

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ
АВТОНОМНОГО ПРОФИЛОГРАФА
КАК ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ
ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

*Л.А. Краснодубец, А.Н. Греков**

ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»
г. Севастополь, ул. Студенческая, 33
E-mail: lakrasno@gmail.com

*Институт природно-технических систем
г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: science.ipts@ya.ru

На основе предложенной модели ныряющего буя с регулируемой плавучестью разработана модель двухконтурной адаптивной системы управления скоростными режимами автономного профилографа в зависимости от градиентов измеряемых параметров. Приведены результаты моделирования.

Введение. Измерения вертикальной структуры океанской среды, выполняемые в настоящее время, включают регистрацию натуральных данных от различных сенсоров с последующей их обработкой и распространением в рамках глобальной системы наблюдений GOOS [1]. В качестве базового измерительного компонента этой системы выбраны морские автономные ныряющие буи с регулируемой плавучестью класса ARGO [2], которые, выполняя функции подвижных платформ сбора данных, регистрируют профили температуры и электропроводности через каждые 10 суток на протяжении 2–4 лет и передают полученные данные в центр обработки по спутниковому каналу связи. По данным [3] на 03.09.2015 в активном состоянии находились 3881 буй класса Argo. Основным недостатком таких буев, являющихся по существу морскими роботами профилографами, – малая скорость погружения, которая примерно соответствует 0,1 м/с [4]. Как показано в [5], зондирование с такой скоростью практически исключает динамические искажения при измерении температуры с помощью датчиков температуры фирмы SBE [6], постоянная

времени которых оценивается величиной $\theta_t = 0,065c$. Однако, зондирование при указанном скоростном режиме до глубин 2000 м требует значительного времени (~ 6 часов). Это может привести к искажению результатов измерений из-за временной и пространственной изменчивости океанской среды. Практика океанологических исследований показала, что область значений измеряемых параметров с большими градиентами простирается в среднем до глубин на уровне 500 м. По этой причине нет необходимости проводить зондирование с малой скоростью всего профиля, а в целях сокращения времени и соответственно экономии средств на эксперимент обеспечить гибкое изменение скорости в зависимости от градиентов измеряемых параметров при помощи специально разработанной системы управления.

Целью данной статьи является разработка и исследование методом компьютерного моделирования адаптивной системы автоматического управления скоростными режимами движения ныряющего буя, зависящими от градиентов измеряемых параметров океанской среды. При этом в качестве критерия выбора скоростного режима приняты рекомендации WOCE [7] относительно погрешности измерения практической солёности, температуры и давления, которые не должны превышать $\Delta Sp = 0,002$, $\Delta t = 0,002^\circ C$, $\Delta P = 3$ дбар ($\Delta H = 3$ м) по солёности, температуре и давлению соответственно.

Модель ныряющего буя с регулируемой плавучестью как объекта управления. Движение ныряющего буя как поплавкового устройства цилиндрической формы исследуется под действием вынуждающей силы (составляющей силы Архимеда), которая формируется устройством управления плавучестью, построенном на основе специальной камеры, являющейся элементом корпусной части буя и способной изменять свой линейный размер – длину. Исследуемое движение буя в водной среде будем рассматривать в вертикальной плоскости без учета его горизонтальной составляющей. Это оправдано тем, что буй при

погружении или всплытии свободно смещается (дрейфует) в горизонтальном направлении, параллельном поверхности, вместе с массами окружающей его воды.

Вертикальное движение ныряющего буя, например, при погружении вдоль оси Z , происходит под действием трех основных сил. Это – сила тяжести P , сила гидродинамического сопротивления F_c и суммарное давление со стороны окружающей среды, основная составляющая которого порождает выталкивающую (архимедову) силу F_g , включающую в себя и управляющую силу F_u . Другие составляющие окружающего давления вызваны различными гидродинамическими процессами, например, прохождением волн, а также неоднородным распределением химического состава и физических характеристик водной среды по глубине. Последние существенно влияют на значение плотности морской воды ρ_g , от которой зависит величина выталкивающей силы. Объем погруженной в воду корпусной части буя $V_b(t)$ включает в себя и объем камеры плавучести $V_{kn}(t)$, значение которого может целенаправленно изменяться. Сила гидродинамического сопротивления F_c является результатом возмущений давления, вызванных движением буя в водной среде с различной плотностью, а также напряжений трения. При известном допущении [8], что сила гидродинамического сопротивления пропорциональна по величине квадрату скорости движения ныряющего буя в водной среде и имеет знак противоположный относительно направления вектора этой скорости, выражение для вычисления этой силы имеет вид

$$F_c = \frac{C_x S_m \rho_g}{2} (v - v_l) |(v - v_l)|, \quad (1)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления; S_m – площадь максимального поперечного сечения корпуса ныряющего буя; v – скорость движения ныряющего буя в морской воде; v_l – локальная скорость воды; g , – эффективное уско-

