячей волны неявно учитывает свойства пространственного распределения фаз сейши и возвращает наши рассуждения к волновому числу и его физическому пояснению, представленному ранее. Изофазы сейши неподвижны, поэтому сейши (мнение [5, 9] и авторов статьи) лучше отнести к стоячим волнам и «интерференции», где особым ее случаем являются стоячие волны.

Особенности стоячей волны (сейши) и ее отличие от бегущей волны (приливы) [10].

1. В бегущей волне все точки совершают колебания с *одинаковой амплитудой*, но с *различными фазами*. В стоячей волне все точки, заключенные между двумя соседними узлами, колеблются с *различными амплитудами*, но *одинаковыми фазами (синфазно)*. При переходе через узел фаза колебаний изменяется скачком на π , так как множитель $2A \cos kx$ при этом изменяет свой знак на противоположный, и, следовательно, точки, лежащие по разные стороны от узла, колеблются в противофазе.

2. В отличие от бегущей волны, в направлении распространения которой *переносится энергия*, в стоячей волне *не происходит переноса энергии*, так как две бегущие волны, образующие стоячую волну, *переносят одинаковую энергию в противоположных направлениях*. Энергия периодически преобразуется из потенциальной энергии в кинетическую, мигрируя от узлов стоячей волны к ее пучностям и обратно.

Указанные выше свойства полей фаз приливов и сейш представлены в [5, 9, 10]. Анализ доказывает, что традиционной, принятой в океанологии стратегии различия сейш и приливов по противофазным колебаниям в двух точках доверять нельзя. Объяснение различия «приливов» и «сейш» является сложной задачей и зависит от многих факторов.

Оно «квазидетерминировано» и будет влиять на процесс формирования акустического поля от различных физических объектов в окрестностях АТ Японского моря, географическое распределение которых можно получить путем построения приливных карт (рис. 6) [4].

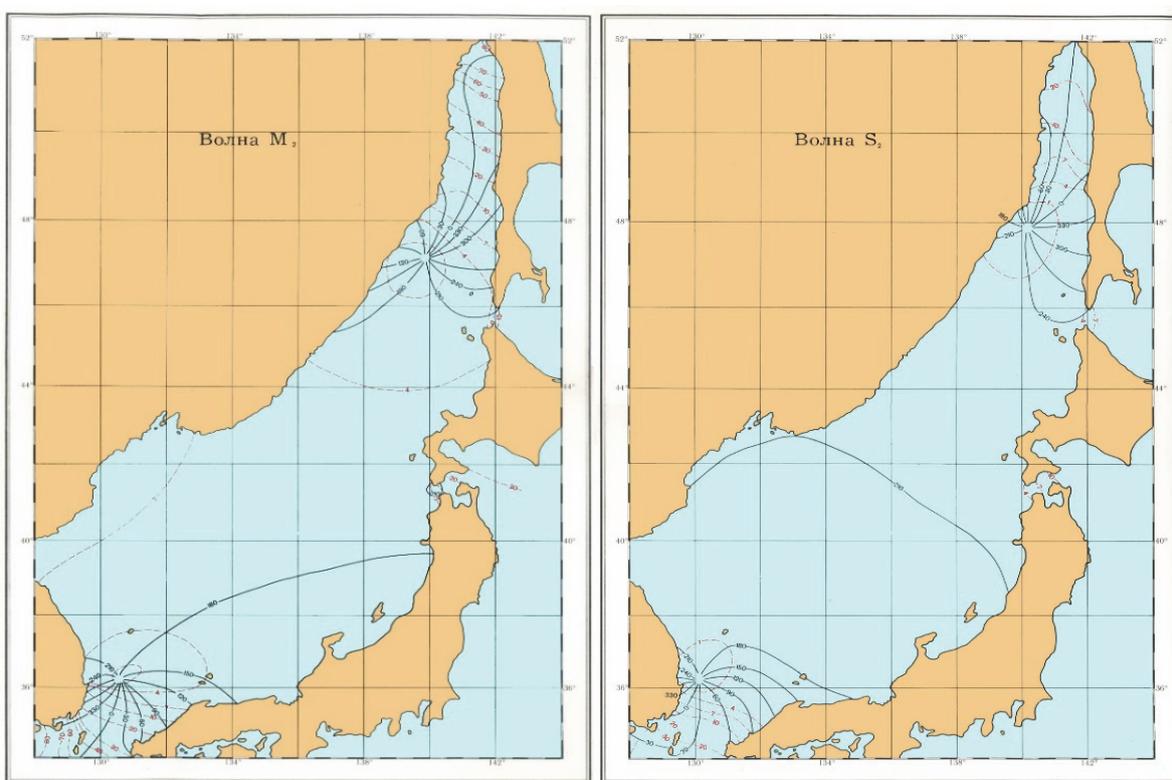


Рис. 6. Котидальная карта полусуточного прилива
 Fig. 6. Cotidal map of semidiurnal tide

