
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 621.391

© А. А. Гавришев, 2021

**К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ПИК-ФАКТОРА
БИОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ
В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

В данной статье проведена оценка пик-фактора биоподобных сигналов, используемых в гидроакустических системах связи, на примере исследования сигналов, основанных на имитации записей звуков различных видов китов. Проведенные расчеты и анализ литературы показывают, что приемлемым значением пик-фактора ($p \leq 4$) обладают записи звуков следующих видов китов: *Blue whale*, *Alaska humpback whale*, *Atlantic blue whale* и *Northeast Pacific blue whale*. Записи звуков указанных видов китов целесообразно использовать в соответствующих гидроакустических системах связи. Напротив, записи звуков таких видов китов, как *Atlantic finwhale*, *Atlantic minke whale*, *South Pacific blue whale* и *Western Pacific blue whale*, обладают повышенным значением пик-фактора ($p > 4$) и без адаптации их нецелесообразно использовать. Таким образом, установлено, что биоподобные сигналы, применяемые в гидроакустических системах связи, на примере исследования сигналов, основанных на использовании записей звуков различных видов китов, могут обладать как приемлемым значением пик-фактора, так и повышенным. На указанный вывод целесообразно обратить внимание разработчикам и производителям соответствующих гидроакустических систем связи при их проектировании, реализации и испытании.

Кл. сл.: пик-фактор, биоподобные сигналы, гидроакустические системы связи

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1–8], что для гидроакустических систем связи (ГАСС) одними из самых важных характеристик являются помехоустойчивость, скрытность, скорость передачи данных, энергопотребление, пик-фактор. Перечисленные показатели не в последнюю очередь зависят от типов сигналов, которые используются в той или иной ГАСС. Многие ГАСС, известные в настоящее время [2–8], построены на основе узкополосных сигналов

и широко распространенных шумоподобных сигналов. Вместе с тем в настоящее время активно стало развиваться направление применения в ГАСС сигналов, основанных на использовании записей звуков различных животных, обитающих в морских и пресных водах (биоподобные сигналы) [1, 9–17]. Стоит отметить, что ряд характеристик используемых в ГАСС биоподобных сигналов еще мало освещен в литературе и среди них стоит выделить значение пик-фактора биоподобных сигналов. Известно [2–4, 18–20], что увеличенное значение пик-фактора ограничивает реализуемые значения энергетической эффективности передающего устройства, снижает помехоустойчивость приема, усложняет и удорожает применяемую аппаратуру. Исходя из этого, исследование

вопросов, связанных с оценкой пик-фактора биоподобных сигналов ГАСС, является актуальным.

Целью данной статьи является оценка пик-фактора биоподобных сигналов, используемых в ГАСС, на примере исследования записей звуков различных видов китов.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

В качестве биоподобных сигналов взяты записи звуков различных видов китов, которые в настоящее время нашли широкое применение в соответствующих ГАСС [1, 10, 11, 15–17]. Исследуемые записи звуков китов расположены в базе, представленной в [21]. В Приложении на рис. 1–8 приведены примеры отрезков временных диаграмм сигналов для различных видов китов, "нарезанные" нами с помощью программы Fractan из записей базы.

Проведем с помощью системы математического моделирования и инженерных вычислений Scicos-Lab оценку значения пик-фактора сигналов, представленных в источнике [21].

Для исследований были отобраны примерно по 50 временных нарезок по 5000 точек из диаграмм звуков каждого вида китов.

Полученные значения пик-фактора исследуемых биологических сигналов

№ п/п	Название вида кита	Значение пик-фактора, p
1	<i>Blue whale</i>	[3÷3.6]
2	<i>Alaska humpback whale</i>	[2.8÷3.8]
3	<i>Atlantic blue whale</i>	[2.3÷4]
4	<i>Atlantic fin whale</i>	[3.3÷7.1]
5	<i>Atlantic minke whale</i>	[3÷5.3]
6	<i>South Pacific blue whale</i>	[3.3÷4.8]
7	<i>Northeast Pacific blue whale</i>	[2.2÷3.5]
8	<i>Western Pacific blue whale</i>	[2.5÷5.4]

Оценку значения пик-фактора сигналов осуществляли с помощью следующего выражения [18, 22–24]:

$$p = \frac{U_{\max}}{\sigma},$$

где $U_{\max}$ — максимальное значение сигнала, σ — среднеквадратичное значение сигнала.

