

7. *Slasten M.I.* Izmerenie gradienta skorosti ul'trazvuka v monokristallakh s garmoni-cheski izmenyayushchimisya ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami [Measurement of the gradient of the speed of ultrasound in single crystals with harmonically varying residual mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 36-43.
8. *Timoshenko S.P., Gud'er Dzh.* Teoriya uprugosti [Elasticity Theory]: Per. s angl. M.I. Reytmana, Pod red. G.S. Shapiro. 2nd ed. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979, 560 p.
9. *Slasten M.I., Timoshenko V.I.* O serii mnogokratnykh otrazheniy ul'trazvukovogo impul'sa v ploskoparallel'nykh obraztsakh s garmonicheski izmenyayushchimisya mekhanicheskimi napryazheniyami [About a series of multiple reflections of the ultrasonic pulse in the plane-parallel samples with harmonically varying mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 9 (122), pp. 225-230.
10. *Slasten M.I.* O seriyakh mnogokratnykh otrazheniy ul'trazvukovykh impul'sov v plosko-tsilindricheskikh obraztsakh s mekhanicheskimi napryazheniyami [About the series of multiple reflections of the ultrasonic pulses in the face samples with mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 9 (134), pp. 223-228.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Воронин.

Сластен Михаил Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: lina@mvs.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, ГСП-17а, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371663; кафедра физики; к.т.н.; доцент.

Тимошенко Владимир Иванович – e-mail: ega@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Slasten Michail Ivanovitch – Southern Federal University; e-mail: lina@mvs.tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Timoshenko Vladimir Ivanovitch – e-mail: ega@tti.sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of electrohydroacoustics and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 612.16+534.87

С.В. Горовой

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСОВЫХ ВОЛН ТЕЛОМ ЧЕЛОВЕКА

Работа посвящена исследованию возможности дистанционного определения частоты сердечных сокращений с целью обнаружения присутствия человека в воде вблизи места установки звукоприемной аппаратуры и оценки его состояния по результатам анализа variability сердечного ритма. Приведены результаты экспериментального исследования излучения телом находящегося в воде человека акустических волн, вызванных пульсовыми волнами, т.е. распространяющимися по аорте и артериям волнами повышенного давления, вызванными выбросом крови из левого желудочка в период систолы. Описаны результаты лабораторного эксперимента, в ходе которого в емкости с водой были зарегистрированы акустические сигналы, вызванные пульсовыми волнами в конечностях человека на расстоянии 0,5 м. С помощью ненаправленного низкочастотного гидрофона, предусилителя заряда с полосой пропускания 0,2–100 Гц и программно реализованного энергетиче-

ского приемника, включающего полосовой фильтр 10–20 Гц, квадратичный детектор и интегратор с временем интегрирования 0,3 с выделены сигналы, частота которых совпадает с частотой сердечных сокращений. Полученные сигналы пригодны для оценки variability сердечного ритма. Это может быть использовано для бесконтактного контроля состояния сердечно-сосудистой системы людей, принимающих контрастные ванны или обнаружения людей в воде вблизи охраняемых объектов. Рассмотрены требования к полосе пропускания фильтра и времени интегрирования. Указано, что использованный подход не дал положительных результатов для некоторых из обследованных лиц.

Пульсовая волна; частота сердечных сокращений; низкочастотный гидрофон; энергетический приемник.

S.V. Gorovoy

SOME RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH PULSE WAVE RADIATION BY THE HUMAN BODY

Work is devoted to research of a possibility remote detection of human heart rate in order to detection the presence of a person into the water near the mounting location of sound recording equipment and estimation his condition by means of heart rate variability analysis. The results of experimental research the human body acoustic waves radiation into the water which are caused by acoustic emission of pulse waves, i.e. propagating through aorta and arteries by waves of the pressure pulsations exerting by ejection of blood from the left ventricle during systole are described. The results of laboratory experiment during which the acoustic signals are registered in a water container originated from human limbs at a distance of 0.5 m by pulse waves are presented. The signals are selected with the help of a low-frequency hydrophone, energy detector with the band-pass range 0,2–100 Hz and software-based energy receiver, including a band-pass filter 10–20 Hz, quadratic detector and integrator with the 0,3 s integration time, which frequency coincides with the heart rate frequency. The received signals are suitable for estimation of heart rate variability. It can be used for noncontact sensing a condition of people's cardiovascular system who take contrast baths or detection of people in water near the protected objects. The demands to a pass-band filter and integration time are considered. It is specified that the used approach did not yield positive results for some of the examined persons.

