

УДК 681.883

СПОСОБНОСТЬ ДЕЛЬФИНОВ (*TURSIOPS TRUNCATUS*) ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННО ИЗМЕНЯТЬ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

© 2019 г. К. А. Зайцева^{1,*}, В. И. Королев¹,
А. И. Кривченко¹, А. В. Ахи¹, Е. Ю. Бутырский¹

¹ Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: zaitseva@iephb.ru

Поступила в редакцию 04.06.2018 г.

После доработки 29.10.2018 г.

Принята к публикации 20.02.2019 г.

DOI: 10.1134/S0044452919030161

К настоящему времени имеются однозначные данные относительно адаптивных изменений длительности и интенсивности излучаемых дельфином локационных сигналов при решении им задач различной степени сложности. Однако наиболее противоречивые мнения существуют по вопросу о том, осуществляют ли дельфины целенаправленные изменения спектра излучаемых импульсов [1–5]. Поскольку тонкие механизмы адаптационных изменений в работе эхолокационной системы морских млекопитающих выявляются при решении животным сложных акустических задач, в данной работе была поставлена задача оценить возможность адаптационных изменений спектрально-временных характеристик излучаемых дельфинами сигналов при поиске подводных объектов, меняющих пространственные координаты (толща воды, поверхность) в условиях реверберационных помех.

Опыты проводили на двух афалинах (поочередно) в свайно-сетевом вольере размером 20 × 10 × 6 м, расположенном в морской бухте. Вольер был разделен на два отсека, один из которых был предназначен для проведения экспериментов, в другом животное находилось постоянно. Отсеки соединялись калиткой, которая открывалась только во время эксперимента. Применялась методика двигательных условных рефлексов с пищевым подкреплением в период обучения и во время эксперимента. Положительной мишенью служил полый латунный цилиндр высотой 120 мм, диаметром 120 мм, с толщиной стенок 5 мм. Отрицательной мишенью был стальной цилиндр тех же размеров. Для исключения зрительного различия мишени по цвету их покрывали краской цвета морской волны. До начала опытов дельфин находился в отсеке постоянного пребывания. В эксперименте перед животным ставилась задача обнаруже-

ния положительной мишени. Предварительно дельфин обучался занимать стартовую позицию в определенном месте отсека постоянного пребывания. Для исключения зрительного и акустического наблюдения дельфина за установкой мишеней в экспериментальном отсеке он отвлекался экспериментатором таким образом, что его роstrum оказывался над поверхностью воды. Мишени на капроновой леске погружались либо на глубину 1.5 м, либо на глубину 0.1 м от поверхности воды равномерно в случайном порядке. Расстояние от стартовой позиции дельфина до мишени составляло 8 м. Гидрофон, предназначенный для последующей записи сигналов, излучаемых дельфином при обнаружении положительной мишени, располагался в одной плоскости с мишенью в 1 м позади нее на глубине их погружения. По сигналу 5 кГц открывалась калитка и дельфин начинал поиск мишени. Латентный период нахождения на старте до момента начала движения к обнаруживаемой мишени составлял 3–5 с. Время от начала движения до завершения реакции у мишени, включая ее поиск и идентификацию, составляло 10–15 с. При правильном обнаружении и последующем различении мишени дельфин касался ее роstrumом и получал рыбу. Реакция на отрицательную мишень не подкреплялась. При достижении высокой идентификации производилась запись локационных сигналов дельфина при поиске и дифференцировке мишеней, расположенных в толще воды или вблизи поверхности. Регистрация сигналов осуществлялась от момента выхода из калитки до завершения реакции. Приемный гидрофон обеспечивал в полосе 0.5–200 кГц неравномерность амплитудно-частотной характеристики не более 3 дБ. Сигналы через усилитель подавались на АЦП и персональный компьютер для записи и последующей обработки. Энергетические спектры локаци-

онных сигналов и их временные реализации, а также графические материалы в виде накопленных 3 D разверток частотных спектров представлены на рис. 1. Статистический анализ проводился с помощью пакета обработки данных "SPSS for Windows V. 13". Обработано 1500 локационных импульсов.