Результаты расчетов приведены в таблице. Как видно, в целом для различных видов китов значение пик-фактора находится примерно в диапазоне $p \in [2.2 \div 7.1]$. Проведем интерпретацию полученных значений пик-фактора биологических сигналов. Известно [18, 19, 22], что для современных наземных систем связи значение пик-фактора передаваемых сигналов находится примерно в диапазоне $p \in [1 \div 4]$. Анализ работ [2–4, 23, 24] показывает, что ГАСС обладают схожими значениями пик-фактора передаваемых сигналов. Исходя из этого, возьмем указанные значения пик-фактора ($p \in [1 \div 4]$) в качестве граничных. Таким образом, если рассмотреть каждый из видов китов, представленных в таблице по отдельности, то приемлемым пик-фактором записи звуков ($p \in [1 \div 4]$) обладают следующие виды: *Blue whale*, *Alaska humpback whale*, *Atlantic blue whale* и *Northeast Pacific blue whale*. Записи звуков указанных видов китов целесообразно использовать в соответствующих ГАСС. Напротив, записи звуков таких видов китов, как *Atlantic fin whale*, *Atlantic minke whale*, *South Pacific blue whale* и *Western Pacific blue whale*, имеют пик-фактор $p > 4$, и без адаптации их нецелесообразно использовать в соответствующих ГАСС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье автором проведена оценка пик-фактора биоподобных сигналов, используемых в ГАСС, на примере исследования сигналов — записей звуков различных видов китов. Проведенные расчеты и анализ литературы [2–4, 18, 19, 22–24] показывают, что приемлемым пик-фактором ($p \in [1 \div 4]$) обладают записи звуков следующих видов китов, представленных в таблице: *Blue whale*, *Alaska humpback whale*, *Atlantic blue whale* и *Northeast Pacific blue whale*. Записи звуков указанных видов китов целесообразно использовать в соответствующих ГАСС. Напротив, записи звуков других видов китов из таблицы обладают повышенным значением пик-фактора ($p > 4$) и без адаптации их нецелесообразно использовать в соответствующих ГАСС.

Таким образом, возможно заключить, что биоподобные сигналы, используемые в ГАСС, на примере исследования сигналов, основанных на применении записей звуков различных видов китов, могут обладать как приемлемым значением пик-фактора, так и повышенным. На указанный вывод целесообразно обратить внимание разработчикам и производителям соответствующих ГАСС при их проектировании, реализации и испытании.

Дальнейшие исследования в данной области автор связывает с оценкой пик-фактора сигналов других видов животных, обитающих в морских и пресных водах, применяемых в соответствующих ГАСС.