Pulse wave; pulse rate; low-frequency hydrophone; energy detection.

В настоящее время большое внимание уделяется дистанционному контролю состояния здоровья людей. В ряде случаев, например в спортивной медицине, представляет интерес дистанционное измерение частоты пульса и параметров дыхания. Функционирование дыхательной и сердечно-сосудистой систем человека и протекающие при этом физиологические процессы обуславливают в том числе принципиально неустранимые неконтролируемые механические перемещения и движения колебательного характера частей тела, органов и заполняющих их сред (сердца, легких, воздуха в легких, сосудов, грудной клетки и т.д.), которые могут быть измерены или оценены и зарегистрированы современными приборами. Характер этих движений в норме и патологии может быть различным. Могут наблюдаться индивидуальные особенности, обусловленные возрастом, комплекцией и т.д. Это повсеместно используется в медицинской диагностике для исследования функций внешнего дыхания, а также оценки состояния сердечно-сосудистой системы методами фонокардиографии, сфигмографии, кинетокардиографии, динамокардиографии, баллистокардиографии и т.д. [1]. Физиологические процессы и колебательные движения частей тела человека порождают излучение в окружающую среду упругих волн, которые могут быть зарегистрированы и использованы для дистанционного контроля некоторых показателей состояния здоровья, а также обнаружения присутствия человека, например легководолаза на контролируемой акватории. Индивидуальные особенности излучаемых человеком упругих волн могут быть использованы в целях идентификации отдельных людей и характера их деятельности.

В [2] приведены результаты обнаружения легководолаза в снаряжении замкнутого цикла (без выпуска выдыхаемого воздуха в воду) пассивной акустической приемной системой по шумам дыхания на дистанциях до 120 м. В случае задержки легководолазом дыхания, его обнаружение по шумам дыхания становится проблематичным. Поэтому для дистанционного обнаружения легководолазов и оценки их состояния здоровья может представлять интерес использование акустических полей, возникающих в результате неконтролируемых колебательных движений органов и конечностей живого человека, не связанных с процессом дыхания, например акустического поля, создаваемого пульсовыми волнами. В медицинской литературе пульсовой волной называют распространяющуюся по аорте и артериям волну повышенного давления, вызванную выбросом крови из левого желудочка в период систолы. Данная «волна повышенного давления» наблюдается независимо от дыхания, в том числе (в несколько измененном виде) и при его задержке. Записи колебаний стенок сонной и периферических артерий, вызванных прохождением пульсовой волны (т.н. сфигмограммы) используются для исследования характеристик гемодинамики и уточнения диагноза ряда заболеваний сердечно-сосудистой системы [3–5].

Приведены результаты экспериментального исследования излучения частями тела находящегося в воде человека акустических волн, вызванных пульсовыми волнами с целью изучения возможностей обнаружения присутствия человека в воде (в том числе в случае задержки им дыхания) и оценки его состояния по частотным составляющим, соответствующим частоте пульса, которая обычно равна частоте сердечных сокращений (ЧСС).

