

УДК 543.88

К ВОПРОСУ ОБ ИЗЛУЧЕНИИ ДЕЛЬФИНОМ-АЗОВКОЙ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Н. А. Дубровский, П. С. Краснов, А. А. Титов

На основе анализа способностей дельфина-азовки к обнаружению и различению мишеней, а также к слуховому восприятию сигналов, с учетом экологических особенностей азовки высказана гипотеза о наличии у данного животного ультразвуковых локационных сигналов. Специальные опыты позволили подтвердить эту гипотезу и показать, что при решении задачи обнаружения дельфин-азовка использует локационные сигналы в диапазоне частот до 100 кгц. Полученные результаты заставляют пересмотреть прежние представления об эффективности эхо-локационного аппарата азовки.

В настоящее время твердо установлено наличие эхолокации у многих видов дельфинов (см., например, обзоры [1, 2]). При этом локационные способности различных видов и характеристики локационных сигналов у различных видов изучены не одинаково полно. В то время как локационные способности афалины (*Tursiops truncatus*) изучались многими авторами, исследованию эхолокации у азовки (*Phocaena phocaena*) посвящено всего две экспериментальные работы: работа по обнаружению азовкой тонких нитей, изготовленных из различных материалов, [3—7], и работа по различению высоты металлических цилиндров [8]. В этих работах утверждается, что спектр локационных сигналов азовки лежит в звуковом диапазоне частот с максимумом спектра на $1 \div 3$ кгц, т. е. в гораздо более низкочастотной области, чем спектр локационных сигналов афалины, простирающийся до 170 кгц. Между тем экологические особенности вида *Phocaena phocaena* и, в частности, азово-черноморского подвида — *Phocaena phocaena relicta* — дают основания полагать, что азовка при поиске пищи использует ультразвуковые сигналы. Известно, в частности, что более 70% пищи азовки составляют мелкие придонные рыбы, моллюски и ракообразные [9]. Обнаружение и опознание этих объектов питания вблизи или на фоне дна требует, очевидно, применения сигналов, длина волны которых сравнима с размерами объектов питания или меньше их, причем укорочение длины волны способствует фокусировке сигналов, что снижает донную реверберацию вследствие уменьшения размеров отражающего участка поверхности дна.

Обращает на себя также внимание определенное несоответствие между указанным выше предполагаемым частотным диапазоном локационных сигналов азовки, с одной стороны, и диапазоном слухового восприятия и способностью азовки к обнаружению и различению мишеней, с другой стороны.

Так, например, проведенные нами контрольные опыты по определению диапазона слуховой чувствительности азовки установили наличие поведенческих реакций дельфина на тональные звуковые сигналы длительностью порядка 1 сек в диапазоне частот от 10 до 100 кгц. Эти результаты подтверждаются также измерением слуховой чувствительности азовки, проведенными при помощи кожно-гальванических реакций [10]. Кроме того, из