Анализ сигналов показывает, что в ситуации, когда животному предъявлялась мишень в толще воды, сигналы представляли собой короткие по длительности (15 мкс) импульсы, энергетические спектры которых широкополосны, верхняя частота составляет до 140–170 кГц. Более сложная задача локационного обнаружения мишени представлялась дельфину, когда мишень находилась на границе раздела воздух-вода (рис. 1а, 1г, 1д). В этом случае восприятие локационного отраженного сигнала затрудняется мощной реверберационной помехой, которая у поверхности воды оказывается интенсивной и маскирует эхосигнал от мишени. В начале поиска мишени дельфин излучает обычный широкополосный (до 170 кГц) сигнал короткой длительности (15 мкс) (рис. 1б, 1в). При правильном различении мишеней дельфин адаптивно изменяет структуру излучаемого сигнала: а именно увеличивает его длительность до 45 мкс, сужает спектр до 40–60 кГц и увеличивает амплитуду. Измерение длительности импульса и ширины полосы спектра осуществлялось по порогу от 10% амплитуды сигнала относительно уровня шума. Статистическая обработка экспериментальных данных дала следующие результаты:

Ширина полосы спектра:	Длительность импульса:
1-й дельфин: 40.25 кГц; $\sigma = 1.37; \delta = 0.16$	35.89 мкс; $\sigma = 2.0; \delta = 0.22;$
2-й дельфин: 40.10 кГц; $\sigma = 1.52; \delta = 0.18$	36.16 мкс; $\sigma = 2.1; \delta = 0.24;$
$t_{cm} = 1.25; p > 0.1$	$t_{cm} = -1.61; p > 0.1$
Средн. знач.: 40.17 ± 0.12 кГц; $\sigma = 1.45;$	36.02 ± 0.16 мкс; $\sigma = 2.1$

Таким образом, статистически значимых различий в длительностях импульсов и ширине их спектров для исследуемых животных установлено не было.

Увеличение длительности, сужение спектра и увеличение амплитуды обеспечивает отстройку от помех, в том числе реверберационных, и эффективную идентификацию объекта путем повышения энергии сигнала.

Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют о том, что при решении задач эхолокационного обнаружения и идентификации объектов в условиях поверхностной реверберации дельфин применяет такой способ повышения эффективности работы, как увеличение интенсивности локационных импульсов, смещение частоты и

увеличение длительности. Поскольку амплитуда импульса возросла более, чем в два раза, ее статистическая обработка не требовалась. По данным разных авторов амплитуда зондирующих импульсов может увеличиваться до 400 раз [1, 2]. Подобный механизм перекрывания помехи является универсальным методом как у водных, так и наземных млекопитающих, независимо от того, применяют они акустические сигналы для эхолокации или коммуникации. Так, у летучих мышей наблюдается не только трехкратное увеличение интенсивности локационного сигнала, но и одновременно возрастает их длительность, т.е. увеличивается энергия эхосигнала. Человек широко пользуется интенсивностью голоса при речевой связи в различных акустических условиях от шепота в тишине до крика при высоком уровне помех. На введение помех человек реагирует увеличением интенсивности речи и растягиванием гласных звуков.

Эхолокационный сигнал дельфина представляет собой короткий импульс длительностью 15–100 мкс, имеющий очень крутой фронт и широкий спектр, простирающийся далеко в область ультразвука. Импульсный характер сигналов в значительной мере обеспечивает высокую эффективность работы сонара при поиске, обнаружении, идентификации и классификации объектов наблюдения. Однако длительность высокочастотных составляющих локационных импульсов дельфина мала, при этом он крайне ограничен в возможности ее увеличения. Поэтому повышение энергии сигнала достигается путем значительного увеличения его интенсивности. К механизмам, обеспечивающим высокую эффективность обнаружения, относится механизм временной селекции. При излучении в воду импульсов, сходных по форме и спектру с локационными импульсами дельфина, запускаемыми с регулируемой задержкой, имитирующей реверберационную помеху от различных источников, показано, что процент обнаружения мишени близок к 100% при задержке между эхом и помехой, превышающих 200 мкс при отношении эхосигнала/реверберация – 54 дБ. Защита от реверберации достигается у дельфина за счет высокого временного разрешения слуховой системы как в активном, так и в пассивном режиме локации [1]. Способность слуховой системы выделять сигнал от ближе расположенного предмета и подавлять сигналы от расположенного дальше (эффект предшествования), обнаруженная у человека, проявляется на сигналах с крутым фронтом нарастания, подобным эхолокационным импульсам дельфинов. Кроме того, можно предположить наличие у дельфинов специализированных механизмов блокировки слуховой системы в момент прихода мощных сигналов помехи и в повышении чувствительности слуха в момент приема слабых эхосигналов. Подобный механизм существует у летучих мышей. В гидролокационных технических системах при-

