АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2004, том 50, № 3, с. 349–356

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 591.582.2

ОСОБЕННОСТИ ГЛАСНОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ БЕЛУХИ

© 2004 г. В. М. Белькович, С. А. Крейчи

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117851 Москва, Нахимовский проспект 36
E-mail: mmbbl@sio.rssi.ru

Поступила в редакцию 18.10.2003 г.

Акустический репертуар беломорских белух включает в себя около 70 типов сигналов, из которых было выделено 6 наиболее часто встречающихся и составляющих 75% общего числа. Судя по поведенческим реакциям, белухи отличают друг друга по акустической сигнализации, что характерно и для других видов животных, а также человека. Для исследования этого вопроса были выбраны сигналы, перцептивно воспринимаемые как гласноподобные звуки речи, включавшие и звуки, воспринимавшиеся как "блеянье". Исследовалась выборка из 480 сигналов, зарегистрированных в июне-июле 2000 г. в Белом море, в репродуктивном скоплении белух у о. Б. Соловецкий. Запись сигналов производилась на цифровой носитель (минидиск SONY) в диапазоне 0.06–20 кГц. Целью исследования было выявление перцептивных и акустических признаков, являющихся индивидуальными для отдельных особей. Использовались методы структурного анализа звучащей речи, применяемые в лингвокриминалистике для идентификации личности говорящего. Было показано, что использование этого метода позволяет группировать сигналы по совпадающим перцептивным и акустическим характеристикам с присвоением отдельным параметрам индивидуальных признаков. Это дало возможность, по совокупности совпадений, выделить условно порядка 40 отличающихся друг от друга источников акустических сигналов, что соответствовало числу белух, наблюдавшихся визуально. Таким образом, использование этого метода весьма перспективно для акустической идентификации белух и других морских млекопитающих, что имеет важное биологическое значение.

Учет диких животных в естественной среде обитания имеет множество прикладных аспектов. Это и "Красная Книга", и промысел, и изучение миграции отдельных видов, и многие другие приложения. При этом для наблюдения за животными используются самые разнообразные методы, начиная с опроса местных жителей и охотников, и кончая наблюдениями с кораблей, самолетов и спутников. В этих целях широко используются метки животных, как естественные особенности формы, окраса и пр., так и искусственные, в том числе и радиоприборы.

Нами ведутся систематические наблюдения белух на стационарной базе в прибрежной зоне Белого моря с применением синхронной аудио и видео регистрации [1, 2, 3, 5, 6]. Акустический тракт, состоящий из гидрофона, усилителя и цифрового регистратора (минидиск SONY), позволяет производить запись коммуникативных сигналов белух в диапазоне 0.06–20 кГц.

Особенностью места наблюдения является наличие локальной популяции с относительно стабильным составом поголовья. Это, в основном, взрослые самки с детенышами, которые постоянно демонстрируют игровое поведение. Наблюдательная вышка установлена на небольшой каменной отмели в 0.5 км от берега и не оказывает влияния на поведение животных.

Стабильность состава поголовья явилась фактором, обусловившим и стабильность репертуара наблюдаемых акустических сигналов, которые при систематических наблюдениях стали запоминаться и узнаваться на слух, подобно тому, как человек, оказавшись в новом месте, постепенно начинает узнавать голоса и речь людей, с которыми ежедневно встречается. Этот факт позволил предположить возможность использования коммуникативных сигналов белух в качестве природной акустической метки, несущей информацию об индивидуальных свойствах звукоизлучающей системы животного.

Коммуникативные сигналы белух представляет собой сложные звуковые комплексы (рис. 1а), состоящие из компонент разного характера, хорошо различающихся на слух и образующих хорошо запоминающиеся структуры. Благодаря устойчивому строению таких структур они могут перцептивно объединяться в классы и опознаваться в потоке излучаемых сигналов. При опознавании важную роль играют такие параметры отдельных элементов структуры, как их длительность, интенсивность, положение на оси частот и на оси времени, ширина частотной полосы, а также наличие или отсутствие повторений.

По своему строению коммуникативный сигнал белухи имеет сходство с речевым сигналом, также состоящим из устойчивых акустических