ПРИЛОЖЕНИЕ

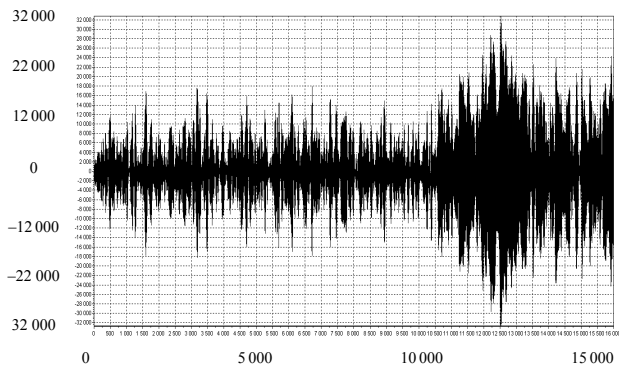


Рис. 1. Временная диаграмма записи звуков *Blue whale*

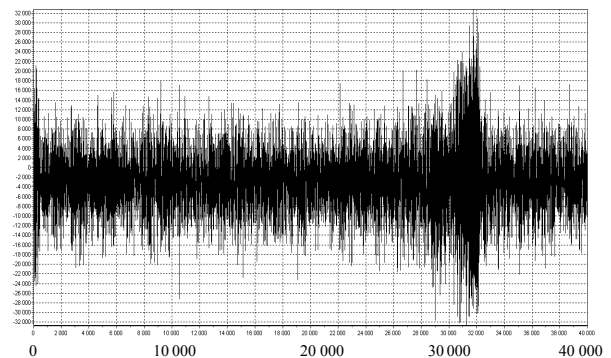


Рис. 2. Временная диаграмма записи звуков *Alaska humpback whale*

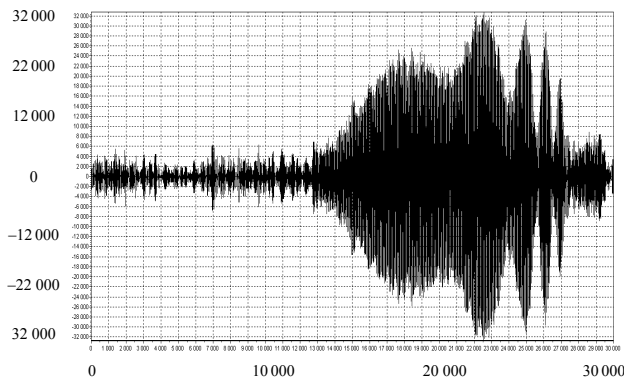


Рис. 3. Временная диаграмма записи звуков *Atlantic blue whale*

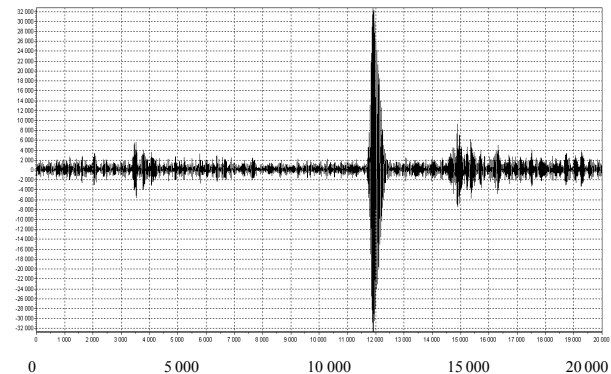


Рис. 4. Временная диаграмма записи звуков *Atlantic fin whale*

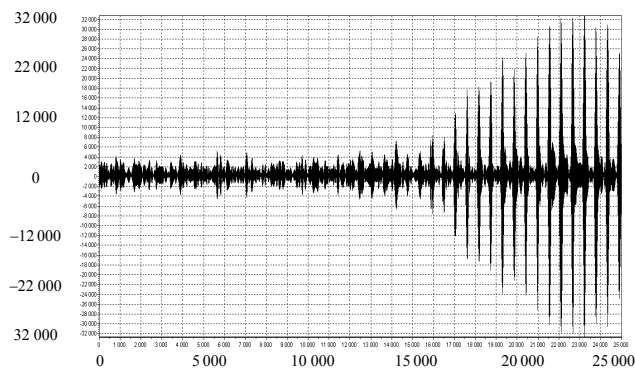


Рис. 5. Временная диаграмма записи звуков *Atlantic minke whale*

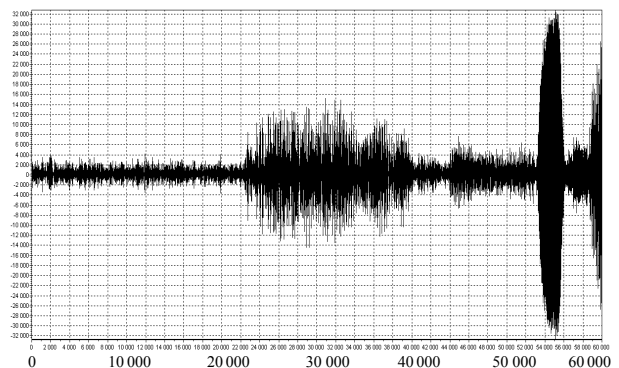


Рис. 6. Временная диаграмма записи звуков *South Pacific blue whale*

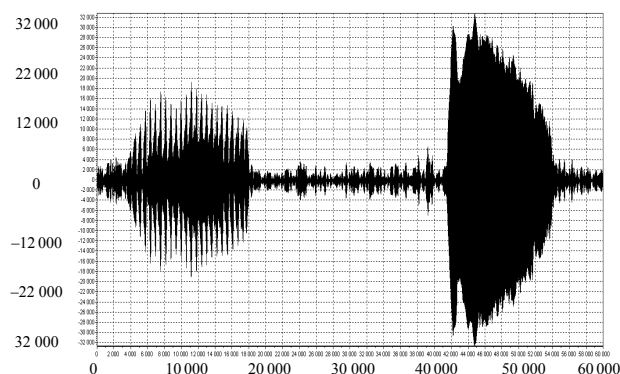


Рис. 7. Временная диаграмма записи звуков *Northeast Pacific blue whale*

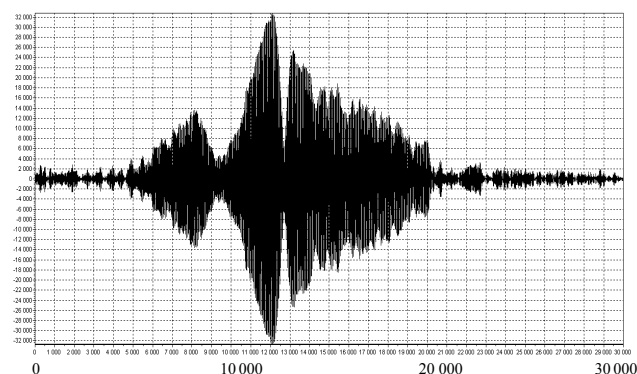


Рис. 8. Временная диаграмма записи звуков *Western Pacific blue whale*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсентьев В.Г., Криволапов Г.И. Гидроакустический поиск автономного необитаемого подводного объекта // Вестник СибГУТИ. 2020. № 3. С. 64–78.
2. Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А. Выбор сигналов для гидроакустических каналов связи // Вестник РГРТУ. 2017. № 59. С. 42–52. DOI: 10.21667/1995-4565-2017-59-1-42-52
3. Каменев С.И. Сигналы с улучшенными характеристиками на основе последовательностей Баркера для применения в акустических системах // Подводные исследования и робототехника. 2014. Т. 18, № 2. С. 63–68.
4. Бобровский И.В., Яготинцев В.П. Метод частотной автоподстройки в системах гидроакустической связи с шумоподобными сигналами // Гидроакустика. 2015. Т. 23, № 3. С. 52–63.
5. Кебкел К.Г. Численное моделирование скрывающих свойств гидроакустических сигналов связи с нелинейной разверткой несущей // Подводные исследования и робототехника. 2020. Т. 32, № 2. С. 4–12. DOI: 10.37102/24094609.2020.32.2.001
6. Falco A.I., Shushnov M.S. Noise immunity of reception of signals with code division in hydroacoustic channels // XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk. 2018. P. 165–168. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545509
