

УДК 534.87

**ВЛИЯНИЕ ПОЛОСОВЫХ ШУМОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ЭХО-ЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ МИШЕНИ  
ЛЕТУЧИМИ МЫШАМИ RHINOLOPHUS FERRUM-EQUINUM**

*А. И. Константинов, А. К. Макаров, В. Н. Мовчан*

Изучалось влияние белого шума, ограниченной полосой 2—250 кГц, 2—50, 40—70 и 35—85 кГц, а также акустических частотно-модулированных помех различной интенсивности и спектральной плотности на обнаружение неподвижного шара ( $D=21$  мм) летучими мышами *Rhinolophus ferrum-equinum* с места старта. В условиях широкополосного шума (2—250 и 35—85 кГц) *Rhinolophus* переставал надежно обнаруживать мишень при интенсивности шума 50 дБ и спектральной плотности +2 дБ, тогда как шумы полосой 2—50 и 40—70 кГц не влияли на обнаружение мишени даже при максимальной интенсивности 60 дБ. Помеха в узкой полосе 72—75 кГц, перекрывающая частотно-модулированную заключительную часть локационного сигнала, оказывает то же влияние, что и шум широкой полосы. Анализ локационных сигналов показал, что при действии шумов амплитуда частотно-модулированной части сигнала увеличивается больше, чем амплитуда средней части сигнала, по сравнению с их значениями при отсутствии помех. Делается вывод, что частотно-модулированная часть сигнала является наиболее информативной для обнаружения предметов в условиях, когда *Rhinolophus* не может пользоваться эффектом Доплера. Обсуждается помехозащищенность эхо-локационной системы *Rhinolophus* и приводится ее количественная оценка.

Летучие мыши в своей повседневной жизни непрерывно сталкиваются с необходимостью выделения полезного сигнала на фоне различных акустических помех естественного и биологического происхождения, а также помех, причинно связанных с излученными сигналами (собственных зондирующих сигналов, отражений от препятствий, не являющихся в данный момент объектами локации). В настоящее время в результате нейрофизиологических исследований [1—4] выявлены некоторые приспособительные механизмы в слуховой системе, которые обеспечивают этим животным возможность отстраиваться от влияния помех. Кроме того, известно, что при работе в постоянно действующем шумовом поле летучие мыши используют простой, но эффективный метод — при увеличении мощности шума увеличивают интенсивность и длительность зондирующих импульсов [5], что приводит к возрастанию энергии сигнала и улучшает эффективность обнаружения цели.

Первая попытка оценить величину помехозащищенности эхо-локационной системы летучих мышей (*Plecotus*) была предпринята в работах [6, 7] при использовании методики обнаружения барьеров из вертикальных проволок в присутствии широкополосного шума, перекрывающего диапазон частот локационного сигнала животного. Расчеты показали, что в момент обнаружения отношение энергии отраженного сигнала к мощности шума в расчете на один период составило — 5 дБ. Учитывая характер полета животного к препятствию, способность слуховой системы дискриминировать сигнал и шум по их направлениям и эффекты бинаурального взаимодействия на уровне слуховых центров, авторы приходят к

выводу, что эффективность эхо-локатора летучих мышей, согласно теории обнаружения, близка к «идеальному» приемнику.

Все изложенное выше касается лишь некоторых представителей в основном одного семейства летучих мышей — *Vespertilionidae*, использующих короткие частотно-модулированные локационные сигналы. В то же время помехозащищенность у подковоносых летучих мышей *Rhinolophidae*, обладающих совершенно другими параметрами локационных сигналов и особым типом локации [8–10], не подвергалась экспериментальной разработке.

Цель настоящего исследования — выяснение влияния широкополосного шума на эффективность эхо-локационного обнаружения неподвижной шаровой мишени большим подковоносом *Rhinolophus ferrum-equinum* и на основании полученных данных оценка помехозащищенности его эхо-локационной системы. Кроме того, мы пытались выяснить удельное значение моночастотной и частотно-модулированной частей локационного сигнала для решения этой конкретной задачи.