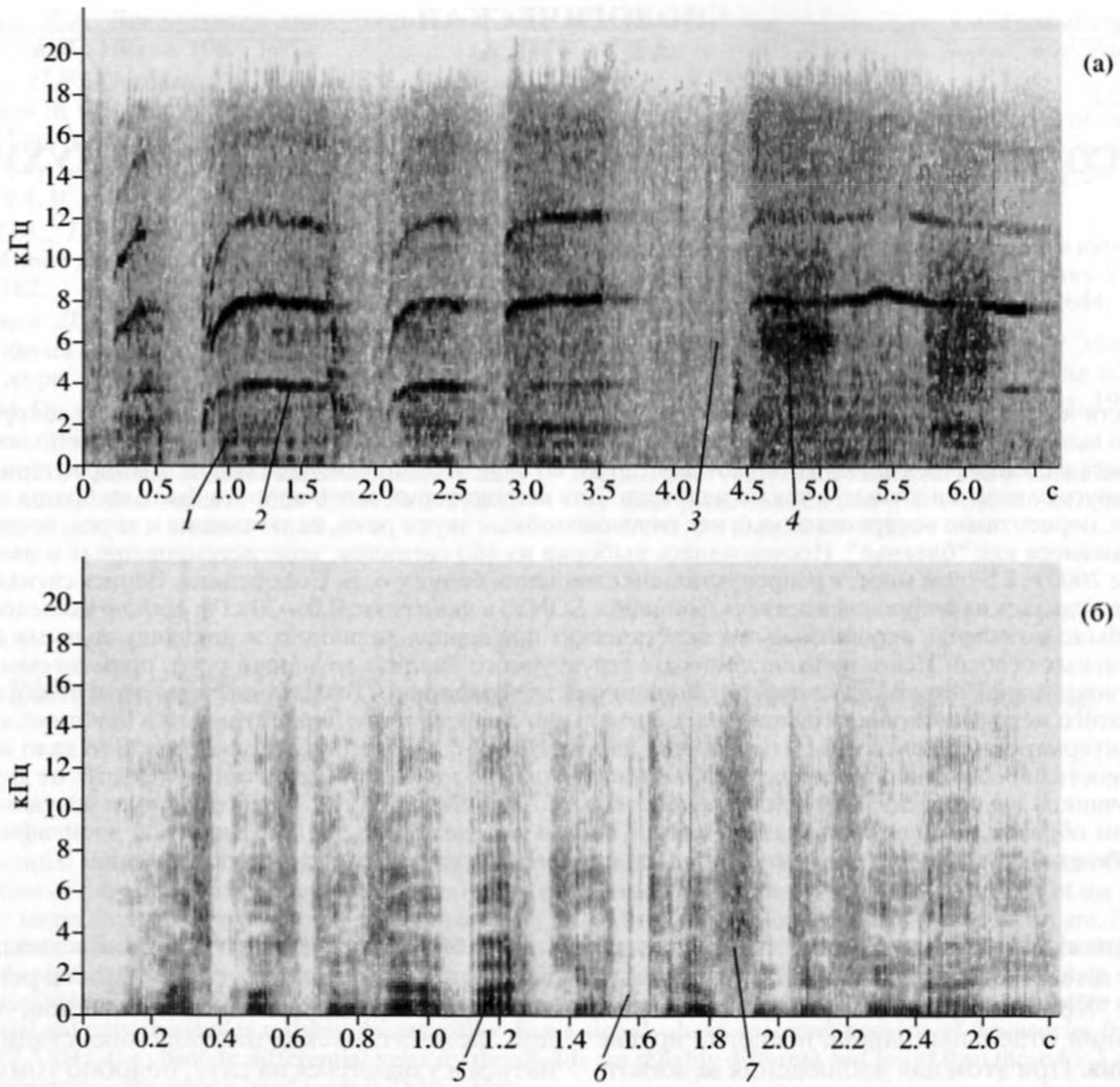

Рис. 1. а – спектрально-временна́я структура коммуникативного сигнала белухи, содержащего гласноподобные (*1*), свистовые (*2*), импульсные (*3*) и шумовые (*4*) компоненты. б – спектрально-временна́я структура речевого высказывания: "В Московском зоопарке открылся дельфинарий", содержащая гласные (*5*), импульсные (*6*) и шумовые (*7*) компоненты.

структур (рис. 1б), опознающихся и различающихся по тем же частотным, амплитудным и временны́м параметрам. Это дает возможность использовать структуру речевого сигнала в качестве модели для изучения коммуникативных сигналов белух и применять методы исследования, используемые, например, при идентификации личности говорящего по характеристикам голоса и речи. Для сравнения на рис. 1 приводится спектрально-временна́я структура речевого высказывания.

Элементами, образующими спектрально-временну́ю структуру коммуникативного сигнала белухи являются: вокалоподобные (гласноподобные), свистовые, шумовые и импульсные акустические компоненты, содержащие информацию об индивидуальных свойствах излучающей системы животного, о его эмоциональном состоянии, о поведенческой ситуации, в которой исследуемый сигнал был зарегистрирован. Как показано на рис. 1а, относительно простые структуры могут образовывать похожие по составу блоки, которые, повторяясь с некоторыми изменениями и дополнениями, образуют более сложные структуры, аналогично тому, как в человеческой речи отдельные слоги, состоящие, в свою очередь, из звукосочетаний, образуют более сложную структуру слова [7]. Информация, содержащаяся в элементах таких структур, а также устойчивое строение и повторяемость блоков, могут быть использованы, особенно при наличии параллельных визуальных наблюдений, для формирования индивидуальных и групповых различительных признаков, по которым можно судить, например, о

количестве голов в стаде, о регионе обитания, о типе группового поведения и т.п.

Исследование зарегистрированных в течение сезона наблюдений коммуникативных сигналов белух, включало перцептивный и инструментальный анализ. Вначале, путем прослушивания отдельных сигналов, выделенных в качестве целостных спектрально-временны́х структур, определялись перцептивные характеристики каждой составляющей. Так для "вокальной" составляющей определялся тембрально-высотный тип – чистый, зашумленный, высокий, низкий, средний; тип частотного контура – монотонный, восходящий, нисходящий, дугообразный (выпуклый, вогнутый); наличие или отсутствие модуляции.

Инструментальный акустический анализ проводился с помощью компьютерной программы Speech Analyzer, позволяющей получать амплитудно-временны́е, частотно-временны́е и спектрально-временны́е характеристики зарегистрированных сигналов. Данные инструментального анализа подтвердили большинство перцептивных наблюдений и позволили количественно оценить выделенные различительные признаки. Так, например, определились частотные границы при группировке по признаку звуковысотности "вокализации" на высокие, средние и низкие звуки.