Для исследований использовался металлический цилиндрический резервуар $\varnothing 400 \text{ мм} * 1000 \text{ мм}$ с водой, установленный на виброизолированном основании (имитация ванны для водных процедур). Уровень воды составлял 800 мм, температура воды была $22 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве приемника использовался низкочастотный ненаправленный гидрофон с чувствительностью 2 мВ/Па, расположенный на дне резервуара, в качестве предварительного усилителя использовался усилитель заряда 2635 фирмы Брюль и Кьер. Собственные шумы предварительного усилителя были на 20 дБ ниже уровня воспринимаемого гидрофоном в резервуаре окружающего шума, полоса частот усилителя составляла 0,2–100 Гц. Испытуемый помещал в резервуар оголенные конечности: руку (до локтя, пальцы полусогнуты) или ногу (до колена) и по возможности расслаблялся, стараясь не совершать движений опущенной в воду конечностью. Воспринимаемые гидрофоном сигналы оцифровывались с помощью 24-разрядного АЦП и записывались в память компьютера, а затем анализировались с помощью специально разработанных программных средств. Частота квантования f_s составляла 800 Гц. Непосредственное исследование акустического излучения, вызванного прохождением пульсовых волн на частотах, близких к ЧСС (0,5–3,5 Гц) связано с значительными трудностями. Реально наблюдаемые при сфигмографических и фонографических исследованиях сигналы имеют сложную форму и спектр и их нельзя считать детерминированными. Поэтому для определения ЧСС по сфигмограммам используют специализированные алгоритмы [4]. В данной работе для выделения соответствующих ЧСС составляющих использовался реализованный программно энергетический приемник, включающего полосовой КИХ фильтр 512 порядка с плоской АЧХ и регулируемой полосой пропускания, квадратичный детектор и интегратор с временем интегрирования 0,1–3 с. Схема энергетического приемника показана на рис. 1. Интегрирование производилось методом прямоугольников в пределах «прямоугольного скользящего окна» длительностью T . По результатам обработки полученных данных в качестве наиболее приемлемых для выделения ЧСС были выбраны следующие параметры: полоса пропускания фильтра $\Delta f = 10\text{--}20 \text{ Гц}$, время интегрирования $T = 0,3 \text{ с}$. Таким образом, в данных экспериментах фактически регистрировалась величина, пропорциональная усредненной за время T мощности звукового поля,

обусловленного пульсовыми волнами. При расширении полосы пропускания в область частот ниже 10 Гц в ряде случаев наблюдалось увеличение помех из-за естественного дрожания конечностей (тремора покоя). Расширение полосы пропускания в область частот выше 20 Гц не приводило к существенным улучшениям.

Исследования проводились на добровольцах мужского и женского пола. Различия в индивидуальных особенностях обследованных лиц проявлялись весьма заметно. Для некоторых обследованных лиц частотные составляющие, соответствующие ЧСС выделить с помощью использованного в работе подхода из принятого гидрофоном сигнала на фоне окружающего шума и шума предусилителя не удалось. При продолжительном нахождении в воде в ряде случаев наблюдался заметный тремор с частотой до 10 Гц, хорошо заметный на воспринимаемых гидрофоном сигналах.

Далее приведены результаты, полученные для некурящего мужчины 50 лет с хорошей физической подготовкой, среднего телосложения без признаков заметного тремора рук (в том числе в воде), хронических заболеваний и избыточного веса, у которого в состоянии покоя частота пульса составляла 60–65 ударов в минуту. Эти результаты можно отнести к «наилучшим» для обследованной группы лиц.

На рис. 2, 3 показаны осциллограмма и спектрограмма сигнала на выходе гидрофона. На рис. 4, 5 показаны осциллограммы этого же сигнала на выходе полосового фильтра и на выходе интегратора энергетического приемника.

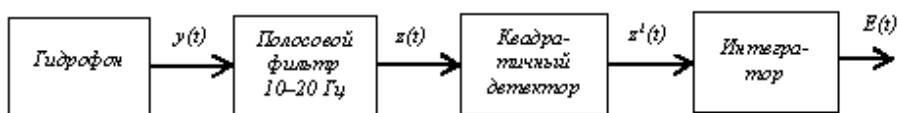


Рис. 1. Структурная схема энергетического приемника

На рис. 2–5 интервал времени от 0 с до 60 с соответствует собственным шумам, наблюдаемым в резервуара с водой, в котором производились исследования и шумам использованной аппаратуры. Участок от 60 с до 150 с соответствует погружению руки испытуемого в воду и затуханию вызванного этим движением воды в резервуаре. На участке 60–120 с наблюдалась перегрузка усилителя. Участок от 150 с до 200 с соответствует нахождению руки испытуемого в воде, когда он дышит в обычном темпе. Участок от 200 с до 250 с соответствует глубокому вдоху, сопутствующему ему непроизвольному движению и далее задержке испытуемым дыхания. Участок от 250 с до 270 с соответствует восстановлению дыхания после задержки и сопутствующему первому вдоху непроизвольному движению. Участок от 270 с до 370 с соответствует выниманию испытуемым руки из воды и затуханию возникшего в связи с этим движения воды в резервуаре. Всплеск сигнала вблизи 345 с (рис. 2) и заметные на рис. 3 и 5 подъемы спектра в область 300–320 с и 330–350 с обусловлены причинами техногенного происхождения.