рение свободного падения; ρ_g – плотность морской воды.

Управляющая сила возникает в результате приращения объема корпусной части за счёт изменения объема камеры плавучести $V_{kn}(t)$ в пределах от 0 до V_{kn}^{max} . Выполненная из эластичного материала эта камера наполняется гидравлической жидкостью, подаваемой поршневым насосом из внутреннего резервуара, и расширяется в длину, принимая форму цилиндра с диаметром, приблизительно равным диаметру основного корпуса буя. Поэтому можно считать, что площадь основания этого цилиндра равна площади сечения корпуса буя S_c , а текущая его длина $l_c(t)$ равна линейному перемещению поршня насоса $l(t)$, так как перекачиваемая гидравлическая жидкость практически не сжимается. В таком случае текущее значение объема камеры плавучести выражается следующим образом

$$V_{kn}(t) = l(t) S_c,$$

где $0 \leq l(t) \leq l^{max}$ и соответственно

$$0 \leq V_{kn}(t) \leq V_{kn}^{max}. \quad (2)$$

Принимая во внимание (2), сделаем допущение, что конструкция буя такова, что он будет обладать нейтральной плавучестью, если $V_{kn}(t) = \frac{V_{kn}^{max}}{2}$. В таком случае неравенство для $l(t)$ из (2) примет вид

$$-\frac{l^{max}}{2} \leq l(t) \leq \frac{l^{max}}{2}. \quad (3)$$

Далее будем считать, что изменение объема камеры плавучести осуществляется специальным электрогидроприводом с обратной связью. При этом перемещение поршня насоса происходит при помощи винтового (резьбового) вала, приводимого в движение электродвигателем постоянного тока вместе с редуктором, и контролируется отрицательной обратной связью. Уравнение электрогидравлического устройства, изменяющего плавучесть буя и, тем самым, создающего управляющую силу F_u , можно записать в виде

$$T_e \frac{dl(t)}{dt} + l(t) = k_e u(t), \quad (4)$$

где T_e – постоянная времени электрогидравлического устройства; $l(t)$ – линейное перемещение поршня насоса; k_e – коэффициент передачи электрогидравлического устройства; $u(t)$ – управляющее напряжение.

Проектируя действующие на ныряющий буй силы на вертикальную ось связанной системы координат, с учетом второго закона Ньютона можно получить следующее уравнение, описывающее динамику движения ныряющего буя:

$$\ddot{z}(t) = -a|\dot{z}(t)|\dot{z}(t) - bu(t) + f_p(z) \quad (5)$$

$$t \in [t_0, t_f],$$

где $z(t)$ – глубина погружения.

$$a = \frac{C_x S}{2V_0^0}, \quad b = \frac{Sgk_p}{V_0^0},$$

$$f_p(z) = \left[1 - \frac{\Delta\rho_\theta(z)}{\rho_\theta(z)} \right] g. \quad (6)$$

Нелинейное неоднородное дифференциальное уравнение (5) с начальными условиями

$$t_0 = 0; \quad z(t_0) = z_0; \quad \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0$$

описывает процессы движения (погружения или всплытия) в вертикальной плоскости ныряющего буя, который находится под воздействием трех основных сил:

– силы сопротивления движению, представленной первым слагаемым в правой части уравнения (5);

– выталкивающей силы, представленной вторым слагаемым в правой части уравнения (5) и выполняющей функцию управления;

– силы, представленной третьим слагаемым в правой части уравнения (5), которая является равнодействующей силы тяжести и составляющей выталкивающей силы, возникающей в результате изменения плотности морской воды. Во время погружения эта равнодействующая играет роль движущей силы. При всплытии в роли движущей силы выступает выталкивающая сила, которая полностью компенсирует силу тяжести и обеспечивает управляющее воздействие.