7. Емельянов А.В., Симоненко И.В., Петров О.В. Особенности построения современных гидроакустических систем связи, управления и навигации // Вопросы оборонной техники. Серия 16: технические средства противодействия терроризму. 2018. № 5-6 (119-120). С. 39–46.
8. Родионов А.Ю., Унру П.П., Кулик С.Ю., Голов С.А. Оценки применения многочастотных сигналов с постоянной огибающей в гидроакустических системах связи // Подводные исследования и робототехника. 2019. Т. 29, № 3. С. 30–38. DOI: 10.25808/24094609.2019.29.3.004
9. Иванов М.П., Бибииков Н.Г., Данилов Н.А., Соколов П.А., Романов Б.В., Красницкий Б.Ю., Стефанов В.Е. Сравнительная оценка эхолокационных и коммуникационных сигналов дельфинов // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2020. № 1. Id. 2010903.
10. Степанов Б.Г. Бионические акустические системы и устройства // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. 2016. В. 2. С. 98–105.
11. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Исследования широкополосной гидроакустической системы, способной имитировать сигналы китообразных // Технические проблемы освоения мирового океана. 2017. Т. 7. С. 449–454.
12. Liu S., Qiao G., Yu Y., Zhang L., Chen T. Biologically inspired covert underwater acoustic communication using high frequency dolphin clicks // OCEANS. San Diego, 2013. P. 1–5. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6741138
13. Liu S., Wang M., Ma T., Qiao G., Bilal M. Covert underwater communication by camouflaging sea pilingsounds // Appl. Acoust. 2018. No. 142. P. 29–35. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.06.001
14. Jia Y., Liu G., Zhang L. Bionic camouflage underwater acoustic communication based on sea lion sounds // Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Changshu, 2015. P. 332–336. DOI: 10.1109/ICCAIS.2015.7338688
15. Bilal M., Liu S., Qiao G., Wan L., Tao Y. Bionic Morse coding mimicking humpback whale song for covert underwater communication // Appl. Sci. 2020. No. 10. P. 186. DOI: 10.3390/app10010186
16. Bilal M., Liu S., Qiao G., Raza W., Zuberi H.H. Novel concept of bionic Morse coding formimicry covert underwater communication // 17th International Bhurban

- Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). 2020. P. 601–605.
DOI: 10.1109/IBCAST47879.2020.9044564
17. *Гавришев А.А.* Расширение применимости бионической азбуки Морзе для скрытных гидроакустических систем связи // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. Т. 19, № 4. С. 51–57. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.93.28.008
 18. *Логонов С.С.* Цифровые радиоэлектронные устройства и системы с динамическим хаосом и вариацией шага временной сетки. Дис. ... д-ра техн. наук. Казань: Казанский техн. ун-т им. А.Н. Туполева, 2015. 228 с.
 19. *Козел В.М., Подворная Д.А., Ковалёв К.А.* Пик-фактор сигналов систем сухопутной подвижной службы 5G // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 6. С. 5–10. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-6-5-10
 20. *Малев А.С., Соловьев А.М., Шутов В.Д.* Подходы к оптимизации методов формирования сигналов с многопозиционной модуляцией по минимуму пик-фактора // Теория и техника радиосвязи. 2012. № 2. С. 50–56.
 21. PMEL. Acoustic program. URL: https://www.pmel.noaa.gov/acoustics/specs_whales.html (дата обращения: 15.06.2021).
 22. *Гавришев А.А., Гавришев А.Н.* К вопросу о расчете значений пик-фактора сигналов, генерируемых распространенными скрытными системами связи // Вестник НЦБЖД. 2020. Т. 45, № 3. С. 149–157.
 23. *Yuan Z., Li Z., Sui T., Li Y., Huang H.* A new companding method of the PAR reduction in underwater OFDM communication system // 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM). Chengdu, 2010. P. 1–4. DOI: 10.1109/WICOM.2010.5601206
 24. *Wu J., Qiao G., Qi X.* The research on improved companding transformation for reducing PAPR in underwater acoustic OFDM communication system // Discrete dynamics in nature and society. Vol. 2016. Id. 3167483. DOI: 10.1155/2016/3167483

**Северо-Кавказский федеральный университет,
Ставрополь**

Контакты: *Гавришев Алексей Андреевич*,
alexxx.2008@inbox.ru

Материал поступил в редакцию 07.06.2021

ON THE EVALUATION OF THE CREST FACTOR OF BIONIC SIGNALS USED IN HYDROACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEMS

A. A. Gavrishev

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

In this article, the authors evaluated the crest factor of bionic signals used in hydroacoustic communication systems, using the example of the study of signals based on the use of recordings of sounds of various whale species. The calculations and literature analysis show that the sound recordings of the following whale species have an acceptable crest factor value ($p \leq 4$): *Blue whale*, *Alaska humpback whale*, *Atlantic blue whale* and *Northeast Pacific blue whale*. Recordings of the sounds of these types of whales should be used in the appropriate hydroacoustic communication systems. In contrast, recordings of the sounds of such whale species as *Atlantic fin whale*, *Atlantic minke whale*, *South Pacific blue whale*, and *Western Pacific blue whale* have an increased crest factor value ($p > 4$) and without adaptation, it is impractical to use them in appropriate hydroacoustic communication systems. It is established that bionic signals used in hydroacoustic communication systems, based on the example of the study of signals based on the use of recordings of sounds of various species of whales, can have both an acceptable value of the crest factor or an increased one. It is advisable to pay attention of the developers and manufacturers of the corresponding hydroacoustic communication systems to this conclusion during designing, testing and implementation of such systems.