Аномальные явления концентрации и распространения акустического поля для Японского моря определяются свойствами среды и границ, в которых оно формируется. Эти явления (они присущи всем закрытым, полужакрытым мелководным районам или морям с сейшами) можно разбить на несколько видов: аномальные свойства водной поверхности; аномальные свойства среды; аномальные свойства рельефа дна; аномальные свойства состава дна.

В реальных условиях волны на поверхности воды не являются плоскими, а имеют более сложную пространственную структуру, зависящую от характеристик их источника. Очень сложную структуру имеют ветровые волны (причины сейш), характеристики которых определяются скоростью ветра и временем его воздействия на волну. Механизм передачи энергии от ветра к волне связан с тем, что пульсации давления в потоке воздуха деформируют поверхность. В свою очередь эти деформации влияют на распределение дав-

ления воздуха вблизи водной поверхности, причём эти два эффекта могут усиливать друг друга, и в результате меняется акустическое поле в среде – амплитуда звуковых возмущений на поверхности воды нарастает. При этом фазовая скорость возбуждаемой волны близка к скорости ветра; благодаря такому синхронизму пульсации воздуха действуют «в такт» с чередованием возвышений и впадин (резонанс во времени и пространстве).

Фокусировка звука [4] в окрестностях АТ *ведет* к созданию сходящихся акустических волновых фронтов сферической или цилиндрической формы. Она основана на тех же физических принципах, что и фокусировка световых волн. Для волновых фронтов, форма которых отличается от сферы или прямого кругового цилиндра, геометрический и волновой фокусы не совпадают.

Сотрудниками ТОВВМУ имени С.О. Макарова в 1998 г. были произведены исследования влияния донных отложений на характер акустического поля в районах различных бухт Приморского края, аналогичных АТ [4]. Были получены следующие результаты. При положительной рефракции распространение звука в этом районе происходит в придонном звуковом канале с большими потерями энергии. В этом случае определяющими факторами формирования звукового поля становятся свойства дна.

Рассмотренные экспериментальные данные о звуковом поле [4], полученные в условиях придонного звукового канала на двух гидроакустических трассах, расположенных в одной акватории, показали, что корректность сравнения зависимостей звукового давления от расстояния $p(r)$ достигается за счет небольшого интервала времени между сканированием трасс и их фиксированного направления. Частота излучаемого сигнала – 400 Гц, длина волны $\lambda \approx 3,9$ м, глубина излучателя, выраженная в единицах длины волны, $z_s \approx 2\lambda$, волновая толщина водного слоя в районе измерений $H \approx (4,9-6,7) \lambda$. Приемные гидрофоны располагались друг над другом на глубинах: $z_{r^1} \approx 1,9\lambda$, $z_{r^2} \approx 4,8 \lambda$.

Сравнивались также результаты прохождения сигналов при подстилающей поверхности дна «ракушечник» [скорость продольных волн 1556–1658 м/с, при плотности $(1,7-1,9) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$] и «ил» [скорость продольных волн 1470 м/с, при плотности $(1,4-1,7) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$].

Обратившись к вопросу влияния состава донных отложений, приходим к выводу, что распространение звука на разных трассах различна. Различие заключается в том, что в «иле» отсутствуют сдвиговые волны, а градиент скорости звука небольшой и положительный, поэтому мало влияет на характер распространения звука (рис. 7, а, б) [4].