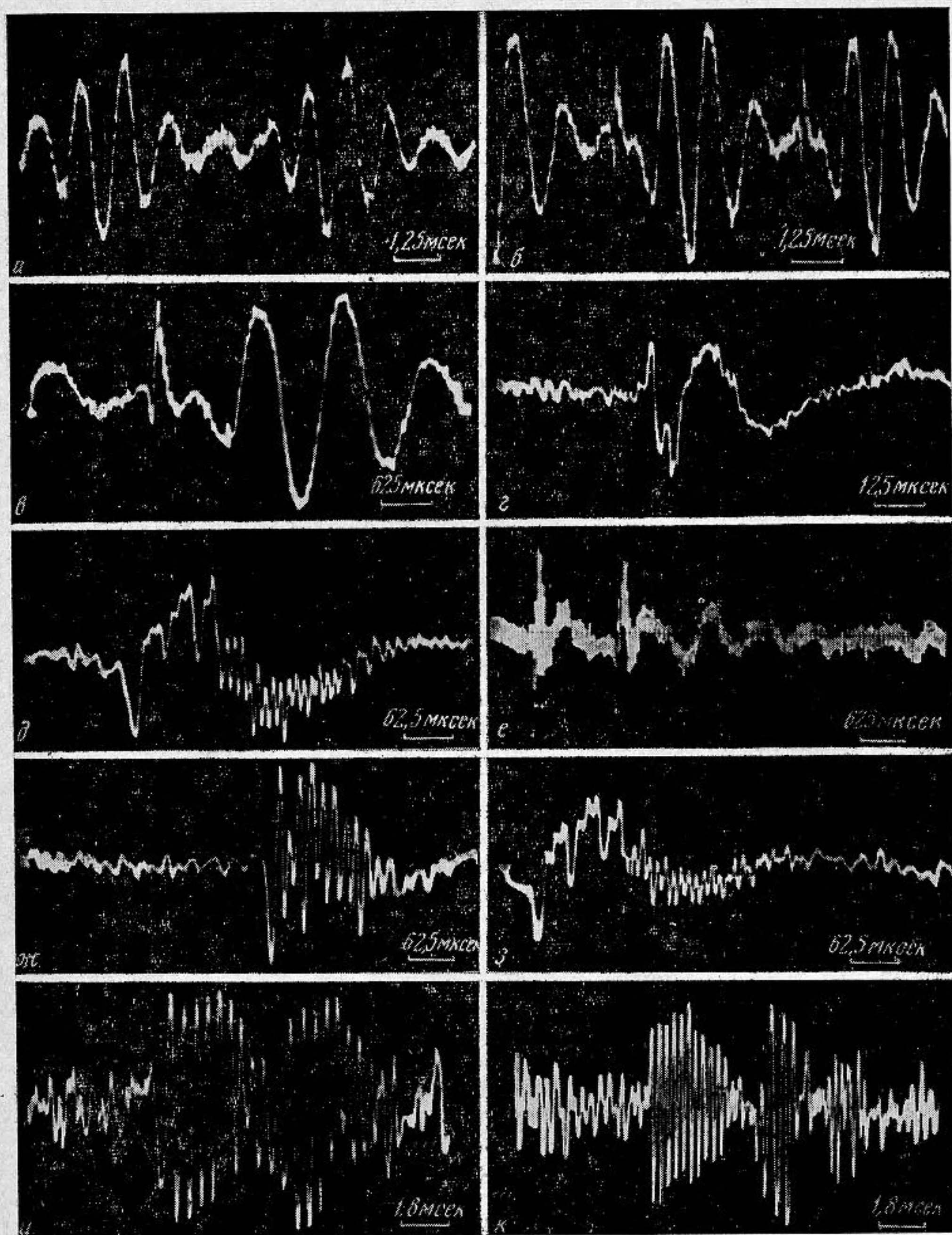
работ [3—7 и 11] следует, что азовка и летучая мышь (*Myotis lucifugus*), излучающая сигналы в диапазоне частот до 55 кГц, имеют сходные характеристики обнаружения металлических нитей диаметром 0,2 ÷ 0,3 мм, причем отношение диаметра нити d к длине волны λ для азовки (на частоте 3 кГц) равно $0,06 \cdot 10^{-2}$, а для летучей мыши (на частоте 55 кГц) — $5 \cdot 10^{-2}$, т. е. отношения d/λ отличаются почти на два порядка.

Следующим примером указанного выше несоответствия может служить приблизительно одинаковая надежность различения по высоте металлических цилиндров азовкой [8] и афалиной [12]. В обоих опытах пороговое отношение высот цилиндров было около 1, 2; хотя афалина в процессе различения применяла высокочастотные локационные сигналы в диапазоне 50 ÷ 70 кГц. В работе [12] отмечается, что, когда одна из подопытных афалин в начале опыта излучала сигналы на частоте около 2 кГц, то она могла различать цилиндры, если отношение их высот было равно 6. Увеличив в ходе тренировки частоту излучения до 50 ÷ 70 кГц, эта афалина смогла различать цилиндры при отношении их высот 1, 2.

Таким образом, как экологические особенности азовки, так и результаты опытов по оценке диапазона слухового восприятия и способностей к дифференцировке мишеней свидетельствуют о том, что в действительности азовка излучает ультразвуковые локационные сигналы, однако в силу ряда причин эти сигналы, насколько нам известно, до сих пор не были обнаружены. Одной из важнейших причин этого было, по-видимому, то, что уровень локационных сигналов азовки, по нашим наблюдениям, а также по наблюдениям других авторов [3—8], обычно не превышает 3 бар на расстоянии 1 м от головы животного. Для сравнения заметим, что уровень аналогичных сигналов у афалины и белобочки (*Delphinus delphis*) нередко превышает 1000 бар на том же расстоянии. Заметим, что низкий уровень сигналов азовки по сравнению с сигналами афалины и белобочки находится в соответствии с другими особенностями жизнедеятельности животного — тихостью и кормлением в придонном слое, когда значительно уменьшается необходимость дальнего обнаружения и стремительного преследования жертвы. Немаловажную роль могло играть и то, что высокочастотные локационные сигналы являются более направленными, чем низкочастотные, и поэтому их обнаружение на фоне акустических шумов в бассейне могло происходить только при излучении сигналов непосредственно в направлении гидрофона. Кроме того, азовка могла применять высокочастотные сигналы только при обнаружении и различении мишеней, а в остальных случаях, например, при акустической ориентации в бассейне ей было достаточно использовать низкочастотные сигналы. Норрис с соавторами [13] отмечают, например, что афалина, лишенная зрения с помощью присосок, применяла для ориентации в неглубоком бассейне низкочастотные сигналы, а при различении размеров мишеней — высокочастотные.