Методика проведения опытов была следующей. Животное с места старта должно было обнаружить стальной шар диаметром 21 мм, подвешенный на тонкой нити на расстоянии 106 см и по прямой траектории подлететь к нему. После посадки на шар животное получало пищевое подкрепление (мучного червя) и возвращалось на исходное место, а мишень перемещалась в другое положение. Были две фиксированные точки для предъявления шара, справа и слева от старта под углом  $45^\circ$  и появление мишени в каждой из них в ходе опытов было равновероятным. Обнаружение считалось надежным на уровне положительных ответов не ниже 75%. Использование сферы явилось единственной удачной возможностью обеспечить стабильное эхо независимо от ракурса облучения и дало возможность произвести точный расчет его интенсивности.

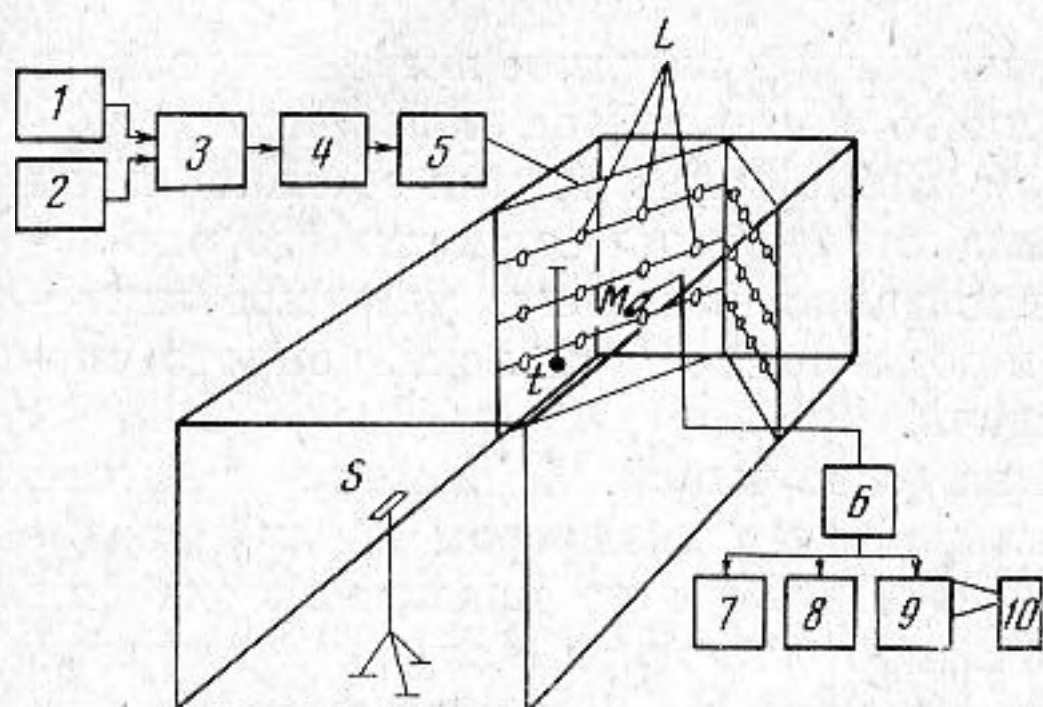
После выработки и закрепления у животных рефлекса на шар включался шум, амплитудные и частотные параметры которого последовательно изменялись. Использовались следующие виды акустических помех: 1) белый шум, ограниченный полосой частот 2–250 кГц, 2–50, 40–70, 35–85 кГц; 2) частотно-модулированная помеха с различной шириной спектра.

