

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орленок В.В. Морская сейсмоакустика: Учеб. пособие.– Калининград: Калининград. ун-т, 1997.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973
3. Слуцкий Д.С., Куценко А.Н. К вопросу о классификации донных осадков в целях экологического мониторинга прибрежных акваторий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 6 (96). – С. 96-103.
4. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978.
5. Слуцкий Д.С., Куценко А.Н. Использование многомерных спектральных функций в гидроакустических системах поиска полезных ископаемых // Сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2011». Т. 4. Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2011. – С. 28-31.
6. Волощенко А.П., Куценко А.Н., Резниченко А.А., Слуцкий Д.С. Исследование характеристик акустических и биомедицинских сигналов для создания диагностической и гидроакустической аппаратуры // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 1 (138). – С. 20-26.
7. Кравчук Д.А., Куценко А.Н. Экспериментальные исследования модового распределения сигнала в мелком море // Сб. тр. «Нелинейная гидроакустика». – Таганрог, ТРТУ, 2006.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

Слуцкий Дмитрий Сергеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: sdiman85@mail.ru; г. Таганрог, ул. Розы Люксембург, 175; тел.: 89185101935; ассистент.

Куценко Александр Николаевич – e-mail: kan1208@mail.ru; г. Таганрог, ул. Октябрьская, 18/1, кв. 46; тел.: 88634311132; к.т.н.; доцент.

Slutsky Dmitry Sergeevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: sdiman85@mail.ru; 175, Roza Luxemburg street, Taganrog, Russia; phone: +79185101935; assistant professor.

Kutsenko Aleksandr Nikolaevich – e-mail: kan1208@mail.ru; 18/1-46, Oktyabrskaya street, Taganrog, Russia; phone: +7634311132; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.37.1:519.21

С.В. Горовой

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ РАЙОНОВ**

Рассматриваются вопросы, связанные с использованием оценок трехмерных корреляционных функций (КФ) для экологического мониторинга. Обсуждаются вопросы выбора полосы частот и времени накопления при оценивании КФ. Приведены результаты оценивания двумерных и трехмерных КФ гидроакустических шумов в заливе Петра Великого Японского моря в диапазоне частот 4–5 кГц при времени накопления 3 с. Проанализирована их временная изменчивость. Показано, что анализ трехмерных КФ позволяет выявлять особенности подводного шума, малозаметные при анализе двумерных КФ, которые могут быть использованы для обнаружения изменений структуры шума в автоматическом режиме. Это может оказаться полезным при решении задач экологического мониторинга и обработки гидроакустических сигналов без участия человека-оператора.

Экологический мониторинг; шумы моря; многомерные корреляционные функции; обработка гидроакустических сигналов

S.V. Gorovoy

USE 3D CORRELATION FUNCTIONS OF THE HYDROACOUSTIC NOISE FOR ENVIRONMENTAL MONITORING OF AQUATIC AREAS

Discusses issues related to the use of three-dimensional evaluations of correlation functions (CF) for environmental monitoring. Discuss choice of bandwidth and time savings when evaluating CF. The results of estimation of 2D and 3D CF hydroacoustic noises in Peter the great Bay of the sea of Japan in the range 4–5 kHz at 3 s accumulation time. Analyzed their temporal variability. Shown that the analysis of three-dimensional CF can identify features of underwater noise, inconspicuous in two-dimensional CF, which can be used to detect changes in the structure of noise in the automatic mode. This can be useful in solving problems of environmental monitoring and processing of hydroacoustic signals without the participation of the human operator.

Environmental monitoring, sea murmurs; multi-dimensional correlation functions; hydroacoustic signals processing.