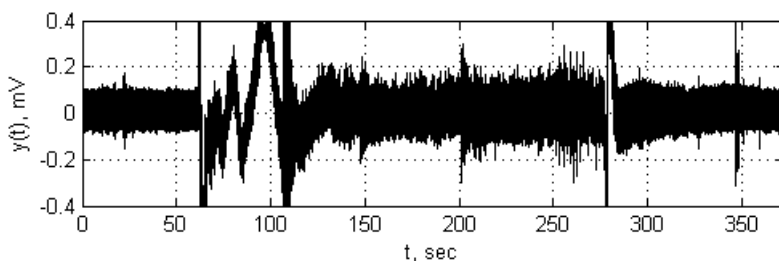


Рис. 2. Осциллограмма сигнала на выходе гидрофона

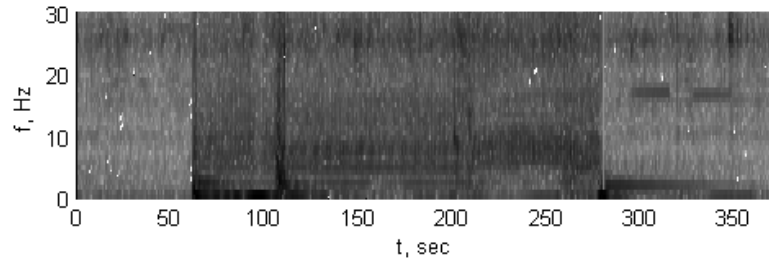


Рис. 3. Спектрограмма сигнала на выходе гидрофона

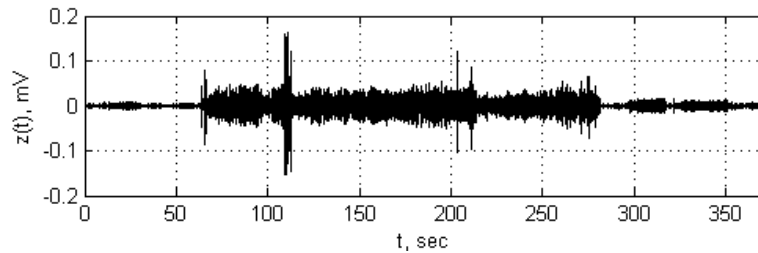


Рис. 4. Осциллограмма сигнала на выходе полосового фильтра

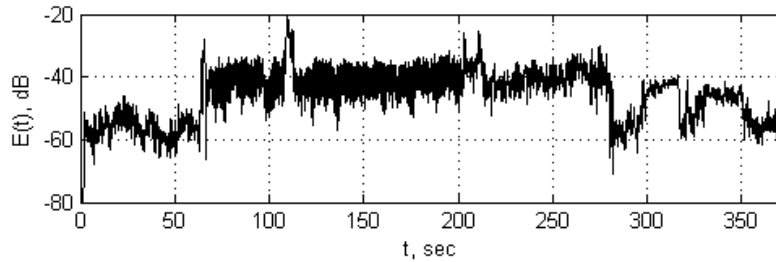


Рис. 5. Осциллограмма сигнала на выходе интегратора

На осциллограмме, показанной на рис. 2, на участке от 120 до 270 с хорошо заметны регулярные выбросы длительностью 0,05–0,1 с, соответствующие ЧСС, в то время как на спектрограмме, рис. 3, соответствующие или близкие к ЧСС составляющие непосредственно не наблюдаются. Наличие и характер данных выбросов оправдывает использование для их выделения энергетического приемника с вышеуказанными значениями полосы пропускания и времени интегрирования.