Комплекс аппаратуры для создания помех состоял из генераторов шума, полосовых фильтров, усилителей мощности и излучающей системы, состоящей из 24 конденсаторных излучателей. Излучатели были направлены на стартовую площадку, располагались на двух вертикальных рамах, поставленных под углом  $60^\circ$  (фиг. 1), и были завешены акустически полупрозрачной тканью. Такое расположение излучателей позволило создать шумовое поле с неравномерностью  $\pm 1,5$  дБ (учитывая характеристики направленности приема животного) в объеме, ограниченном углами  $80^\circ$  по горизонтали и  $60^\circ$  по вертикали.

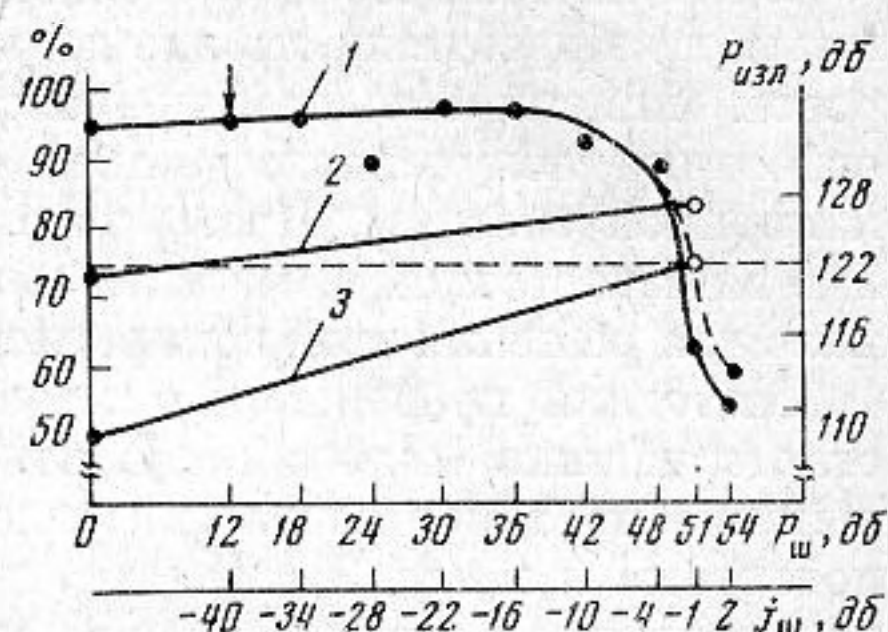
В случае применения помех первого вида использовались два генератора типа Г2-1, подключенные к усилителям мощности, нагруженным через аттенюатор на конденсаторные излучатели. Полоса частот шума регулировалась введением полосовых фильтров. В случае создания помех второго вида использовался ЧМ-генератор, модуляция частоты которого осуществлялась синусоидально с периодом 1 мсек, а величина девиации и несущая частота оставались заданными. Использование ЧМ-помехи позволило провести исследование помехозащищенности больших подковоносов в узкой полосе частот, перекрывающих отдельные части локационного сигнала. Опыты были проведены на трех взрослых предварительно энуклеированных животных. Перейдем к рассмотрению результатов экспериментов.

Первоначальное включение шума с полосой частот 2–250 кГц и интенсивностью в месте старта 12 дБ (относительно нулевого уровня  $10^{-16}$  вт/см<sup>2</sup>) не повлияло на эффективность обнаружения цели живот-

ными. При дальнейшем увеличении интенсивности шума обнаружение оставалось таким же надежным, что и в тишине (фиг. 2). Лишь при уровне шума 48 дБ были отмечены изменения в поведении летучих мышей, выразившиеся в увеличении времени, необходимого для обнаружения, а также уменьшение надежности обнаружения. При уровне шума 51 дБ процент положительных ответов стал меньше 75%, а при уровне 60 дБ мыши вообще отказывались летать в сторону шара, стараясь вылететь из зоны действия шума.