Одной из задач экологического мониторинга является эколого-хозяйственное районирование и выбор показателей экологического состояния территорий. В настоящее время не выработано единой методики экологического мониторинга водных районов, перечня экологических показателей, методики их измерения и регистрации. В зависимости от вида хозяйственной деятельности при эколого-хозяйственном районировании кроме контроля «основных» параметров, таких как температура, и содержания кислорода в воде может потребоваться информация о параметрах, которые важны для конкретных видов морских обитателей. В связи с этим представляется целесообразным создание специализированных систем экологического мониторинга, в которых предусмотрен контроль наиболее важных именно для данного вида хозяйственной деятельности экологических показателей. Например, при оценке пригодности акватории для работы с дельфинами или другими водными обитателями, имеющими высокоразвитую слуховую систему, необходимо знание зависимости от времени пространственных, спектральных, корреляционных и статистических характеристик гидроакустических шумов. Вопросам оценивания усредненных характеристик шумов моря посвящена обширная литература. Зависимость характеристик шумов моря от времени изучена весьма поверхностно.

Морские обитатели с высокоразвитой слуховой системой демонстрируют способность «решать» ряд сложных задач обработки сигналов: отличать по неизвестным нам признакам шумы моря от шумов судоходства, обнаруживать в пассивном режиме «чужака» на «своей» территории и т.д. [1]. В качестве некоторой модели их слуховой системы может быть использована модель «биологического корреляционного приемника высокого порядка, построенного на основе нейронной сети». Для оценки эффективности работы таких приемников необходимо знание многомерных функций распределения и многомерных корреляционных функций (КФ). Поэтому при проверке пригодности акватории для работы с дельфинами или другими водными обитателями, имеющими высокоразвитую слуховую систему, представляется целесообразным включение в перечень контролируемых экологических показателей оценок многомерных функций распределения и многомерных КФ.

В [2, 3] описаны результаты оценивания двумерных и трехмерных плотностей распределения выборочных значений давления гидроакустических шумов. Для исследованных в этих работах шумовых сигналов, несмотря на визуальное сходство с гауссовым распределением, проверка непротиворечия одномерной и двумерной плотностей распределения гауссову закону не дала устойчивых положительных результатов. В настоящей работе приведены результаты экспериментального оценивания, применительно к задачам экологического мониторинга, не-

которых двумерных и трехмерных корреляционных функций (КФ) выборочных значений давления гидроакустических шумов в заливе Петра Великого Японского моря. Прием и обработка шумовых сигналов производилась с помощью разработанного автором исследовательского аппаратно-программного комплекса. Описание использованной аппаратуры приведено в [2]. Прием шумовых сигналов производился с помощью установленного вблизи дна одиночного ненаправленного гидрофона. В районе установки гидрофона глубина места составляла 30 м, расстояние до берега 200 м, грунт – ил – песок. Во время проведения записей сигналов волнение моря не превышало 3 баллов, скорость ветра не превышала 1 м/с, осадков и судов на расстоянии менее 5 км от места установки гидрофона не было. Неравномерность АЧХ приемной системы в диапазоне 0,3–6 кГц не превышала +/- 1 дБ, частота квантования составляла 44,1 кГц.

Физический смысл и методы оценивания многомерных корреляционных функций распределения рассмотрены в [4, 5]. Для совместно стационарных в широком смысле и эргодических случайных процессов $x(t)$ и $y(t)$ двумерная КФ

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t-\tau)dt, \quad (1)$$

где σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения случайных процессов $x(t)$ и $y(t)$, характеризует степень статистической связи 1-го порядка (линейной статистической связи) между случайными процессами $x(t)$ и $y(t-\tau)$. Если $x(t) = y(t)$, $R_{xx}(\tau)$ характеризует степень линейной статистической связи между значениями случайного процесса в моменты времени, отстоящие друг от друга на τ . Трехмерная КФ совместно стационарных в узком смысле и эргодических случайных процессов $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$ определяется соотношением

$$R_{xyz}(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t-\tau_1)z(t-\tau_2)dt, \quad (2)$$

где σ_x , σ_y , σ_z – среднеквадратические отклонения случайных процессов $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Она характеризует степень статистической связи 2-го порядка [4] между случайными процессами $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Если $x(t) = y(t) = z(t)$ и $\tau_1 = \tau_2 = \tau$, соотношение (2) преобразуется в соотношение

$$R_{xxx}(\tau, \tau) = \frac{1}{\sigma_x^3} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t-\tau)^2 dt. \quad (3)$$

В данном случае $R_{xxx}(\tau, \tau)$ характеризует степень линейной статистической связи между значением случайного процесса в произвольный момент времени t и квадратом значения этого же случайного процесса в моменты времени $t \pm \tau$. Аналогично вводятся корреляционные функции более высоких порядков. Использование многомерных КФ позволяет выявлять статистические связи соответствующих порядков, давая возможность уточнять модель исследуемого случайного процесса и прогнозировать его поведение [5].