Учитывая вышесказанное, мы поставили эксперимент, в котором азовку приучали лоцировать область пространства в непосредственной близости от гидрофона или сам гидрофон. Для этого рыбой или посторонним предметом производился всплеск воды около гидрофона. Излучаемые во время движения к месту всплеска локационные сигналы регистрировались высокочувствительной аппаратурой записи в полосе 1—100 кГц, считая по уровню 0,7 от максимума. Во время опытов спектр сигналов наблюдался на $1/3$ -октавном параллельном спектроанализаторе ультразвуковых частот. Одновременно производился визуальный контроль положения животного и угла поворота головы относительно направления на гидрофон.

Было замечено, что в ряде подходов и при условии, что дельфин лоцировал гидрофон с расстояния не более 1 м, на экране спектрометра появляются всплески ультразвуковых составляющих с частотой около 100 кГц. Уровень этих высокочастотных составляющих превышал уровень фоновой активности на экране спектрометра всего в 2 ÷ 2,5 раза. Последующий тщательный осциллографический анализ показал, что азовка на-



ряду с низкочастотными сигналами использует для эхолокации ультразвуковые сигналы в диапазоне от 20 кГц до более чем 100 кГц. Осциллограммы сигналов, зарегистрированные нами при проведении описанного выше опыта, представлены на фиг. 1. На фиг. 1, а показаны осциллограммы типичных низкочастотных сигналов азовки (частота несущей $f_0 \approx 1$ кГц, длительность $\tau \approx 3$ мсек и развертка $S = 1,25$ мсек/см), а на фиг. 1, б — осциллограмма, на которой рядом с низкочастотными посылками видны высокочастотные импульсы, предшествующие низкочастотным ($S = 1,25$ мсек/см). Пара импульсов, где высокочастотный импульс предшествует низкочастотному, представлена на фиг. 1, в при $S = 0,625$ мсек/см, а отдельный высокочастотный импульс одной из пар показан на фиг. 1, г при $S = 0,125$ мсек/см. Нетрудно видеть, что этот вы-

сокочастотный импульс с длительностью около 200 мксек содержит четко выраженную составляющую на частоте 25 кгц, а импульс, показанный на фиг. 1, д, имеет составляющую с частотой выше 100 кгц. Время развертки в последнем случае было 62,5 мксек/см. На основании анализа экспериментальных записей, полученных во время опыта по локации рыбы в месте расположения гидрофона, удалось установить, что высокочастотные импульсы независимо от их спектра наблюдаются только вместе с низкочастотными импульсами, всегда предшествуя им.

Следует отметить, что высокочастотный импульс имеет крутой передний фронт в отличие от низкочастотного, который нарастает плавно и имеет, как правило, колоколообразную форму; при этом средний интервал между началом высокочастотного импульса и центром низкочастотного импульса оставался практически постоянным. Было замечено также, что дельфин мог излучать с небольшим интервалом два высокочастотных импульса (фиг. 1, е, $S = 0,625$ мсек/см), причем частота первого из них (фиг. 1, ж) была равна приблизительно 65 кгц, а частота второго (фиг. 1, з) была больше 100 кгц и совпадала с таковой для часто встречающегося высокочастотного импульса, изображенного на фиг. 1, д. Время развертки на фиг. 1, ж и 1, з одно и то же и равно 62,5 мксек/см. На фиг. 1, д и 1, з видно, что высокочастотные импульсы, кроме составляющей на частоте около 100 кгц, содержат также ультразвуковые составляющие на частоте в 3 раза меньшей, т. е. около 30 кгц.