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Схема опыта и блок-схема использованной аппаратуры. Шумовой комплекс: 1, 2 — генераторы шума, 3 — двухканальный усилитель мощности, 4 — набор фильтров, 5 — аттенюатор, L — излучатели. Комплекс регистрации: M — микрофон; 6 — микрофонный усилитель, 7 — ультразвуковой магнитофон, 8 — измеритель девиации частоты, 9 — двухлучевой катодный осциллограф, 10 — кинорегистратор, S — старт, t — мишень

Фиг. 2. Влияние широкополосного шума на обнаружение шара и изменение интенсивности локационного сигнала. По оси ординат (слева) — уровень обнаружения.  $P_{ш}$  — интенсивность шума,  $j_{ш}$  — спектральная плотность шума,  $P_{изл}$  — интенсивность излучаемого сигнала (на расстоянии 10 см от головы животного). 1 — уровень обнаружения шара, 2 — изменение интенсивности моночастотной части сигнала, 3 — изменение интенсивности частотно-модулированной части сигнала. Стрелкой отмечен момент включения шума; пунктиром показан уровень обнаружения спустя 15 дней

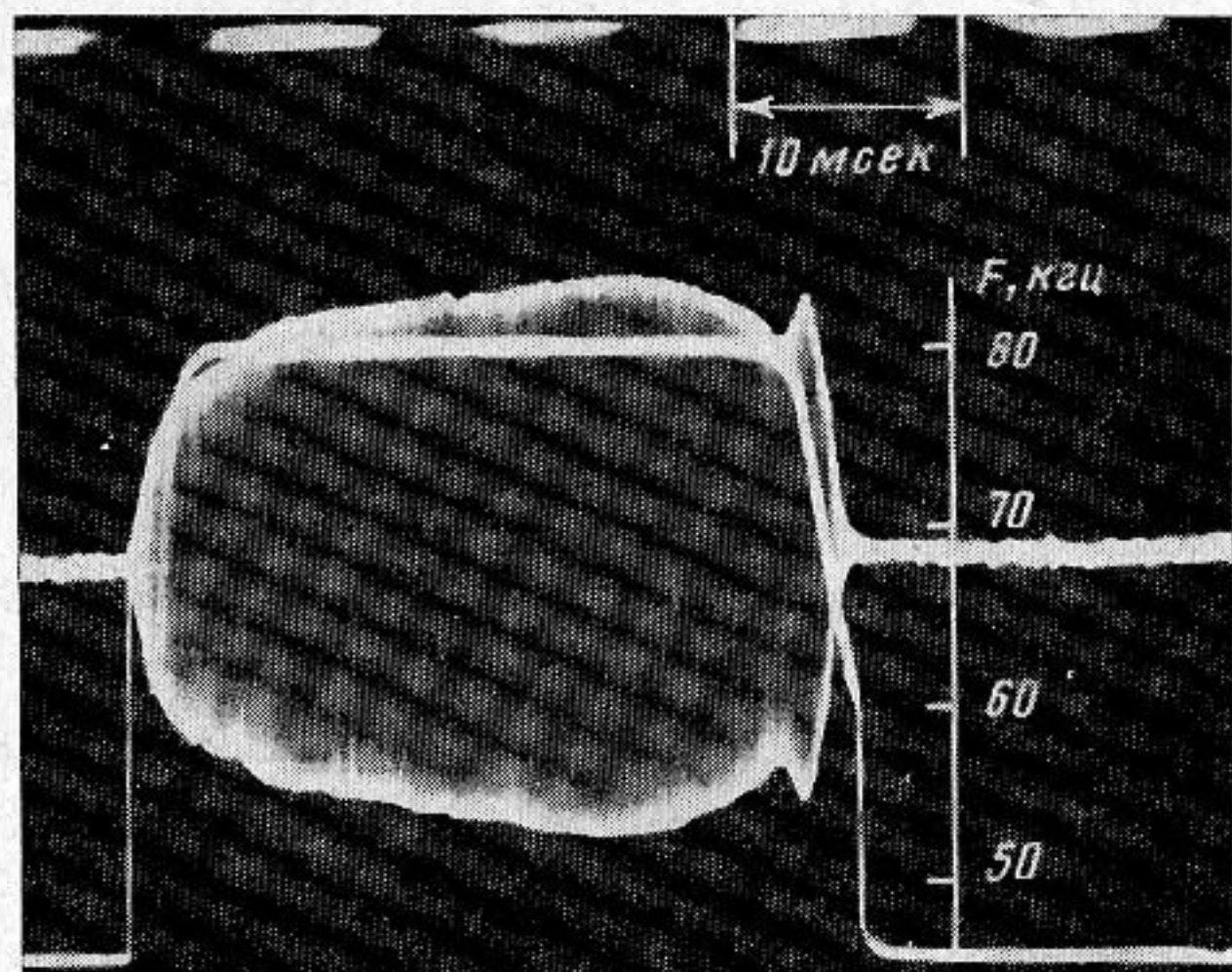
Чтобы проверить, не является ли шум такой интенсивности уже болевым раздражителем, животным был предъявлен шар большего диаметра при шуме с уровнем до 54 дБ (мышь 2) и до 63 дБ (мышь 1). В этой серии опытов летучие мыши обнаруживали шар с такой же высокой надежностью, как и без шума, следовательно, «предельное» значение шума действовало на подковоносов лишь как акустическая помеха при обнаружении полезного сигнала.