Численное оценивание многомерных КФ сопряжено с рядом трудностей. Формальное применение соотношений (1–3) в качестве экологических показателей может оказаться физически некорректным. Предположения о стационарности и эргодичности шумов моря в районах интенсивного судоходства на интервалах времени, превышающих несколько десятков минут часто не соответствуют результатам наблюдений. В технических системах для обоснования выбора конечного времени накопления T в (1)–(3) исходя из физических соображений используют

такие понятия, как «интервал стационарности», «интервал эргодичности», «интервал корреляции» и др. [4–6]. При уменьшении величины T в (1)–(3) появляется возможность исследования временной изменчивости оценок КФ, но ухудшается статистическая устойчивость получаемых результатов. В вопросах обоснования выбора полосы частот исследуемого сигнала ситуация аналогичная.

При исследовании влияния шума на морских обитателей необходимо учитывать особенности их слуховых систем. Диапазон воспринимаемых ими частот может составлять от единиц герц до 300 кГц и более, время, по истечении которого наблюдается реакция на звуковые сигналы может составлять от 10 мс до 10 с и более. В настоящее время нет общепринятых рекомендаций по выбору времени накопления и полосы частот для анализа физиологического воздействия шума моря на морских обитателей. В некотором приближении для учета физиологического воздействия шума в качестве времени накопления T в (1)–(3) можно воспользоваться временем реакции на «наиболее важные» или «типичные» звуковые сигналы, а в качестве полосы частот – диапазоном частот таких сигналов.

Результаты обработки шумовых сигналов, полученных с помощью вышеуказанной приемной системы, представлены на рис. 1–3. После фильтрации цифровым КИХ-фильтром 512-го порядка с полосой пропускания $\Delta f=4\text{--}5$ кГц они были пронормированы по уровню, чтобы их средние значения по модулю не превышали 10^{-8} , а среднеквадратические значения составляли 1 ± 10^{-8} .

На рис. 1,а показан фрагмент типичной спектрограммы исследуемого шумового сигнала (до фильтрации цифровым КИХ-фильтром), полученной с помощью 1024-точечного БПФ. Спады спектра на частотах ниже 300 Гц и выше 6 кГц обусловлены частотной характеристикой используемой аппаратуры. В полосе частот 4–5 кГц спектральную плотность $S(f)$ можно считать приблизительно постоянной.

На рис. 1,б сплошной линией показана гистограмма исследуемого фрагмента сигнала до фильтрации цифровым КИХ-фильтром. Пунктирной линией показана плотность гауссова распределения с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

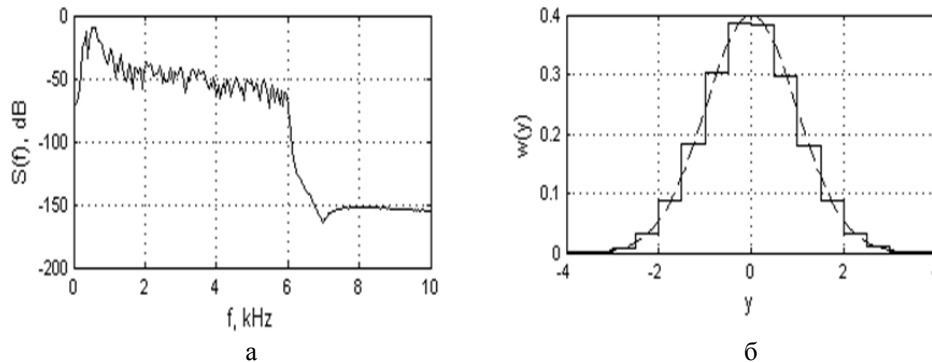


Рис. 1. Спектрограмма (а) и гистограмма (б) типичного фрагмента исследуемого сигнала до фильтрации