Из приведенных данных с несомненностью следует, что азовка может излучать локационные сигналы в диапазоне не только низких звуковых, но и ультразвуковых частот, по крайней мере до 100 кгц. Однако в отличие от афалины и белобочки, у которых излучение звуковых и ультразвуковых сигналов может осуществляться независимо, ультразвуковые сигналы азовки довольно жестко привязаны во времени к моменту излучения звуковых сигналов, всегда предшествуя им. Остается пока неясным применяет ли азовка фазовую привязку высокочастотных и низкочастотных сигналов только при обнаружении мишеней или также и при решении других задач эхолокации: различения, опознавания и т. п.

Заметим, дополнительно, что при различении мишеней азовка может излучать дуплеты низкочастотных импульсов, основные частоты которых могут быть либо одинаковыми (фиг. 1, и, $S = 1,8$ мсек/см), либо заметно отличаться друг от друга (фиг. 1, к $S = 1,8$ мсек/см), оставаясь в пределах низкочастотного диапазона, причем в отличие от регулярно повторяющихся дуплетов типа «ультразвуковой — звуковой» (фиг. 1, б и 1, в) низкочастотные дуплеты возникают во времени весьма нерегулярно. Однако дуплеты низкочастотных импульсов ни разу не наблюдались в опыте по обнаружению рыбы.

Установленный нами факт существования у азовок ультразвукового излучения представляется логичным с точки зрения экологии животного и устраняет отмеченное в начале статьи несоответствие между диапазоном слухового восприятия и способностью к обнаружению и различению мишеней азовок, с одной стороны, и частотным диапазоном зондирующих локационных импульсов — с другой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Романенко. О гидролокационной способности дельфинов. Акуст. ж., 1964, 10, 4, 385—397.
2. K. S. Norris. Some problems of echolocation in cetaceans. Marine Bio-acoustics. Pergamon Press, Oxford, 1964, 317—336.
3. R.-G. Busnel, A. Dziedzic, S. Andersen. Sur certaines caractéristiques de signaux acoustiques du Marsouin *Phocaena phocaena*. Compt. rend. Acad. sci., 1963, 257, 2545—2548, 21 oct.
4. R.-G. Busnel, A. Dziedzic, S. Andersen. Seuils de perception du système sonar du Marsouin *Phocaena phocaena*, en fonction du diamètre d'un obstacle filiforme. C. r. Acad. sci., 1965, 260, 295—297.

5. R.-G. Busnel, A. Dziedzic, S. Andersen. Rôle de l'impédance d'un cible dans le seuil de sa détection par le système sonar de Marsouin *Phocaena phocaena*. C. r. Soc. biol., 1965, 159, 1, 69—74.
6. R.-G. Busnel, A. Dziedzic. Resultats metrologique experimentaux de d'echolocation chez le *Phocaena phocaena* et leur comparaison avec ceux de certaines chauves-souris. Animal sonar system, 1967, 1, 307—335, R.-G. Busnel ed. INRA—CNRZ, Jouy-en-Josas, France.
7. A. Dziedzic. Quelques performances des systèmes de détection par echos des chauves-souris et des delphinidae. Rev. d'Acoust., 1968, 1, 23—28.
8. Г. Л. Заславский, А. А. Титов, В. М. Лекомцев. Исследование гидролокационных способностей дельфина-азовки. Отчет Карадагского отделения Института биологии южных морей, 1969 г.
9. А. Г. Томилин. Китообразные фауны морей СССР. Изд-во АН СССР, 1962.
10. А. Я. Супин, М. Н. Сухорученко. Слуховая чувствительность дельфина-азовки, измеренная по кожно-гальваническим реакциям. Тр. V Всес. школы-семинара по автоматическому распознаванию слуховых образов, М., 1970, 194—199.
11. D. R. Griffin. Listening in the dark. Yale Univ. Press, 1958.
12. Э. Ш. Айрапетьянц, А. Г. Голубков, И. В. Ершова, А. Р. Жежерин, В. Н. Зворыкин, В. И. Королев. Эхолокационное дифференцирование и характеристика излучаемых импульсов у дельфинов. Докл. АН СССР, 1969, 188, 5, 1197—1199.
13. K. S. Norris, N. E. Evans, R. N. Turner. Echolocation in an atlantic bottlenose porpoise during discrimination. Animal sonar system, 1967, 1, 409—437, R.-G. Busnel ed. INRA — CNRZ, Jouy-en-Josas, France.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
28 апреля 1970 г.