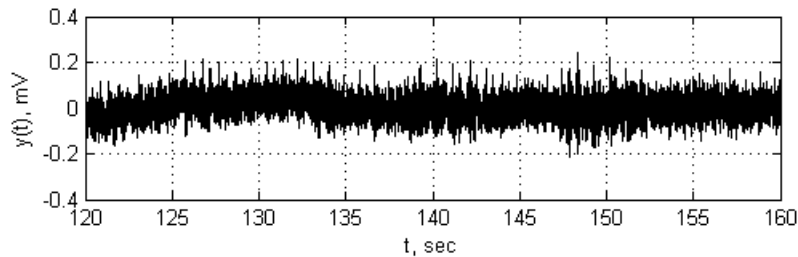


Рис. 6. Осциллограмма фрагмента сигнала на выходе гидрофона

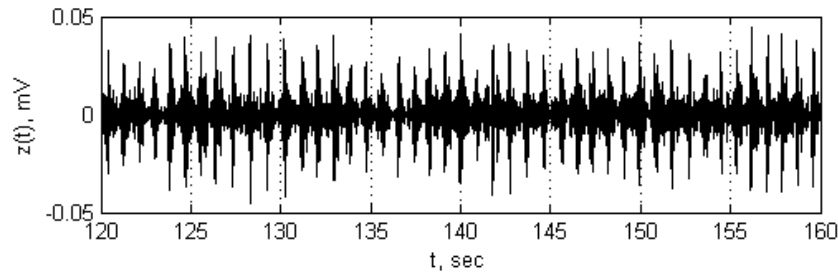


Рис. 7. Осциллограмма фрагмента сигнала на выходе полосового фильтра

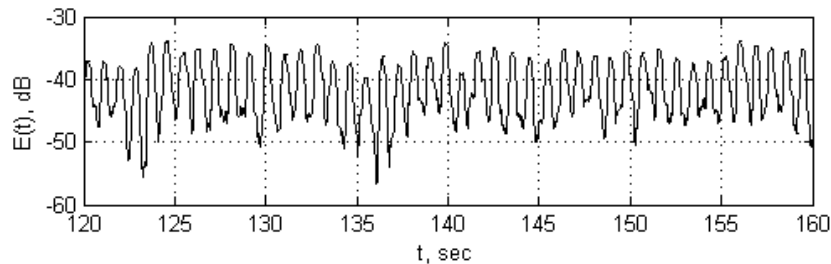


Рис. 8. Осциллограмма фрагмента сигнала на выходе интегратора

Сравнение осциллограмм на рис. 2 и 4 показывает, что фильтрация в полосе 10–20 Гц позволила в данном эксперименте выявить основные элементы исследуемого явления. Отношение сигнал/помеха возросло от значения 2–3 дБ в исходном сигнале до 10–15 дБ в отфильтрованном. Влияние низкочастотного тренда, вызванного движением воды вследствие произвольных движений испытуемого ослаблено.

На рис. 6–8 более детально показаны фрагменты рис. 2, 4, 5, соответствующие интервалу времени 120–160 с (рука испытуемого опущена в воду). Хорошо заметны максимумы, соответствующие прохождению пульсовой волны с частотой, соответствующей ЧСС испытуемого (68 ударов в минуту во время данного эксперимента). Сигнал на выходе интегратора (при использованном времени накопления) имеет квазирегулярную структуру. Показанные на рис. 7, 8 осциллограммы пригодны как для визуального обнаружения на фоне помех присутствия человека вблизи гидрофона, так и для определения его ЧСС и анализа variability сердечного ритма, в том числе в автоматическом режиме.

При использовании методов статистической обработки сигналов [6] и направленных низкочастотных гидрофонов, например гидрофонов колебательной скорости или градиента давления это позволяет рассчитывать на получение больших дальностей обнаружения подобных сигналов, чем в данном эксперименте. Результаты, подобные вышеописанным, были получены и для фрагментов записей, соответствующих задержке дыхания, а также в экспериментах, когда исследовались воспринимаемые гидрофоном сигналы, обусловленные пульсовой волной в нижних конечностях.