На рис. 2 и 3 приведены результаты оценивания начальных участков двумерных и трехмерных КФ $R_{xx}(\tau)$, $R_{xxx}(\tau)$ и $R_{xyz}(\tau_1, \tau_2)$ исследуемого шумового сигнала на выходе КИХ-фильтра. Вычисления проводились по формулам (1)–(3), время накопления $T = 3$ с. При частоте квантования 44,1 кГц это соответствует усреднению по 132 300 выборочным значениям.

На рис. 2,а,в,д,ж показаны оценки начальных участков двумерных КФ $R_{xx}(\tau)$ для четырех трехсекундных фрагментов исследуемого шумового сигнала, отстоящих друг от друга последовательно на 10 с. Их вид вполне согласуется с теоретическими результатами для узкополосных стационарных сигналов, приведенными в [6]. На рис. 2,б,г,е,з показаны оценки начальных участков КФ $R_{xxx}(\tau)$ для фрагментов сигнала, соответствующих рис. 2,а,в,д,ж. КФ $R_{xxx}(\tau)$ характеризует степень линейной статистической связи между значениями исследуемого сигнала в произвольный момент времени t и квадратами значений этого же сигнала в моменты времени $t \pm \tau$.

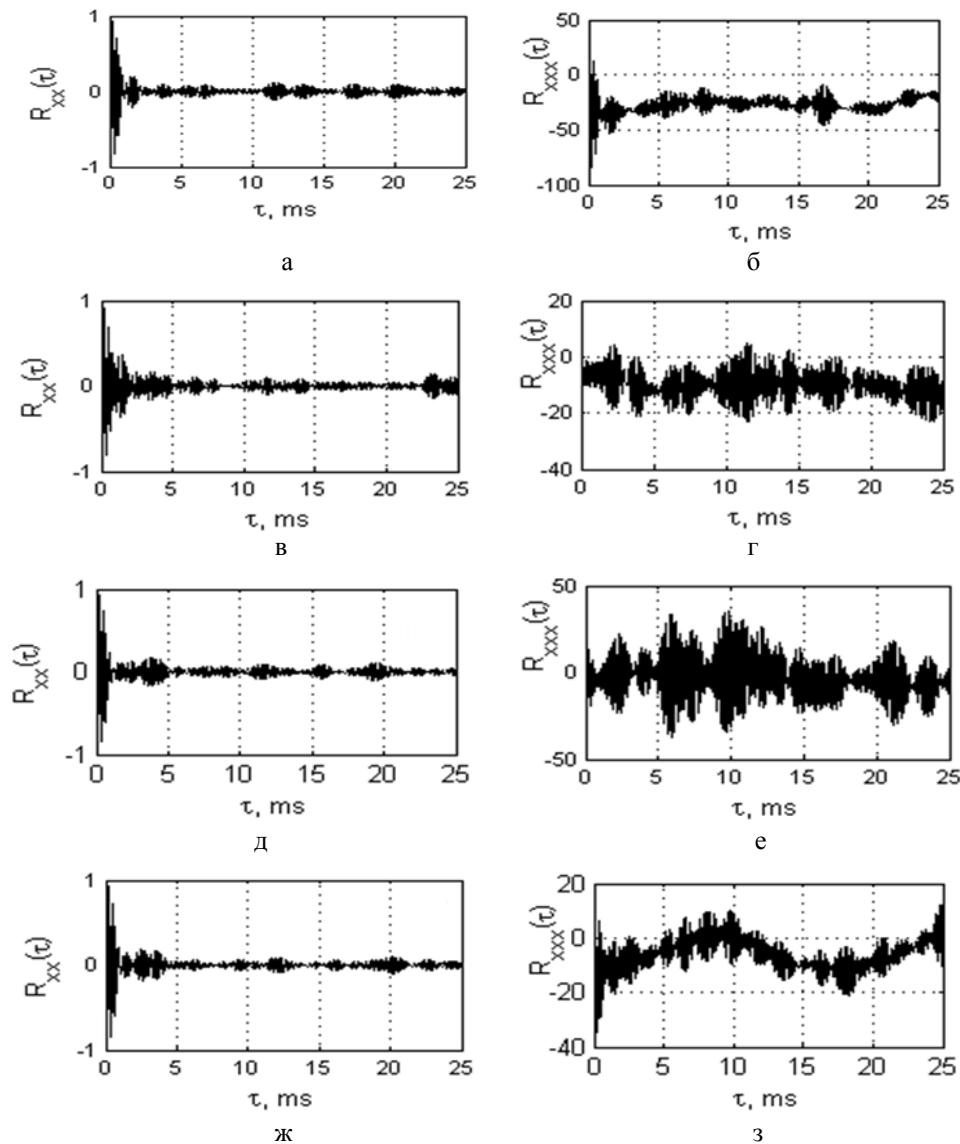