Как уже отмечалось выше, при использовании человеческой речи и пения в качестве модели для исследования коммуникативных сигналов белух, нами применялась соответствующая терминология. При этом такие понятия как "вокализация", "гласноподобные звуки" и т.п., характеризуют только слышимый результат, а не механизм генерации звука.

Одной из характерных особенностей, отмеченных при прослушивании коммуникативных сигналов белухи, является повторяемость блоков звукового комплекса. Так, повторение 2 раза встретилось в 20% всех сигналов, 3 раза – в 5%, 4 раза – в 3%, 5 раз – в 1%. Характерной особенностью, при этом, является обратная зависимость длительности блока от числа повторений.

Типы форм частотного контура, определившиеся перцептивно как монотонный, нисходящий, восходящий и дугообразный, получили графическое подтверждение при инструментальном анализе (рис. 2).

Встречаемость выделенных форм частотных контуров гласноподобных составляющих распределилась следующим образом: монотонный контур – 40%, нисходящий – 50%, восходящий – 7% и дугообразный – 3%.

Перцептивно в коммуникативных сигналах белух были выделены два типа длительностей гласноподобных звуков – более короткие, воспринимаемые как гласные звуки человеческой речи, и более длительные, напоминающие гласные в пе-

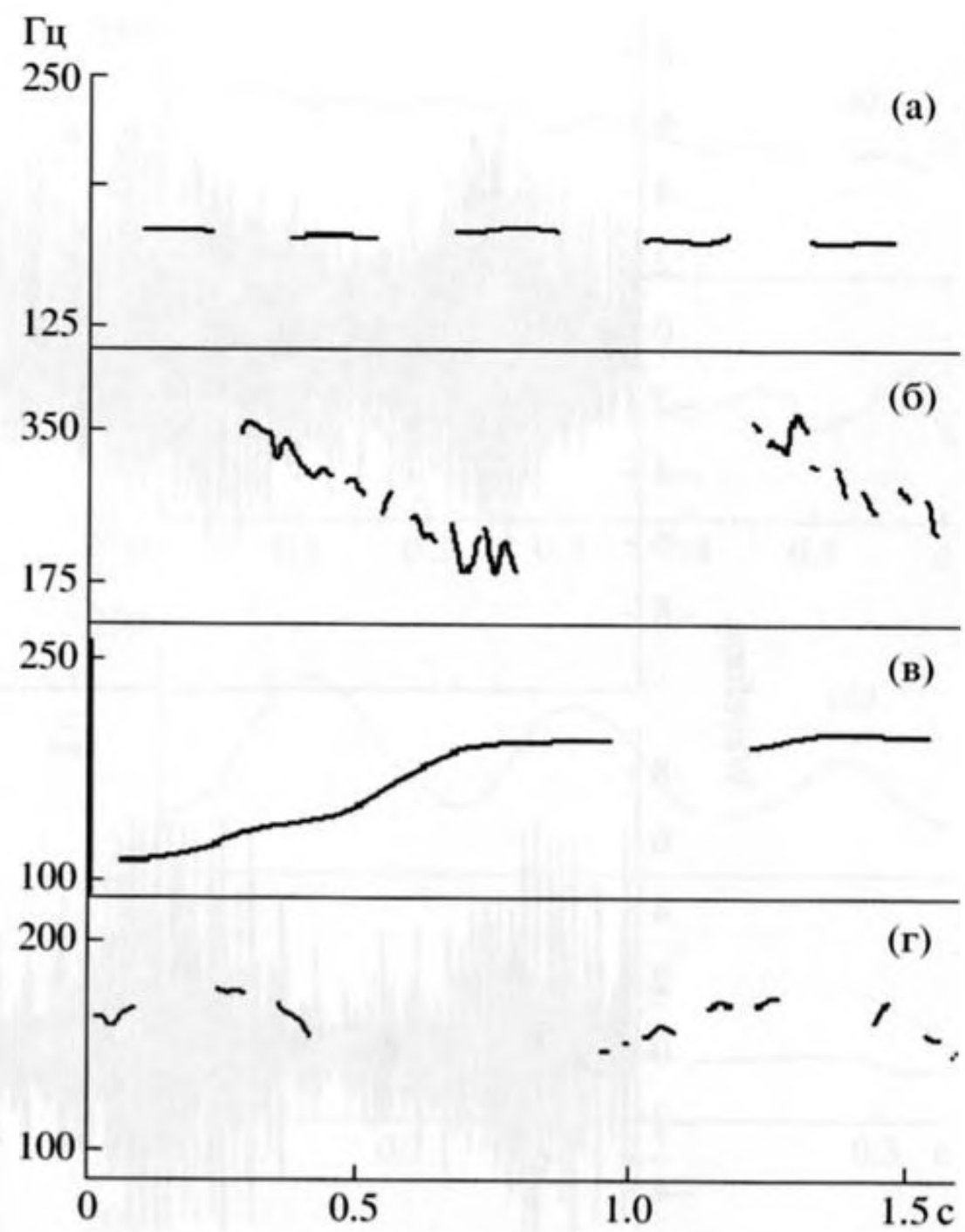

Рис. 2. Примеры форм частотных контуров гласноподобных сигналов белух: а – монотонный, б – нисходящий, в – восходящий, г – дугообразный.