Keywords: crest factor, bionic signals, hydroacoustic communication systems

INTRODUCTION

It is known [1–8] that noise immunity, stealth, data transfer rate, power consumption, crest factor and some other indicators are characteristics of great importance for hydroacoustic communication systems (HCSs). The listed indicators not least depend on the types of signals, which are used in one or another HCS. Many HCS signals currently known [2–8] are based on narrow-band signals and widespread noise-like signals. At the same time, the direction of using HCS bionic signals based on the use of recordings of sounds of various animals living in sea and fresh waters has begun to develop. [1, 9–17]. It should be noted that a number of factors associated with the use of bionic signals in HCSs are still poorly covered in the literature, and among them it is worth highlighting the value of the peak factor of the used bionic signals. It is known [2–4, 18–20] that the exceeded value of the crest factor limits the energy efficiency of the transmitting device, reduces the noise immunity of reception, complicates and increases the cost of the equipment used. Based on this, the study of issues related to the assessment of the crest factor of bionic signals used in HCSs is relevant.

The purpose of this article is to assess the peak factor of bionic signals applied in HCSs, using the example of sound recordings of various species of whales.

RESEARCH PART

As bionic signals, we took the recordings of the sounds of various whale species, which have now found wide application in the HCSs [1, 10, 11, 15–17]. The investigated recordings of whale sounds are stored in the database specified in [21]. Fig. 1–8 (Appendix) show examples of time diagrams of the studied signals for various whale species obtained with the use of the Fractan software.

To estimate the peak factor of bionic signals presented in [21] the ScicosLab system of mathematical modeling and engineering calculations was used.

For the research, approximately 50 time intervals of 5000 points were selected from the sound diagrams of each whale species. The signal crest factor value can be estimated using the expression [18, 22–24]:

$$p = \frac{U_{\max}}{\sigma},$$

where $U_{\max}$ is the maximum signal value, σ is the rms signal value.

The calculation results are shown in table. As can be seen in table., in general, for various whale species, the peak factor value is approximately in the range $p \in [2.2 \div 7.1]$. Let us interpret the obtained peak factor values for bionic signals. It is known [18, 19, 22]

The obtained crest factor values of the studied bionic signals

№	Whale species name	Crest-factor value, p
1	<i>Blue whale</i>	$[3 \div 3.6]$
2	<i>Alaska humpback whale</i>	$[2.8 \div 3.8]$
3	<i>Atlantic blue whale</i>	$[2.3 \div 4]$
4	<i>Atlantic fin whale</i>	$[3.3 \div 7.1]$
5	<i>Atlantic minke whale</i>	$[3 \div 5.3]$
6	<i>South Pacific blue whale</i>	$[3.3 \div 4.8]$
7	<i>Northeast Pacific blue whale</i>	$[2.2 \div 3.5]$
8	<i>Western Pacific blue whale</i>	$[2.5 \div 5.4]$

that for modern terrestrial communication systems the value of the crest factor of the transmitted signals is approximately in the range $p \in [1 \div 4]$. Analysis of papers [2–4, 23, 24] shows that HCSs have similar values of the peak-factor of the transmitted signals. Based on this, we take the indicated values of the crest factor ($p \in [1 \div 4]$) as boundary values. Thus, if we consider each of the whale species shown in table separately, the following species have an acceptable peak-factor for sound recording ($p \in [1 \div 4]$): the *blue whale*, the *Alaska humpback whale*, the *Atlantic blue whale*, and the *Northeast Pacific blue whale*. Their sound recordings are to be applied in the corresponding HCSs. On the contrary, recordings of sounds of such species as the *Atlantic fin whale*, the *Atlantic minke whale*, the *South Pacific blue whale* and the *Western Pacific blue whale* have an exceeded value of the crest factor ($p > 4$) and without adaptation it is inappropriate to use them in the HCSs.