Рис. 2. Оценки начальных участков КФ $R_{xx}(\tau)$ и $R_{xxx}(\tau)$ фрагментов исследуемого сигнала, отстоящих друг от друга последовательно на 10 с

На рис. 3,а,б,в,г показаны первые квадранты начальных участков (для положительных значений τ_1 и τ_2) оценок изолиний трехмерных КФ $R_{xyz}(\tau_1, \tau_2)$ для тех же трехсекундных интервалов, что и на рис. 2.

Из сравнения $R_{xx}(\tau)$, $R_{xxx}(\tau)$ и $R_{xyz}(\tau_1, \tau_2)$ видно, что даже на интервале времени в 40 с при переносе начала отсчета времени в пределах 10 с $R_{xxx}(\tau)$ и $R_{xyz}(\tau_1, \tau_2)$ изменяются более заметно, чем $R_{xx}(\tau)$ и поэтому могут быть использованы для обнаружения кратковременных изменений параметров шумового поля и выявления в нем статистических связей высших порядков, вызванных, например, прохождением вихрей. Кроме того, из рис. 2 и 3 видно, что в отличие от $R_{xx}(\tau)$, у КФ $R_{xxx}(\tau)$ и $R_{xyz}(\tau_1, \tau_2)$ при переносе начала отсчета времени существенно изменяется форма. Это может быть использовано для построения автоматических обнаружителей изменений параметров гидроакустического шумового поля.