нии. На рис. 3 представлены для сравнения осциллограммы пения гласного звука "а" и протяженного гласноподобного звука белухи с амплитудной модуляцией. Частота модуляции у белухи того же порядка, что и частота вибрации в пении, глубина же модуляции у белухи примерно в два раза больше, что на слух воспринимается как "блеянье". Соотношение между уровнем АМ и ЧМ можно также рассматривать в качестве индивидуальной характеристики особи.

Измерения периода модуляции показали, что он находится в пределах 80–120 мс, что соответствует частоте 12.5–8.3 Гц. При этом глубина модуляции для АМ составляет порядка 70%, а для ЧМ – порядка 40%. На рис. 4 представлены различные случаи сочетания АМ и ЧМ в гласноподобных звуках белух, воспринимаемых как "блеянье" (верхняя кривая – это огибающая частоты основного тона, а нижняя – огибающая интенсивности). По "высоте голоса" гласноподобные компоненты коммуникативных сигналов белухи находятся примерно в диапазоне человеческих голосов и хорошо дифференцируются на слух. Так, относительно высокие "голоса" составили 20%, средние – 50% и относительно низкие – 30% из всех зарегистрированных сигналов. Для сравнения приводят-

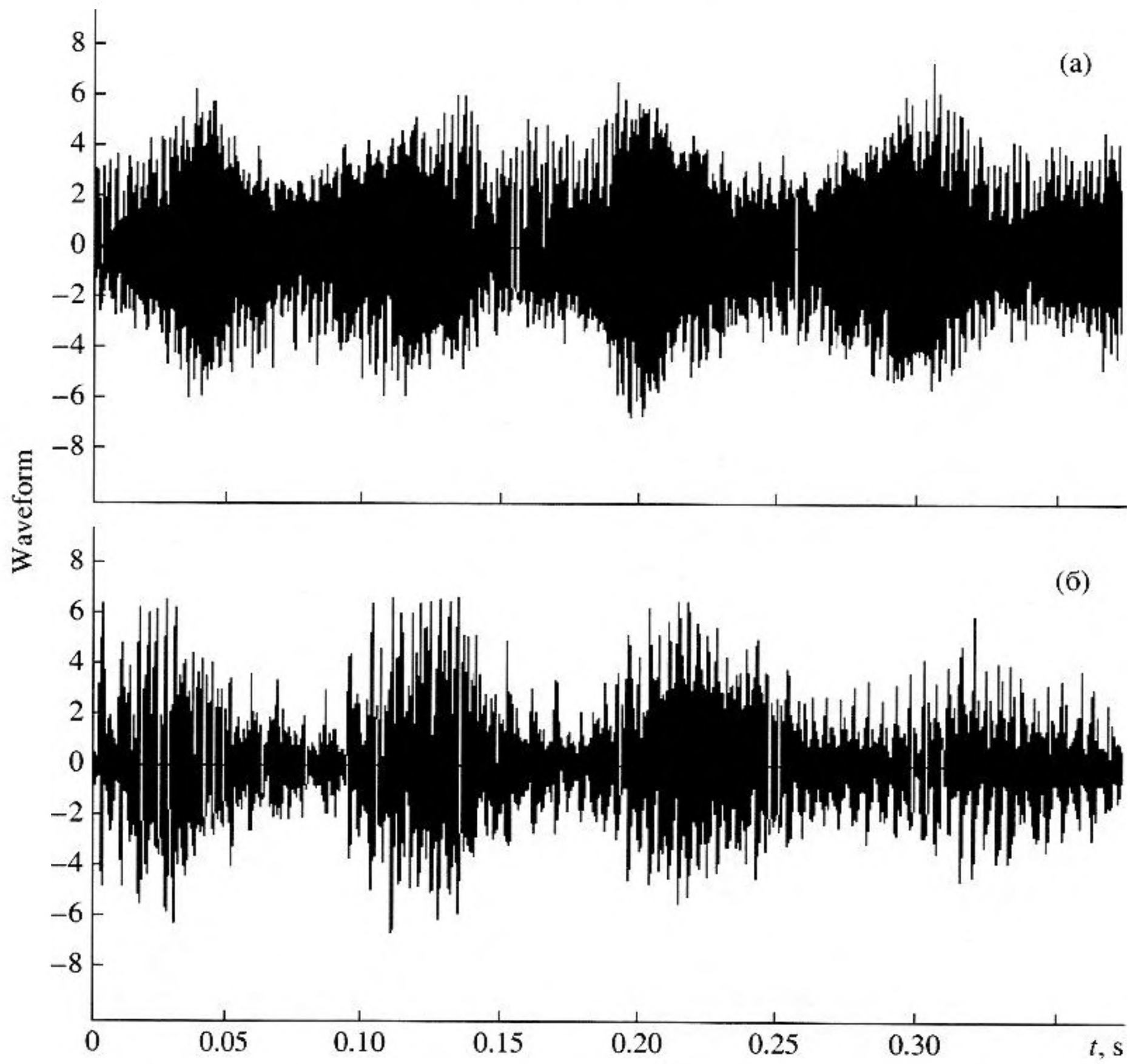

Рис. 3. Осциллограммы: а – пения гласного звука “а”; б – “блеянья” белухи.

ся данные (таблица 1) исследования встречаемости человеческих голосов различной высоты [8].