В ходе опытов регулярно производилась запись излучаемых локационных сигналов на ультразвуковой магнитофон и киносъемка их с экрана осциллографа. Как показал анализ проведенных записей, поиск и обнаружение животными тест-объекта со старта осуществлялся посредством одиночных сигналов длительностью около 50 мсек. Частота заполнения на протяжении большей части импульса сохранялась постоянной и равнялась 81–82 кГц. В начале и в конце импульсов на протяжении 2–3 мсек отмечалось снижение частоты в среднем на 10 и 17 кГц соответственно. Амплитуда сигнала на протяжении его моночастотной части колебалась незначительно, однако в конце импульса, имеющем частотную девиацию, как правило, наблюдался ее всплеск (фиг. 3).

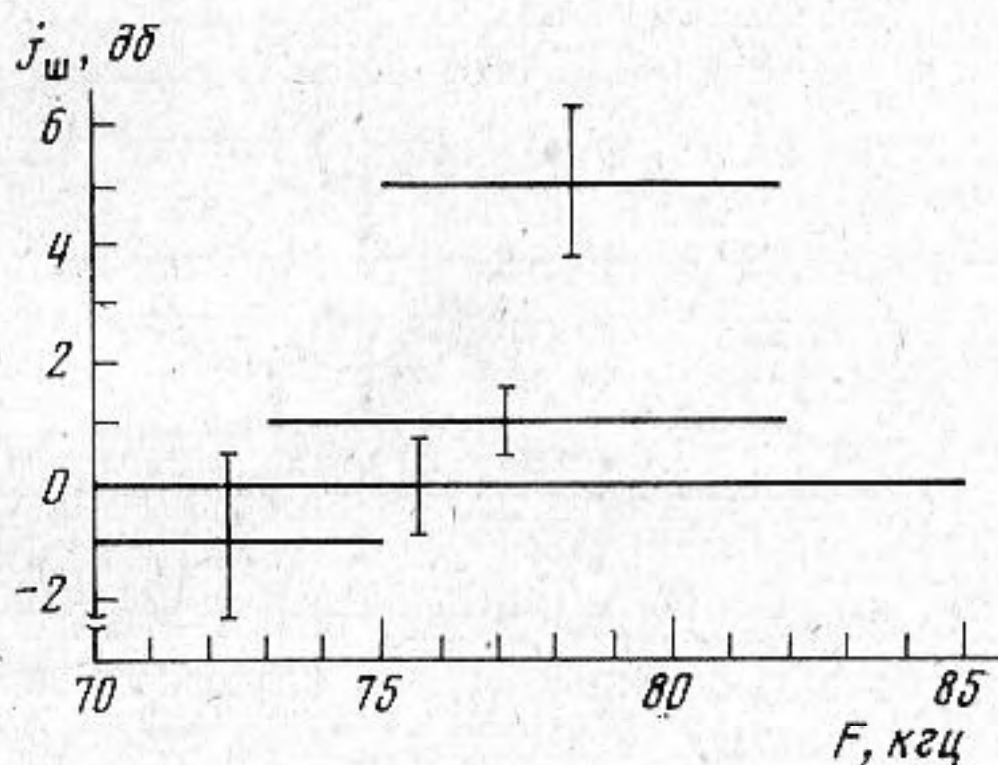
Интенсивность моночастотной части излучаемых сигналов для расстояния 10 см от головы животного в опытах без шума составляла 121 дБ, а при интенсивности шума полностью маскирующего эхо от шара увеличивалась, достигая 127 дБ. Еще более заметные изменения интенсивности наблюдались на частотно-модулированной части, которая увеличива-