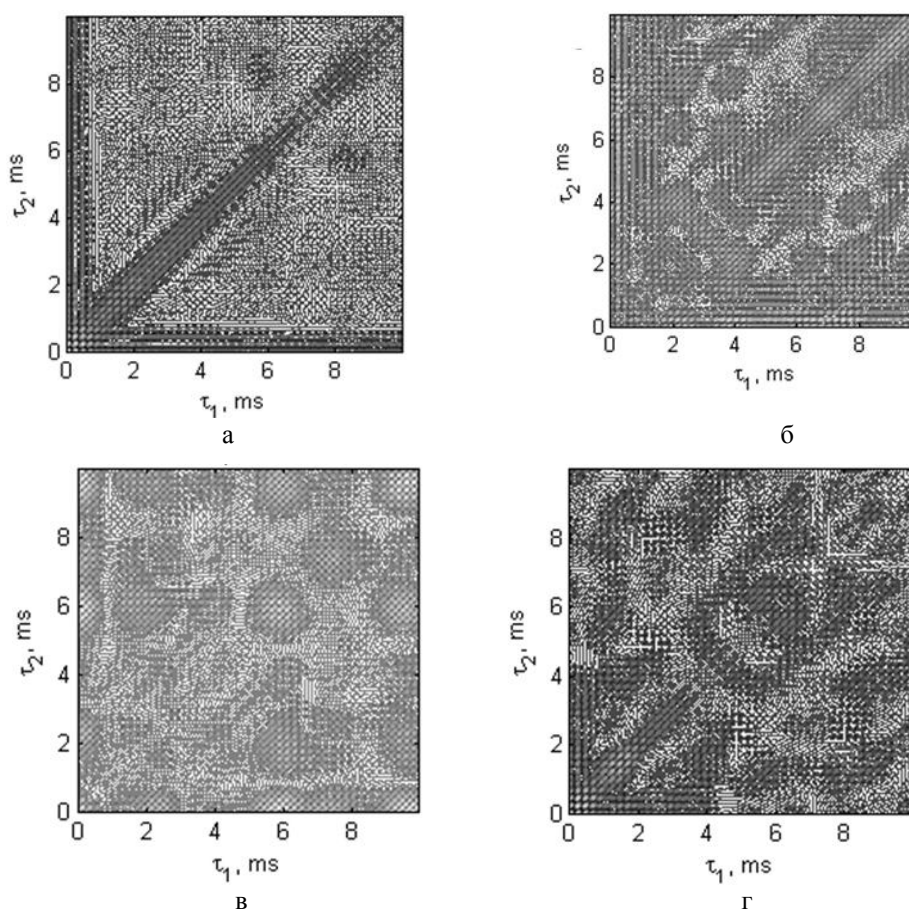


Рис. 3. Оценки начальных участков 3-мерных КФ $R_{xyz}(\tau_1, \tau_2)$ фрагментов исследуемого сигнала, отстоящих друг от друга последовательно на 10 с

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айрапетьянц Э.Ш. Константинов А.И. Эхолокация в природе. – Л.: Наука, 1974. – 512 с.
2. Горовой С.В. Некоторые результаты экспериментального исследования двумерных функций распределения давления гидроакустических шумов в прибрежных водах залива Петра Великого Японского моря // Материалы докладов VII Всероссийского симпозиума «Физика геосфер». – Владивосток: Дальнаука, 2011. – С. 444-447.

3. *Горовой С.В.* Некоторые результаты экспериментального оценивания трехмерных плотностей распределения выборочных значений давления гидроакустических шумов в Заливе Петра Великого Японского моря. Материалы докладов VIII всероссийского симпозиума «Физика геосфер». – Владивосток: Дальнаука, 2013 (в печати).
4. *Стратонович Р.Л.* Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1961. – 558 с.
5. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. – М.: Сов. радио, 1978. – 375 с.
6. *Бендат Дж.* Основы теории случайных шумов и ее применения. – М.: Наука, 1965. – 463 с.

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.

УДК 504.03.06.001.57

В.И. Каевицер, В.Ф. Крапивин, Ф.А. Мкртчян, В.В. Климов

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ*

Описана структура и функции экспертной системы для автоматизации гидрофизических исследований с целью получения оперативной информации о состоянии физико-химических характеристик водных объектов различного типа. Система оснащена алгоритмами идентификации загрязнителей водной среды по измерениям их спектральных образов. В качестве входной информации используются данные многоканальных измерений в оптическом диапазоне электромагнитного спектра. Описан алгоритм обучения и распознавания спектральных образов водных объектов.

Спектр; идентификация; загрязнитель; водная среда; обучение.

V.I. Kaevitser, V.F. Krapivin, F.A. Mkrtchyan, V.V. Klimov

EXPERT SYSTEM FOR IDENTIFICATION AQUATIC POLLUTANTS

We describe the structure and function of an expert system to automate the hydro studies to provide information about the state of physical and chemical characteristics of the water bodies of different types. The system is equipped with algorithms for the identification of aquatic pollutants by measuring their spectral images. As input information data is used in an optical multichannel measurement range of the electromagnetic spectrum. The algorithm of learning and recognition of spectral images of water bodies.

Spectrum; identification; contaminant; aqueous medium; education.

Проблема диагностики состояния водной среды рассматривается во многих национальных и международных программах по охране окружающей среды. Знание качества водных ресурсов важно для многих сфер жизни населения планеты. Ведь запасы пресной воды на нашей планете представляют единый ресурс, структура и содержание которого зависят от множества природных и антропогенных

* Работа поддержана РФФИ (грант № 13-01-00023а).