Измерения частотного диапазона “вокализации” показали, что весь массив исследованных сигналов находится в пределах 100–300 Гц, что подтверждает перцептивные наблюдения о нахождении этой компоненты в границах диапазона человеческих голосов (70–500 Гц – для речи и 60–1300 Гц для пения). При этом перцептивное деление на низкие, средние и высокие “голоса” белух, соответствовало группировке зарегистрированных сигналов в пределах участков: 100–200 Гц, 125–250 гц и 150–300 Гц. Для сравнения приводятся данные (таблица 2) измерений частотного диапазона стандартных тембрально-высотных типов человеческих голосов [8].

Как видно из приведенных данных, отдельные участки общего диапазона значительно перекрываются. Известно также, что в ситуациях, связанных с эмоциональным возбуждением, диапазон изменения частоты основного тона, как человеческой речи, так и компонент коммуникативных сигналов белух может значительно расширяться.

Таблица 1. Процентное распределение по классам тембров голосов

Мужские голоса	Высокий тенор	Тенор	Высокий баритон	Баритон	Высокий бас	Бас
% встреч.	5.9	22.3	26	30.8	9.5	5.5
Женские голоса	Высокое сопрано	Сопрано	Высокое меццо-сопрано	Меццо-сопрано	Высокое контральто	Контральто
% встреч.	8.3	23.7	31	20	13.7	3.3

Как уже отмечалось, в комплекс коммуникативного сигнала белухи, кроме "вокальных", входят еще и свистовые компоненты – 72%. Из них 35% составляют "чистые" по тембру звучания (рис. 1) и 37% – "зашумленные" (рис. 5а). Свистовые компоненты занимают диапазон 4–18 кГц.

"Чистый" свист имеет гармоническое строение и занимает широкую полосу. "Зашумленный" свист, наоборот, представляет собой полосовой шум в узком диапазоне частот. На рис. 5б представлен спектрально-временно́й блок, включающий в себя короткий свист, напоминающий перцептивно птичье "чириканье". Блоки такого строения, где гласноподобный звук как бы "взят в рамку", стабильно встречались в материалах наблюдений и, возможно, являются индивидуальным признаком особи.

Импульсные компоненты, которые видны на рис. 1 и 5, встретились в 52% проанализированных сигналов. По слуховому восприятию можно было условно разделить на четыре типа:

1) щелчок (сухой звук) – 14%;

2) звонкий удар (слышен высокий тон) – 6%;

3) глухой удар (низкий шум) – 4%;

4) звуки, воспринимавшиеся на слух как "ик", "ок", "чмок" и представлявшие собой сочетание коротких тональных и шумовых импульсов – 28%.

Характерной особенностью последних являлся тот факт, что таким звуком часто завершалось "блеянье" с зашумленным свистом и свист переходил в подобный звук.

Методы поиска индивидуальных различительных признаков коммуникативных сигналов белух были заимствованы нами из судебной фоноскопической экспертизы [9], где личность говорящего может быть идентифицирована по совокупности лингвистических и акустических характеристик его речи и голоса. Устное высказывание представляет собой спектрально-временну́ю структуру, состоящую из ряда компонент с определенными частотными и временными параметрами, характеризующими как речевой тракт говорящего, так и его индивидуальную манеру говорить. Это позволяет, при определенных условиях, сопоставить данное высказывание с аналогичными высказываниями других лиц или данного лица в другой речевой ситуации. Такими параметрами являются среднезвуковая длительность, средняя частота основного тона речи и диапазон его изменения, а также средние величины формантных частот ударных гласных звуков, интегрально характеризующие акустические свойства речевого тракта и акустические характеристики речи говорящего.

В этой связи интерес представляют гласноподобные составляющие коммуникативных сигналов белух, которые более тонко дифференцируются по высоте и тембру звучания, чем, например, свистовые составляющие, находящиеся в области частот, где тонкое слуховое различение по высоте и тембру затруднено. Поэтому использование гласноподобных звуков в качестве природной акустической метки белух представляется перспективным, так как эти звуки имеют формантную структуру, схожую с формантной структурой гласных звуков речи [10] и характеризующей индивидуальные свойства голосового тракта говорящего.