лась от 107 дб (в тишине) до 122 дб (при шуме), с максимумом амплитуды на частоте порядка 74 кГц (фиг. 2).

После определения величины широкополосного шума, при котором животные переставали обнаруживать шар, были использованы шумы в полосах 2–50, 40–70 и 35–85 кГц. Шумы с полосой 2–50 и 40–70 кГц



Фиг. 3. Осциллограмма одиночного импульса при максимальном значении интенсивности шума (импульс пересекает линия, показывающая его частотное заполнение)



Фиг. 4. Влияние узких полос помехи на маскировку отраженного сигнала;  $j_{ш}$  — спектральная плотность шума,  $F$  — частотный диапазон помехи. Отрезками обозначена ширина полосы шума при той величине спектральной плотности, которая вызвала падение уровня обнаружения до значения 75%

при интенсивности 55 дб не оказали заметного влияния как на результативность обнаружения шара, так и на поведение животных во время опыта. При этом спектральная плотность шума на 11 дб превышала плотность предельного широкополосного шума.

С другой стороны, шум в полосе 35–85 кГц, так же, как и широкополосный шум (2–250 кГц), полностью исключал возможность обнаружения животными тест-объекта при уровне шума 49 дб и спектральной плотности +2 дб. После проведения дополнительной серии опытов с полосой 2–250 кГц оказалось, что порог восприятия эхо-сигнала на фоне

широкополосного шума понизился на 3 дб; значение спектральной плотности стало тем же, что и для полосы шума 35—85 кгц (для уровня 75% — +1 дб).

Уточняя частотные границы шума, влияющие на эффективность обнаружения шара летучими мышами, мы использовали узкополосные помехи. Первоначально исследовалось влияние помехи с полосой 70—85 кгц, захватывающей не только частотный диапазон локационного сигнала подковоноса, но и частоты, возникающие в отраженном сигнале в результате эффекта Доплера (83,5 кгц) [10]. Оказалось, что летучие мыши не могли надежно обнаружить тест-объект (надежность обнаружения становилась меньше 75%) при тех же значениях интенсивности и спектральной плотности, что и при шуме полосой 35—85 кгц. Тогда мы попытались выявить наиболее информативную часть локационного сигнала для осуществления животными поставленной задачи.

В первой серии опытов проверялась значимость моночастотной части и ее доплеровского приращения. В опытах использовалась помеха в полосе 80—85 кгц, увеличение интенсивности которой вызвало падение надежности обнаружения до величины 75% лишь при спектральной плотности помехи +5 дб.

Во второй серии исследовалась информативность частотно-модулированной части с использованием помехи в полосе частот 70—80 кгц, которая оказала на эффективность обнаружения шара то же действие и при тех же значениях спектральной плотности, что и шум широкой полосы. Аналогичный результат получился и при помехе 70—75 кгц. В то же время использование помех 75—82 кгц при спектральной плотности 0 дб не повлияло на эффективность обнаружения, а снижение надежности обнаружения до 75% произошло при спектральной плотности +6 дб.