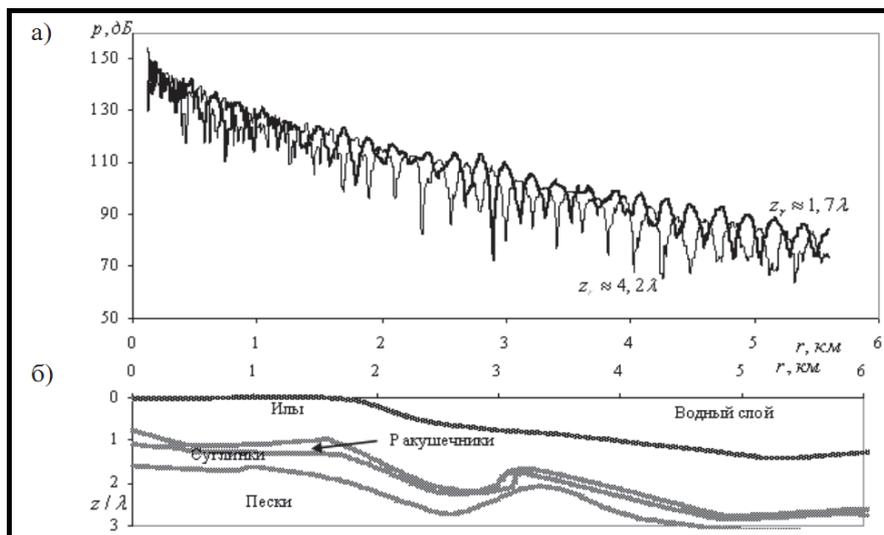


Рис. 7. Интерференционная структура поля на трассе с типом дна «ил» [4]

Fig. 7. The interference field structure on the track with type of the bottom «ooze» [4]

На другой трассе, где слой осадков составляли ракушечники (слой Био), зафиксированы повышенные потери, причиной которых может являться то, что увеличение скорости продольных волн в этом материале приводит к увеличению жесткости скелета дна и связанному с этим возбуждению сдвиговых волн, а значит, дополнительного поглощения энергии (рис. 8, а, б) [4].

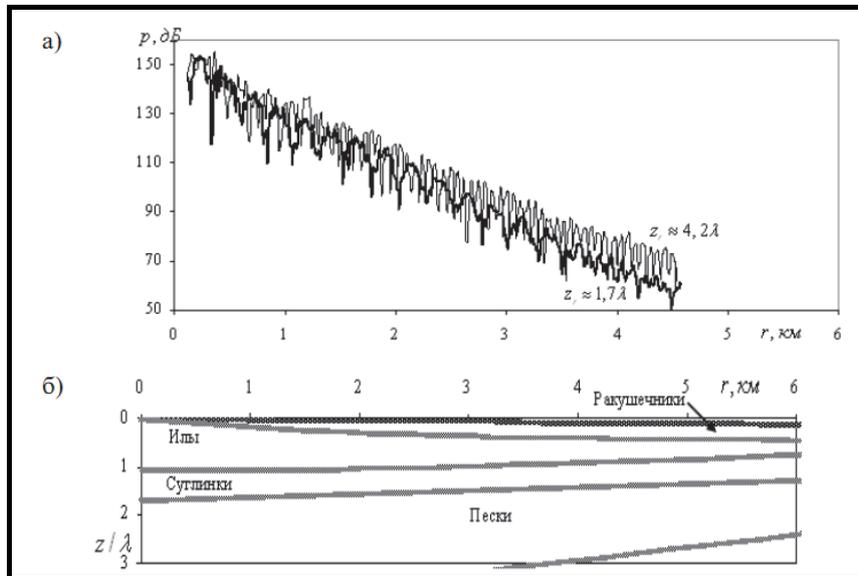


Рис. 8. Интерференционная структура акустического поля на трассе с типом дна «ракушечник» [4]
 Fig. 8. The interference structure of the acoustic field on the track with the bottom type «shell rock» [4]

Таким образом, физические свойства верхнего слоя осадочных отложений, представленного ракушечниками, можно рассматривать как наиболее вероятный механизм повышенных потерь энергии звуковых волн в окрестностях АТ. По расчетам сотрудников ТОВВМУ имени С.О. Макарова, в рамках инициативной научно-исследовательской работы «Звук – 2009» при подготовке к натурным измерениям в различных бухтах Приморского края были подсчитаны коэффициенты затухания звука для характерных донных осадков «песок» и «ил». На рис. 9, а, б [4] показаны расчетные величины при различных состояниях моря.

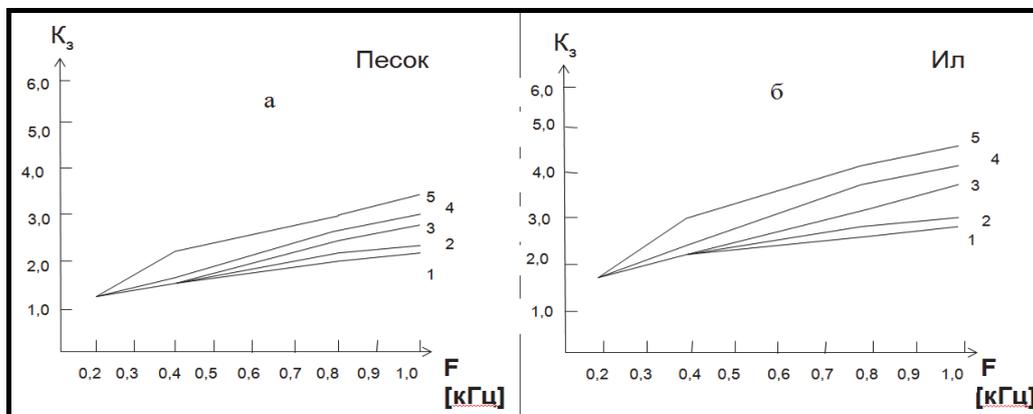


Рис. 9. Расчетные коэффициенты затухания звука в грунте различных бухт Приморского края [4]
 Fig. 9. Estimated coefficients of attenuation of sound in the soil of various bays of Primorsky Krai [4]