CONCLUSION

In this article, the author assessed the peak factor of bionic signals in the HCSs using the example

of recordings of sounds of various species of whales. Calculations and analysis of the scholarly sources [2–4, 18, 19, 22–24] reveal that the recordings of several whale species shown in table have an acceptable crest factor ($p \in [1 \div 4]$): the *blue whale*, the *Alaska humpback whale*, the *Atlantic blue whale* and the *Northeast Pacific blue whale*. It is advisable to use these sound samples of the indicated species in the HCSs. On the contrary, recordings of the sounds of such species of whales as the *Atlantic fin whale*, the *Atlantic minke whale*, the *South Pacific blue whale* and the *Western Pacific blue whale* have an exceeded value of the crest factor ($p > 4$) and without adaptation it is impractical to use them in the HCSs.

Thus, considering the example of signal studies based on the use of recordings of sounds of various whale species, it is possible to conclude that bionic signals used in HCSs, can have either an acceptable value of the crest factor and an increased one. The developers and manufacturers of the HCSs should draw attention to this conclusion in their design, testing and implementation work.

The authors associate further studies in this area with the assessment of the peak factor of signals from other species of animals living in sea and fresh waters, and used in the corresponding HCSs.

APPENDIX

Fig. 1. The *blue whale* sound recording time chart

Fig. 2. The *Alaska humpback whale* sound recording time chart

Fig. 3. The *Atlantic blue whale* sound recording time chart

Fig. 4. The *Atlantic fin whale* sound recording time chart

Fig. 5. The *Atlantic minke whale* sound recording time chart

Fig. 6. The *South Pacific blue whale* sound recording time chart

Fig. 7. The Northeast Pacific blue whale sound recording time chart

Fig. 8. The Western Pacific blue whale sound recording time chart

REFERENCES

1. Arsent'ev V.G., Krivolapov G.I. [Hydroacoustic search of autonomous uninhabited underwater object]. *Vestnik SiBGUTI* [SibGUTI Bulletin], 2020, no. 3, pp. 64–78. (In Russ.).
2. Filippov B.I., Chernetsky G.A. [Choice of signals for hydroacoustic communication channels]. *Vestnik RGRU* [Vestnik of Ryazan state radioengineering university], 2017, no. 59, pp. 42–52. DOI: 10.21667/1995-4565-2017-59-1-42-52 (In Russ.).
3. Kamenev S.I. [Signals with the improved characteristics on the basis of barker's sequences for the application in the acoustic systems]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2014, vol. 18, no. 2, pp. 63–68. (In Russ.).
4. Bobrovskiy I.V., Jagotinets V.P. [Method of frequency self-tuning tuning in systems of underwater communication with noise-like signals]. *Gidroakustika* [Hydroacoustics], 2015, vol. 23, no. 3, pp. 52–63. (In Russ.).
5. Kebkal K.G. [Numerical modeling of hiding properties of underwater acoustic communication signals with linear sweep of the carrier]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2020, vol. 32, no. 2, pp. 4–12. (In Russ.). DOI: 10.37102/24094609.2020.32.2.001
6. Falco A.I., Shushnov M.S. Noise immunity of reception of signals with code division in hydroacoustic channels. *XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, 2018. pp. 165–168. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545509
7. Emelyanov A.V., Simonenko I.V., Petrov O.V. [Creation features of modern hydrospeaker systems of communication, management and navigation]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu* [Military Engineering. Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices. Issue 16], 2018, no. 5-6 (119-120), pp. 39–46. (In Russ.).
8. Rodionov A.Yu., Unru P.P., Kulik S.Yu., Golov A.A. [Application of multi-frequency signals with constant envelope in underwater acoustic communication systems]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2019, vol. 29, no. 3, pp. 30–38. DOI: 10.25808/24094609.2019.29.3.004 (In Russ.).