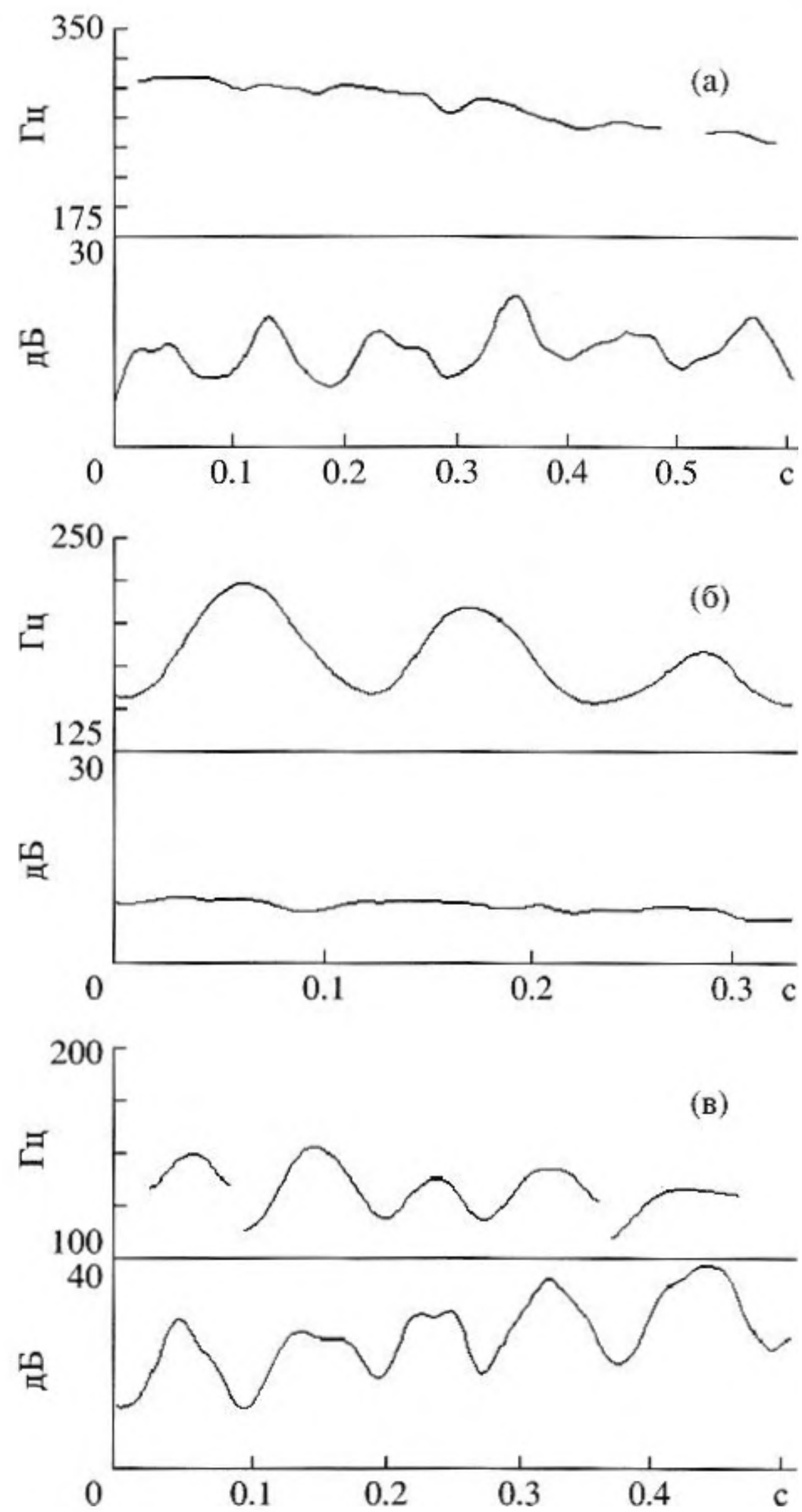

Рис. 4. Различные случаи АМ и ЧМ гласноподобных звуков белух. а – преобладание АМ; б – преобладание ЧМ; в – АМ и ЧМ в равных долях.

На рис. 6 представлены для сравнения сонограммы гласноподобного звука белухи и гласного

Таблица 2. Значения усредненных диапазонов частоты основного тона (ЧОТ) для выделенных тембральных групп

Мужские голоса	Высокий тенор	Тенор	Высокий баритон	Баритон	Высокий бас	Бас
ЧОТ, Гц	260–115	230–115	190–100	160–80	140–80	120–80
Женские голоса	Высокое сопрано	Сопрано	Высокое меццо-соп.	Меццо-сопрано	Высокое контральто	Контральто
ЧОТ, Гц	400–220	360–220	320–170	270–150	250–130	240–110

звука речи, на которых видны формантные области (F1, F2, F3, F4 – средние частоты формант).

Длительность гласноподобных звуков белух примерно в два-три раза больше гласных звуков человеческой речи и составляет 400–700 мс. К этому же классу звуков относятся и более длительные, порядка 1.5–2.0 с, гласноподобные звуки с глубокой частотной и амплитудной модуляцией частотой около 10 Гц, воспринимаемые на слух как "блеянье".

Таким образом, для использования коммуникативных сигналов белухи в качестве природной акустической метки нами учитывались длительность гласноподобного звука или "блеянья", диапазон и средняя величина частоты его основного тона, форма частотного контура, а также значения F1, F2, F3 и F4.