Многочисленные аналитические исследования подтвердили, что в мелком море шельфовой зоны, когда ветровые воздействия на водную поверхность способны влиять на придонные слои (глубина моря от 50 м и менее), нарушается горизонтальная плавность стратификации, появляются большие градиенты скорости. Амплитуды возбуждения основных мод теряют монотонность с увеличением глубины и становятся зависимыми от угла скольжения выходящего луча в окрестностях АТ. На рис. 10 [4] показаны две кривые распределения амплитуд первой моды для различных углов скольжения: а – для угла скольжения $1,5^\circ$, б – для угла скольжения, близкого к 0° . При больших углах скольжения возбуждаются моды с более плавным ростом амплитуды в зависимости от глубины. Скорость звука и плотность среды в нижнем полупространстве превышают аналогичные параметры верхнего полупространства.

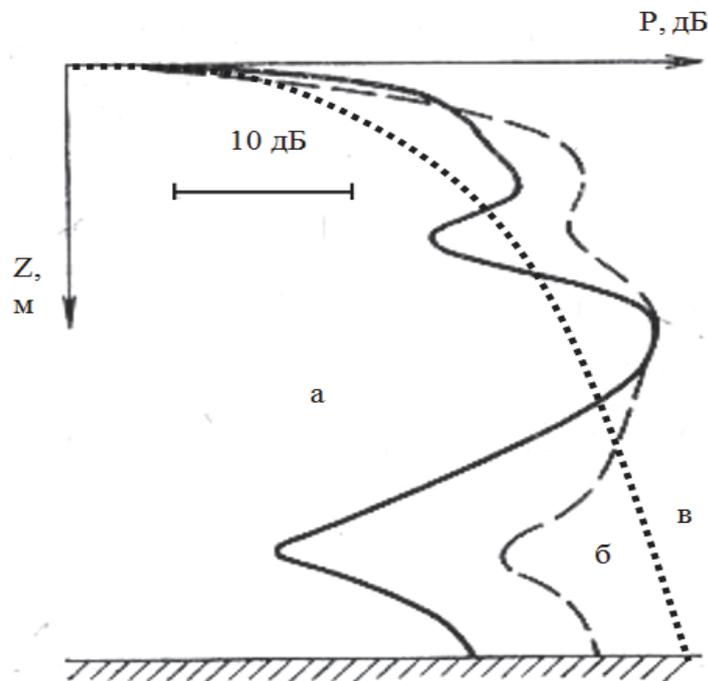


Рис. 10. Вертикальная структура поля в направлении оси излучателя:
а – $\beta = 1,5^\circ$; б – $\approx 0^\circ$; в – теоретический расчет [4]

Fig. 10. Vertical structure of the field in the direction of the axis of the emitter:
а – $\beta = 1,5^\circ$; б – $\approx 0^\circ$; в – estimated values [4]

Проведенные измерения стратификации водной среды в закрытых бухтах Приморского края по скорости звука представлены на рис. 11 [4]. Но при их формировании не учтены затухания, возникающие при отражении от дна и рассеяние при отражении от поверхности. Для удобства понимания выбран один предельный луч, распространяющийся прямолинейно и изменяющий свое направление при отражении от границ с резким изменением градиента скорости. Пренебрегая потерями на рассеяние при отражении, легко видеть, что траектории напоминают аттрактор, закручивающийся против часовой стрелки, и в отличие от аттрактора Лоренца, не имеющего бифуркаций. Такие аттракторы в теории динамического хаоса получили название странных аттракторов. Они при определенных параметрах имеют способность к автогенерации.