9. Ivanov M.P., Bibikov N.G., Danilov N.A., Sokolov P.A., Romanov B.V., Krasnickij B.J., Stefanov V.E. [Comparative evaluation of echolocation and communication signals of dolphins]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Fizika* [Moscow University Physics Bulletin], 2020, no. 1, Id. 2010903. (In Russ.).
10. Stepanov B.G. [Bionic acoustic systems and devices]. *Izvestiya VUZov Rossii. Radioelektronika* [Radioelectronics and Communications Systems], 2016, vol. 2, pp. 98–105. (In Russ.).
11. Pesterev I.S., Stepanov B.G. [Studies of a broadband hydroacoustic system capable of simulating cetacean signals]. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana* [Technological challenges in the development of the oceans], 2017, vol. 7, pp. 449–454. (In Russ.).
12. Liu S., Qiao G., Yu Y., Zhang L., Chen T. Biologically inspired covert underwater acoustic communication using high frequency dolphin clicks. *OCEANS*. San Diego, 2013, pp. 1–5. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6741138
13. Liu S., Wang M., Ma T., Qiao G., Bilal M. Covert underwater communication by camouflaging sea piling sounds. *Appl. Acoust.* 2018, no. 142, pp. 29–35. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.06.001
14. Jia Y., Liu G., Zhang L. Bionic camouflage underwater acoustic communication based on sea lion sounds. *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*. Changshu, 2015, pp. 332–336. DOI: 10.1109/ICCAIS.2015.7338688
15. Bilal M., Liu S., Qiao G., Wan L., Tao Y. Bionic Morse coding mimicking humpback whale song for covert underwater communication. *Appl. Sci.* 2020, no. 10, pp. 186. DOI: 10.3390/app10010186
16. Bilal M., Liu S., Qiao G., Raza W., Zuberi H.H. Novel concept of bionic Morse coding formimicry covert underwater communication. *17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, 2020, pp. 601–605. DOI: 10.1109/IBCAST47879.2020.9044564
17. Gavrishchev A.A. [Expanding the application of bionic Morse code for covert hydroacoustic communication systems]. *Sibirskii pozharo-spasatel'nyi vestnik* [Siberian fire and rescue bulletin], 2020, vol. 19, no. 4, pp. 51–57. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.93.28.008 (In Russ.).
18. Loginov S.S. *Tsifrovye radioelektronnye ustroystva i sistemy s dinamicheskim kaosom i variatsiei shaga vremennoi setki*. Diss. doc. techn. nauk [Digital avionics and systems with dynamic chaos and time grid pitch variation. Doc. techn. sci. diss.]. Kazan: Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, 2015. 228 p. (In Russ.).
19. Kozel V.M., Podvornaya D.A., Kovalev K.A. [Peal factor of signals of 5G mobile service systems]. *Doklady BGUIR*. [OGUIR reports], 2020, vol. 18, no. 6, pp. 5–10. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-6-5-10 (In Russ.).
20. Malev A.S., Solovyev A.M., Shutov V.D. [Optimization of signal's parameters with multiway modulation for the

- purpose of crest factor minimization]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* [Radio communication theory and technology], 2012, no. 2, pp. 50–56. (In Russ.).
21. PMEL. Acoustic program. URL: https://www.pmel.noaa.gov/acoustics/specs_whales.html (accessed: 15.06.2021).
22. Gavrishev A.A., Gavrishev A.N. [To the question of calculating the crest factor values of signals generated by common hidden communication systems]. *Vestnik NTSBZHD* [Bulletin of NCBJD], 2020, vol. 45, no. 3, pp. 149–157. (In Russ.).
23. Yuan Z., Li Z., Sui T., Li Y., Huang H. A new companding method of the PAR reduction in underwater OFDM communication system. *6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*. Chengdu, 2010. pp. 1–4. DOI: 10.1109/WICOM.2010.5601206
24. Wu J., Qiao G., Qi X. The research on improved companding transformation for reducing PAPR in underwater acoustic OFDM communication system. *Discrete dynamics in nature and society*, vol. 2016, Id. 3167483. DOI: 10.1155/2016/3167483

Contacts: *Gavrishev Aleksey Andreevich*,
alexxx.2008@inbox.ru

Article received by the editorial office on 07.06.2021