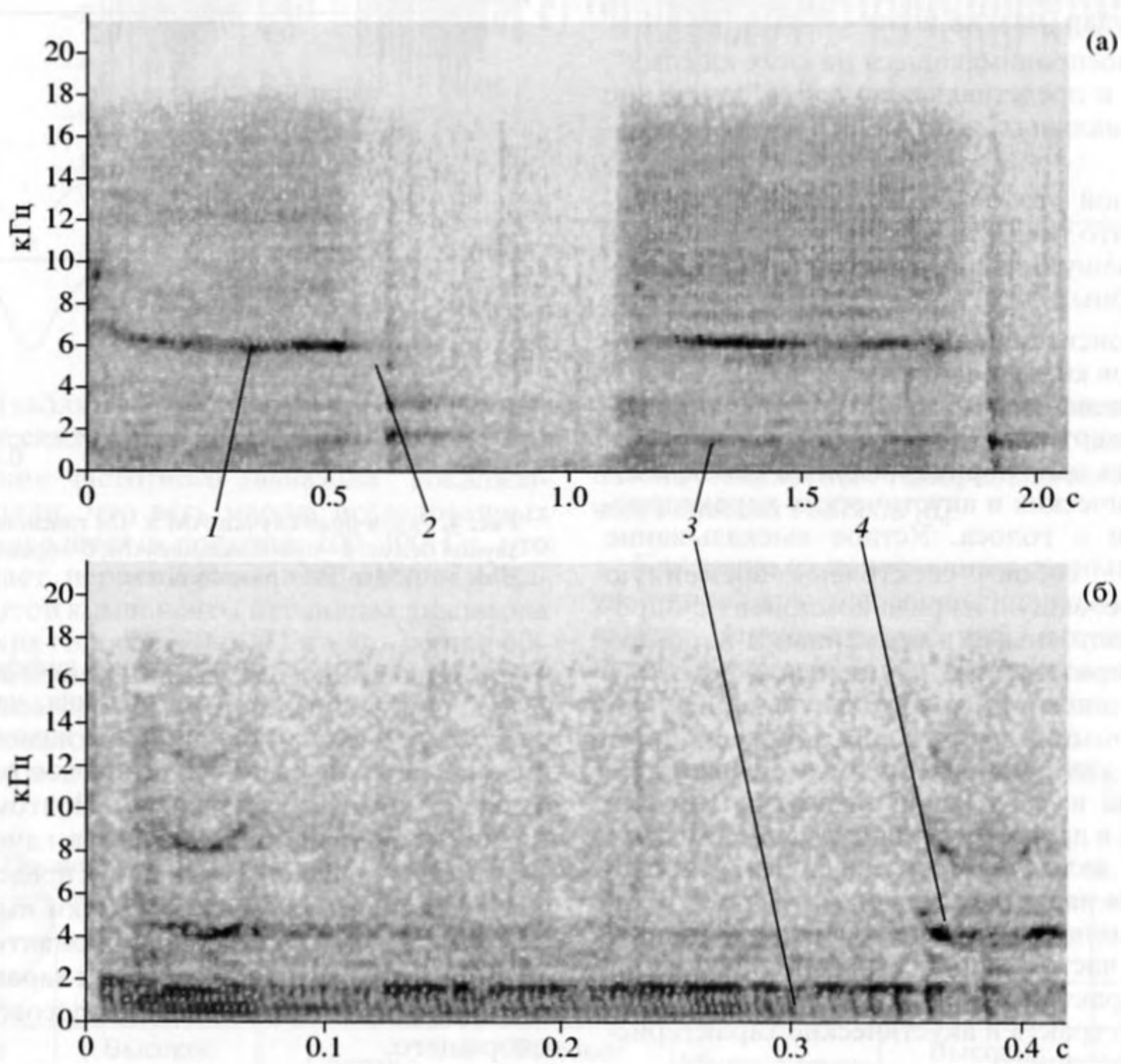

Рис. 5. Спектрально-временные блоки коммуникативных сигналов белухи, включающие в себя узкополосный "зашумленный" свист (1), "звонкий" удар (2), "блеянье" (3) и "чириканье" (4).