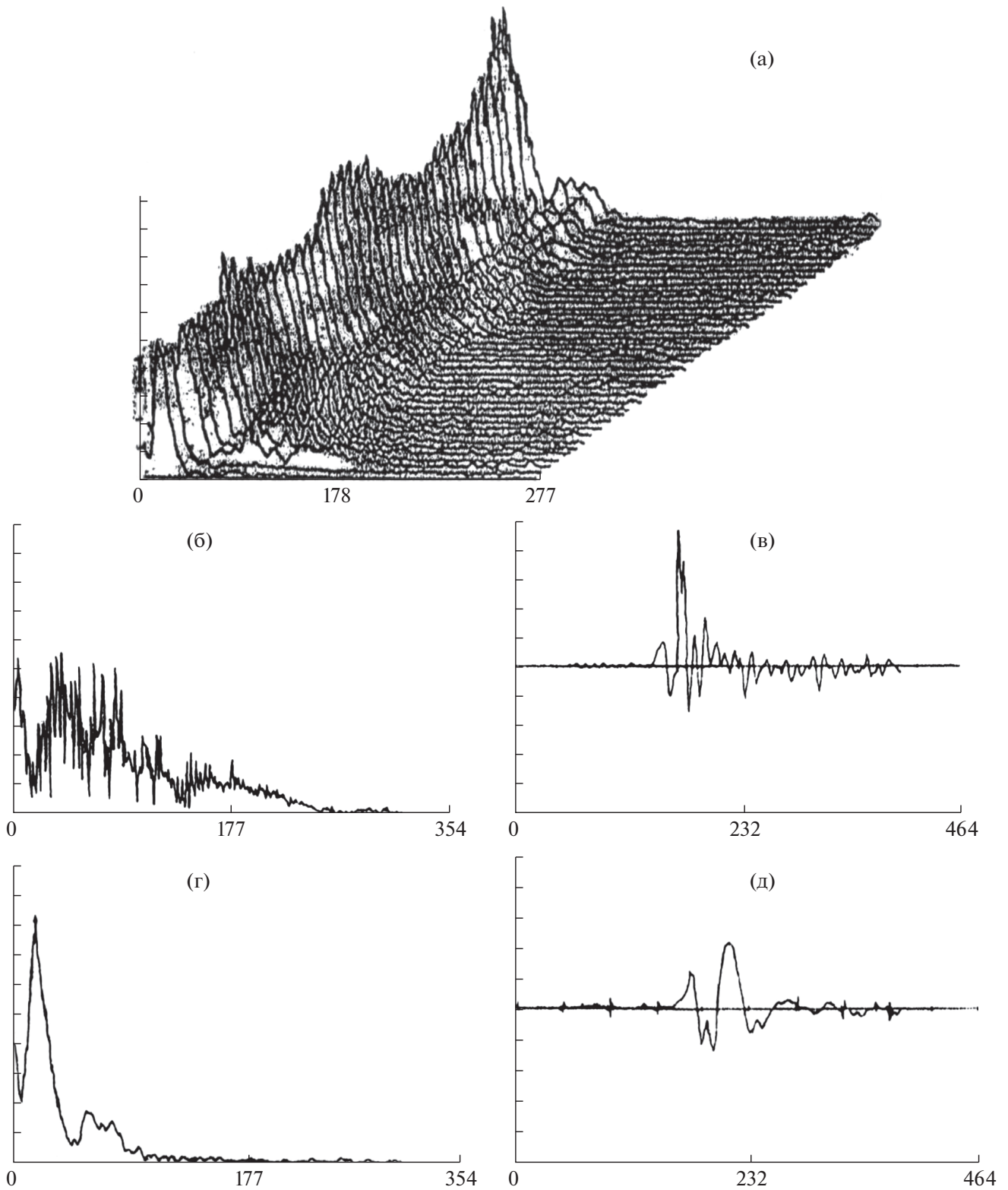


Рис. 1. Локационные сигналы при обнаружении мишеней у поверхности воды: (а) накопление спектральных разверток 3D, по оси абсцисс – частота сигнала в кГц; (б) спектр сигнала в начале поиска мишени, по оси абсцисс – частота сигнала в кГц; (в) временная реализация в начале поиска мишени, по оси абсцисс – время в мкс; (г) спектр сигнала при обнаружении мишени, по оси абсцисс – частота сигнала в кГц; (д) временная реализация при обнаружении мишени, по оси абсцисс – время в мкс. На всех рисунках а, б, в, г, д по оси ординат – амплитуда сигнала.

меняется способ временно́го стробирования, основанный на выделении временно́го участка, соответствующего наиболее вероятному приходу эхосигнала от объекта, что в значительной мере повышает эффективность этих систем. В технических гидролокационных системах, недостатком которых является узкополосность, их амплитуда и другие параметры локационных сигналов задаются заранее, определяя назначение системы, и остаются неизменными при любых ситуациях. Природные эхолокаторы в этом отношении характеризуются широкой пластичностью и возможностью адаптивных изменений спектрально-временно́х параметров излучаемых сигналов.

В настоящей работе подтверждается представление о высокой адаптивности эхолокационной системы дельфинов, способной изменять параметры локационных сигналов в зависимости от условий локации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России на 2018 г. Тема ПФНИГАН-63. Рег. АААА-А18-118013090245-6.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белькович В.М., Дубровский Н.А. Сенсорные основы ориентации китообразных. Наука. Л., 1976. [Belkovich V.M., Dubrovskiy N.A. Sensornyye osnovy orientatsii kitoobraznykh [Sensory systems of Cetacea] Leningrad., Nauka. 1976].