В связи с тем, что мы не располагали возможностью генерировать помехи в полосе уже, чем 5 кгц, для уточнения границ наиболее информативной части сигнала использовалась помеха в полосе 72—82 кгц. Выяснилось, что эта полоса частот, так же как и полоса частот 70—75 кгц исключает возможность надежного обнаружения цели животным при спектральной плотности помехи больше +1 дб (фиг. 4).

Результаты проведенных экспериментов показывают, что на эффективность обнаружения неподвижного шара большими подковоносами из всей области широкополосного шума (2—250 кгц) наибольшее влияние оказывает полоса частот 72—75 кгц. Эта же полоса частот соответствует ярко выраженному амплитудному пику частотно-модулированной части их локационного сигнала.

Влияние шума на эхо-локацию у летучих мышей происходит, по всей вероятности, по тому же принципу, что и слуховая маскировка у других млекопитающих и у человека. Известно [11], что, например, у человека на восприятие тона влияют лишь те частоты шума, которые захватывают критическую полосу, соответствующую данному тону. Поэтому, можно предположить, что частотный диапазон помехи 72—75 кгц близок к частотам локационного сигнала, которые имеют ведущее значение в обнаружении летучими мышами неподвижных предметов. Иными словами, наиболее информативной областью локационного сигнала большого подковоноса, по крайней мере в условиях нашего эксперимента, является частотно-модулированная его часть, соответствующая частотам 72—75 кгц. О значимости этой части сигнала говорит также и более быстрое, чем в моночастотной части, увеличение интенсивности ее амплитудного пика при возрастании уровня шума (фиг. 2). Кроме того, это подтверждают и результаты электрофизиологических исследований [12], которые показали, что колликулярные вызванные потенциалы большого подковоноса значительно увеличиваются в ответ на конечную частотно-модулированную часть акустических стимулов, имитирующих естественный эхо-локационный сигнал.

В других ситуациях для животных может оказаться более информативной моночастотная часть локационного сигнала, так как при отражении от летящего насекомого возникает амплитудная модуляция в пределах 30 дБ [13], характер которой способствует обнаружению последнего на фоне неподвижного окружения.

Полученное в результате наших экспериментов значение уровня шума, полностью маскирующего эхо-сигналы от шара, и знание информативной части сигнала дает возможность количественно оценить помехозащищенность локационного аппарата больших подковоносов величиной отношения интенсивности отраженного сигнала к интенсивности шума в полосе частот сигнала (72–75 кГц), выраженной в децибелах.

Определение величины отраженного сигнала ( $P_{отр}$ ) в месте старта животного производилось в соответствии с выражением для расчета звукового давления сигнала, отраженного от сферы [14]:

$$P_{отр} = \frac{P_0 a}{2r_0} f_{\infty} e^{-\alpha r_0},$$

где  $P_0$  — амплитуда звукового давления на шаре (для  $P_{изл} = 25,6 \text{ н/м}^2$  или 122 дБ и расстояния 106 см  $P_0 = 1,61 \text{ н/м}^2$  или 98 дБ),  $a$  — радиус сферы,  $r_0$  — расстояние от источника звука до центра сферы,  $c$  — скорость звука в воздухе,  $\alpha$  — коэффициент поглощения ультразвука в воздухе,  $f_{\infty}$  — комплексная функция безразмерной частоты  $ka$ ,  $k$  — волновое число.

Величина отраженного от мишени зондирующего сигнала, полученная в результате расчетов, составила  $P_{отр} = 0,005 \text{ н/м}^2$  или 48 дБ.

Этот результат был подтвержден экспериментально на установке для ультразвукового моделирования [15]. Определялась сила цели  $T_{ц} = 20 \log P_{отр}/P_0$  в зависимости от волнового размера  $ka$  для стальных шаров. Для шара диаметром 21 мм при частоте излучения 74 кГц сила цели при расстоянии от мишени 106 см оказалась равной  $T_{ц} \approx -49 \text{ дБ}$ , что близко к расчетной величине ( $-50 \text{ дБ}$ ).