По результатам проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Используемые в работе технические средства позволяют в лабораторных условиях обнаруживать акустические поля, обусловленные пульсовыми волнами погруженных в воду конечностей человека на расстояниях до 0,5 м.

2. Разработанные и использованные в работе алгоритмы и программные средства в ряде случаев позволяют выделять составляющие, соответствующие ЧСС на фоне помех в виде, пригодном для оценки вариабельности сердечного ритма. Это может быть использовано, например, для контроля за состоянием здоровья людей, принимающих водные процедуры в ваннах или обнаружения людей в воде вблизи охраняемых объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Почекутова И.А., Коренбаум В.И.* Акустическая оценка влияния одиночного погружения в водолазном снаряжении закрытого типа на вентиляционную функцию легких // Физиология человека. – 2011. – Т. 37, № 3. – С. 76-82.
2. *Fillinger L., Hunter A.J., Zampolli M., Clarijs M.C.* Passive acoustic detection of closed-circuit underwater breathing apparatus in an operational port environment // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2012. – Vol. 132, No.4. – P. EL310-EL316.
3. *Shaltis, P.A.; Reisner, A.T.; Asada, H.H.* Cuffless blood pressure monitoring using hydrostatic pressure change // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 2008. – No. 55. – P. 1775-1777.
4. *O'Rourke M.F., Pauca A., Jiang X.J.* Pulse wave analysis // *Br. J. Clinical Pharmacol.* – 2001. – Vol. 51 (6). – P. 507-522.
5. *Lee S.S., Ahn M.C., Ahn S.H.* A new measurement method of a radial pulse wave using multiple Hall array devices // *J. Magn.* – 2009. – No. 14. – P. 132-136.
6. *Горовой С.В.* Использование трехмерных корреляционных функций гидроакустических шумов для целей экологического мониторинга водных районов // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2013. – № 9 (146). – С. 69-75.

REFERENCES

1. *Pochekutova I.A., Korenbaum V.I.* Akusticheskaya otsenka vliyaniya odinochnogo pogruzheniya v vodolaznom snaryazhenii zakrytogo tipa na ventilyatsionnyuyu funktsiyu legkikh [Acoustic evaluation of the effect of a single dive in the diving equipment of the closed type for ventilation lung function], *Fiziologiya cheloveka* [Human physiology], 2011, Vol. 37, No. 3, pp. 76-82.
2. *Fillinger L., Hunter A.J., Zampolli M., Clarijs M.C.* Passive acoustic detection of closed-circuit underwater breathing apparatus in an operational port environment, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2012, Vol. 132, No. 4, pp. EL310-EL316.
3. *Shaltis, P.A.; Reisner, A.T.; Asada, H.H.* Cuffless blood pressure monitoring using hydrostatic pressure change, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2008, No. 55, pp. 1775-1777.
4. *O'Rourke M.F., Pauca A., Jiang X.J.* Pulse wave analysis, *Br. J. Clinical Pharmacol.*, 2001, Vol. 51 (6), pp. 507-522.
5. *Lee S.S., Ahn M.C., Ahn S.H.* A new measurement method of a radial pulse wave using multiple Hall array devices, *J. Magn.*, 2009, No. 14, pp. 132-136.
6. *Gorovoy S.V.* Ispol'zovanie trekhmernykh korrelyatsionnykh funktsiy gidroakusticheskikh шумов dlya tseley ekologicheskogo monitoringa vodnykh rayonov [The use of three-dimensional correlation functions hydroacoustic noise for the purposes of environmental monitoring of water areas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 9 (146), pp. 69-75.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Коренбаум.

Горовой Сергей Владимирович – Дальневосточный федеральный университет; e-mail: GorovoySV@mail.ru; 69000, г. Владивосток-ГСП, ул. Суханова, 8; тел.: +79147212186; кафедра приборостроения; доцент.

Gorovoy Sergey Vladimirovich – Far Eastern Federal University; e-mail: GorovoySV@mail.ru, 8, Sukhanova street, Vladivostok-GSP, 69000, Russia; phone: +79147212186; the department of instrumentation; associate professor.