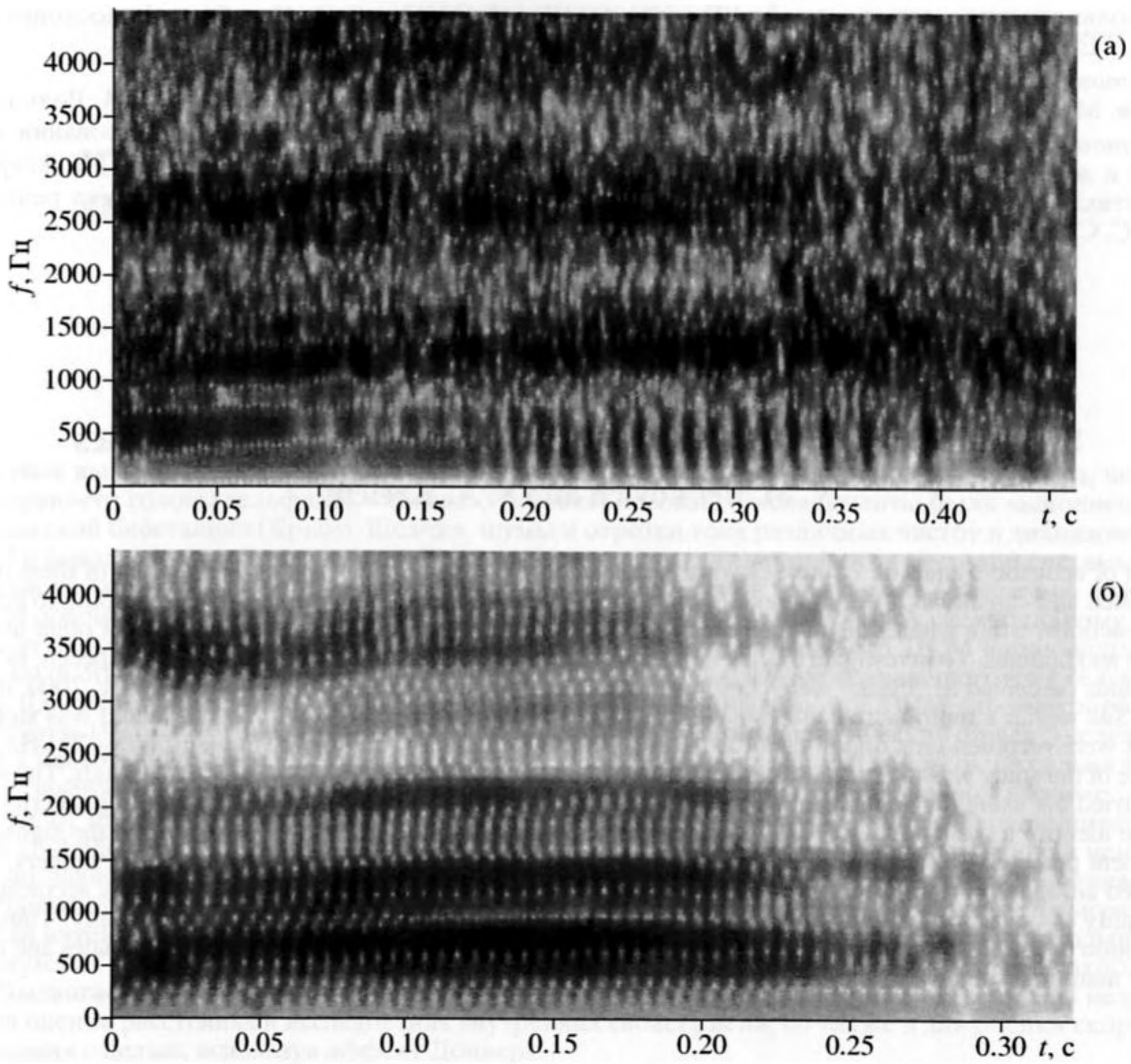

Рис. 6. а – сонограмма гласноподобного звука белухи F1 = 500 Гц, F2 = 1100 Гц, F3 = 2700 Гц, F4 = 4000Гц. б – сонограмма ударного гласного "á" русской речи в слове "врата́". F1 = 500 Гц, F2 = 1250 Гц, F3 = 2000 Гц, F4 = 3500 Гц.

Группировка зарегистрированных коммуникативных сигналов белух по совокупности перечисленных характеристик гласноподобных звуков позволила условно выделить порядка 40 особей, что примерно совпало с числом животных, зарегистрированных визуально за период наблюдений. Однако для получения полной картины, характеризующей особь по излучаемому коммуникативному сигналу, требуется, очевидно, учитывать и особенности других составляющих – свистовых и импульсных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белькович В.М., Изекеева Е.Н., Баранов В.С.* Некоторые особенности поведения белух в районе мыса Белуший / Сб. трудов X сессии РАО, 2000. С. 385–390.
2. *Белькович В.М., Беликов Р.А., Златоустова Л.В., Крейчи С.А.* Использование коммуникативных сигналов для идентификации особей белух / Сб. трудов XIII сессии РАО, 2003. С. 265–269.
3. *Крейчи С.А., Белькович В.М., Беликов Р.А.* Возможность идентификации особей белух по выявленным индивидуальным характеристикам акустических сигналов. Материалы международной конференции "Морские млекопитающие Голарктики". М.: 2002. С. 144–146.
4. *Белькович В.М., Кириллова О.И.* Исследование биологии беломорских белух (Delphiapterus leucas pall) в период репродуктивного скопления // Зоол. журн. 2002. Т. 79. № 1. С. 89–96.
5. *Беликов Р.А., Белькович В.М.* Характеристики свистовых сигналов беломорских белух (Delphiapterus leucas pall) / XI сессия РАО. М.: ГЕОС. 2001. С. 199–202.
6. *Беликов Р.А., Белькович В.М.* О проблемах классификации свистоподобных сигналов морских млекопитающих на примере беломорских белух (Delphiapterus leucas pall). Акустика океана. Докла-

ды IX школы-семинара, совмещенной с XII сессией РАО. М.: ГЕОС. 2002.

7. *Златоустова Л.В.* Фонетические единицы русской речи. М.: 1981.
8. *Златоустова Л.В., Крейчи С.А.* Классификация мужских и женских голосов по акустическим характеристикам. Сб. трудов XIII сессии РАО, 2003. М.: ГЕОС. С. 265–269.
9. *Галяшина Е.И.* Судебная фоноскопическая экспертиза. М. 2001.
10. *Златоустова Л.В., Крейчи С.А.* Роль параметров ЧОТ и F-структуры в формировании мужских и женских голосов. Сб. трудов III Всероссийской конференции "Теория и практика речевых исследований", М.: 2003. С. 69–76.

Specific Features of Vowel-Like Signals of White Whales

V. M. Bel'kovich and S. A. Kreichi

The set of acoustic signals of White-Sea white whales comprises about 70 types of signals. Six of them occur most often and constitute 75% of the total number of signals produced by these animals. According to behavioral reactions, white whales distinguish each other by acoustic signals, which is also typical of other animal species and humans. To investigate this phenomenon, signals perceived as vowel-like sounds of speech, including sounds perceived as "bleat," were chosen A sample of 480 signals recorded in June and July, 2000, in the White Sea within a reproductive assemblage of white whales near the Large Solovetskii Island was studied. Signals were recorded on a digital data carrier (a SONY minidisk) in a frequency range of 0.06–20 kHz. The purpose of the study was to reveal the perceptive and acoustic features specific to individual animals. The study was carried out using the methods of structural analysis of vocal speech that are employed in lingual criminalistics to identify a speaking person. It was demonstrated that this approach allows one to group the signals by coincident perceptive and acoustic parameters with assigning individual attributes to single parameters. This provided an opportunity to separate conditionally about 40 different sources of acoustic signals according to the totality of coincidences, which corresponded to the number of white whales observed visually. Thus, the application of this method proves to be very promising for the acoustic identification of white whales and other marine mammals, this possibility being very important for biology.