Интенсивность шума в полосе частот 72–75 кГц определялась из соотношения  $I_{ш} = j_{ш} + 10 \lg(\Delta f)$ , где  $j_{ш}$  — спектральная плотность шума,  $\Delta f$  — ширина полосы шума ( $\Delta f = 3 \text{ кГц}$ ), и составила 34 дБ.

Таким образом, в случае диффузного белого шума помехозащищенность эхо-локационной системы большого подковоноса определяется величиной  $48 - 34 = 14 \text{ дБ}$ . Однако в естественной обстановке летучие мыши способны обнаруживать сигналы с большой эффективностью благодаря экранировке помех ушными раковинами и использованию существующей в слуховых центрах избирательной настройки по углу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. D. Grinnell. The neurophysiology of audition in bats. J. Physiol., 1963, 167, 1, 38–127.
2. A. D. Grinnell. Mechanisms of overcoming interference in echolocating animals. Animal sonar systems. Biology and Bionics, 1967, 1, Ed. R. G. Busnel, JNRA—CNRZ, 451–481.
3. O. W. Henson, Jr. The activity and function of the middle ear muscles in echolocation bats. J. Physiol., 1965, 180, 4, 871.
4. Д. П. Магюшкин, А. Г. Васильев. Биоэлектрические реакции на ультразвуки и их маскировка белым шумом в слуховой системе летучих мышей. Вестн. ЛГУ, 1968, 15, 3, 94–98.
5. Э. Ш. Айрапетьянц, А. И. Константинов. Эхо-локация в природе. Л., «Наука», 1970.
6. D. R. Griffin, A. D. Grinnell. Ability of bats to discriminate echoes from louder noise. Science, 1958, 128, 3316, 145–147.
7. D. R. Griffin, J. J. G. McCue, A. D. Grinnell. The resistance of bats to jamming. J. Exp. Zool., 1963, 152, 3, 229–250.
8. А. И. Константинов, Б. В. Соколов. Характеристика ультразвуковых ориентационных сигналов подковоносовых летучих мышей (Rhinolophidae). Ж. эволюц. физиол. и биохим., 1969, 5, 1, 90–97.

9. *F. P. Möhres.* Über die Ultraschallorientierung der Hufeisennasen (Chiroptera - Rhinolophidae). *Z. vergl. Physiol.*, 1953, 34, 547—588.
10. *H. U. Schnitzler.* Die Ultraschall—Ortungslaute der Hufeisen—Fledermäuse (Chiroptera - Rhinolophidae) in verschiedenen Orientierungssituationen. *Z. vergl. Physiol.*, 1968, 57, 376—408.
11. *E. Zwicker, R. Feldtkeller.* Das Ohr als Nachrichtenempfänger. S. Hirzel verlag Stuttgart. M., «Связь», 1967.
12. *G. Schuller, G. Neuweiler, H. U. Schnitzler.* Collicular Responses to the Frequency Modulated Final Part of Echolocation Sounds in *Rhinolophus ferrum-equinum*. *Z. vergl. Physiol.*, 1971, 74, 153—155.
13. *Б. В. Соколов.* О взаимодействии слухового восприятия и эхолокации у летучих мышей семейства Rhinolophidae в процессе охоты за насекомыми. *Вестн. ЛГУ*, 1972, 1, 3, 96—104.
14. *B. Hickling.* Analysis of Echoes from a Solid Elastic Sphere in Water. *J. Akoust. Soc. America*, 1962, 34, 10, 1582—1591.
15. *А. К. Макаров.* Акустические методы и аппаратура для исследования ультразвуковой эхолокации у животных. Сб. Вопросы сравнительной физиологии анализаторов. Изд-во ЛГУ, 1973, вып. 3, 77—86.

Ленинградский государственный университет  
им. А. А. Жданова  
Биолого-почвенный факультет

Поступила  
30 марта 1973 г.