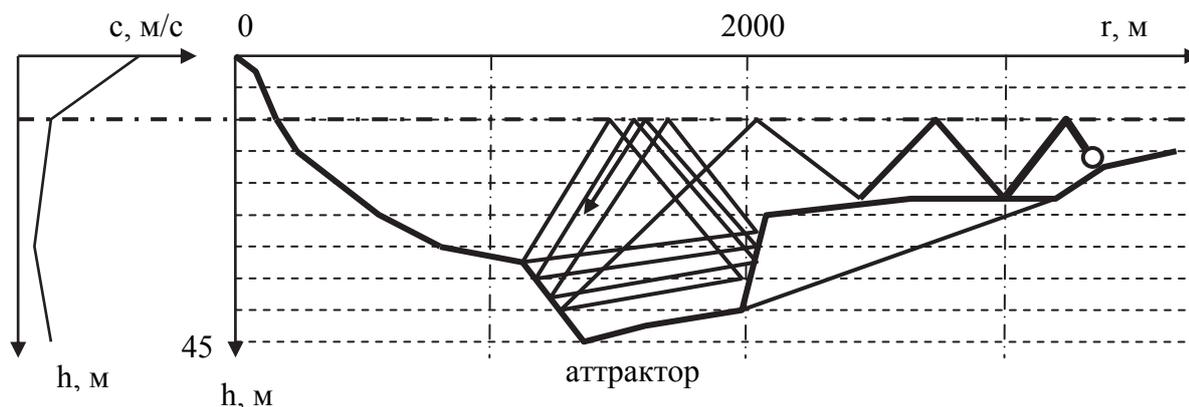


Рис. 11. Траектория одиночного предельного луча в водной среде с линзовым рельефом дна [4]
 Fig. 11. Trajectory of a single limiting beam in an aqueous medium with a lens bottom relief

Заключение

Все вышеизложенное в данной научной статье подтверждает факт о сложной картине формирования акустического поля в окрестностях АТ.

В окрестностях АТ с минимальным уровнем колебания поверхности моря будут наблюдаться бегущие и стоячие волны, влияющие на уровень помех и уровень полезного сигнала (бегущая волна несет энергию (прилив), стоячая волна (сейша) энергию не несет):

- в причинной связи (прилив, бегущая волна) – минимальное значение помехи и максимальное значение полезного сигнала;
- в следственной связи (сейша, стоячая волна) – минимальное значение помехи и интегрированное значение полезного сигнала по всем траекториям, приходящим в точку приема через разные среды.

Такое anomalous явление, как «амфидромические» системы (со структурой: Корейский пролив – открытая часть Японского моря – Татарский пролив) оказывает самое существенное влияние на процесс концентрации и распространения акустического поля в Японском море, которое можно считать «природной моделью» закрытого водоема или закрытой бухтой с несколькими проливами, где возможно формирование «квазистоячих» волн.

Сейши по большей части, хотя и не несут в себе какой-либо угрозы имуществу и безопасности населения приморских районов, представляют некоторую опасность для мореплавания. Узлы сейш располагаются у выхода из заливов и портов. В этих узлах происходят горизонтальные перемещения воды, которые при больших периодах сейш ($T > 0,5$ ч) способствуют возникновению в этих местах довольно сильных, быстро изменяющих свое направление течений, которые отрицательно влияют на управляемость судов, входящих в порт или выходящих из него.

Список литературы

1. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 524 с.
2. Справочник гидрографа по терминологии. Л.: ГУНИО МО, 1984. 286 с.
3. Шулейкин В.В. Физика моря. М.: Наука, 1968. 1083 с.
4. Халаев Н.Л., Стародубцев П.А., Димидов В.А. Некоторые концептуальные положения мониторинга океанской среды: монография. – Владивосток: ДВФУ, 2012. 224 с.

5. Жуков Ю.Н. Приливы и сейши. Как различить? // Метеорология и гидрология. Раздел Гидрография и морская картография. 2015. № 39. С. 42–48.
6. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Л.: ГИМИЗ, 1974. 303 с.
7. Ростов И.Д., Юрасов Г.И., Рудых Н.И. и др. Атлас по океанографии Берингова, Охотского и Японского морей. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2003. 400 с.
8. Шамраев Ю.И., Шишкина Л.А. Океанология. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 368 с.
9. Жуков Ю.Н. Анализ сейшевой модели образования амфидромических точек // Навигация и гидрография. 2004. № 18. С. 93–99.
10. Свинников А.И., Ярощук И.О. Геоакустическая модель шельфа Японского моря // Вестн. ДВО РАН. 2006. № 3. С. 85–93.

Сведения об авторах: Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор, e-mail: spa1958@mail.ru;

Бакланов Евгений Николаевич, доцент, e-mail: baklanoven@mail.ru;

Халаев Николай Лукич, кандидат технических наук, e-mail: halaevn@mail.ru;

Москаленко Эдуард Владимирович, e-mail: vunc-vmf-tovmi@mail.ru.