2. Айрапетьянц Э.Ш., Константинов А.И. Эхолокация в природе. Наука. Л., 1974. [Ayrapetians E.Sh., Konstantinov A.I. Ekholokatsiya v prirode [Echolocation in the nature] Leningrad., Nauka. 1974].
3. Зайцева К.А., Королев В.И., Кривченко А.И., Ахи А.В., Бутырский Е.Ю. Вероятность локационного обнаружения дельфином (*Tursiops truncatus*) подводных целей в зависимости от их пространственных координат. Ж. эвол. биохим. и физиол. 54 (2): 133–135. 2018. [Zaitseva K.A., Korolev V.I., Krivchenko A.I., Akhi A.V., Butyrskiy E. Yu., Probability of underwater target location by the dolphin *tursiops truncatus* depending on target spatial coordinates. J. Evol. Biochem. Physiol. 54 (2): 133–135. 2018. (In Russ).].
4. Au W.W.L., Floyd R.W., Penner R.H., Murchison A.E. Measurement of echolocation Atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncatus* Montagu in open waters. J. Acoust. Soc. Amer. 56 (4): 1280–1290. 1974.
5. Au W.W.L., Snyder K.J. Long-range target detection in open waters by on echolocation Atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncatus*. J. Acoust. Soc. Amer. 68: 1077–1084. 1980.

Dolphins *Tursiops truncatus* Are Able to Purposefully Change the Spectral and Temporal Parameters of Location Signals

K. A. Zaitseva^{a,#}, V. I. Korolev^a, A. I. Krivchenko^a, A. V. Akhi^a, and E. Yu. Butyrskiy^a

^a Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

[#]e-mail: zaitseva@iephb.ru