Особенностью модели движения ныряющего буя в виде (5) от подобной модели в [9] является приведение возмущений, вызванных изменениями стратификации (вертикального профиля плотности) морской среды к равнодействующей силе $f_p(z)$, которая зависит не только от глубины, но и, строго говоря, от времени. Однако, учитывая малую изменчивость во времени этой характеристики, силу $f_p(z)$ можно рассматривать как функцию только глубины z . При этом параметры модели (5) соответственно a и b остаются постоянными. Это в значительной степени облегчает моделирование процессов управляемого движения ныряющего буя в условиях сильной стратификации окружающей среды, а также вычисление градиентов ее плотности и связанных с ней параметров.

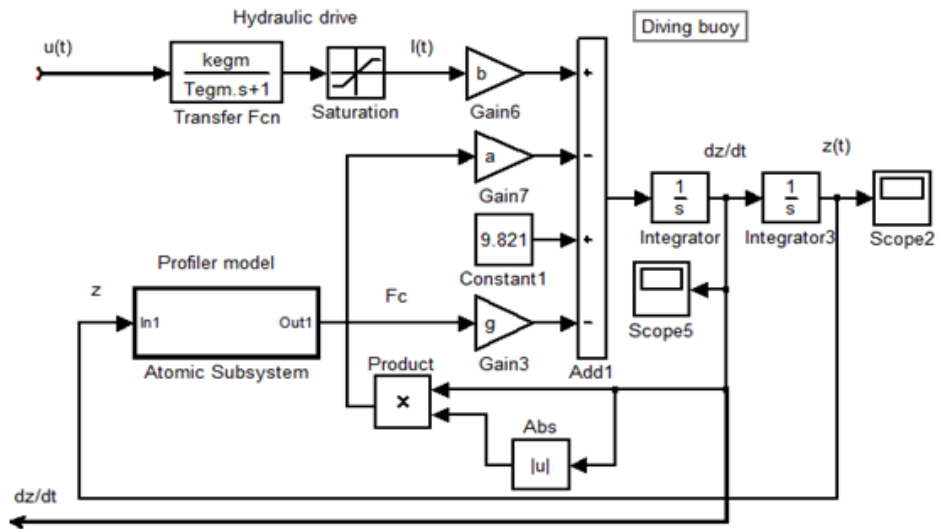
Следует отметить, что для уравнения (5) наряду с начальными условиями следует также учитывать неравенства

$$-\frac{u^{\max}}{2} \leq u(t) \leq \frac{u^{\max}}{2},$$

где $u^{\max} = \frac{l^{\max}}{k_p}$, определяющие ограничения

на управляющую функцию $u(t)$.

Структурная схема моделирования ныряющего буя как объекта управления представлена на рис. 1 в виде S -модели, предназначенной для моделирования в среде визуального моделирования *Simulink*. На схеме изображены основные модули мехатронной системы регулирования плавучести: *Diving buoy* – ныряющий буй, представляющий собой нелинейную динамическую систему второго порядка, переменными которой являются глубина и скорость погружения (всплытия); *Hydraulic drive* – электрогидравлический привод, являющийся динамической системой с ограничением, описание которого выполнено в виде передаточной функции первого порядка и нелинейного элемента; *Profiler model* – модель, содержащая массивы измерений с учетом постоянных времени сенсоров термohалинных параметров, а также плотности морской воды как функции глубины.



Р и с. 1. Структурная схема моделирования мехатронной системы – ныряющего буя с приводом

Адаптивный регулятор системы автоматического управления скоростными режимами вертикального движения автономного профилографа. Закон управления для адаптивного регулятора, предназначенного для управления скоростными режимами профилографа, построим, следуя методу [10]. Введем в уравнении (5) замену переменной $\dot{z} = v(t)$. Имеем

$$\dot{v}(t) = -a|v(t)|v(t) - bu(t) + f_p(z). \quad (7)$$

Далее поставим задачу: найти управляющую функцию $u(v, t)$ в форме обратной связи, которая обеспечит перевод системы управления из начального скоростного режима $t = t_0$; $v(t_0) = v_0$ в новый скоростной режим $t = t_f$; $v(t_f) = \bar{v}$. При этом потребуем, чтобы фазовые траектории процесса $v(t) \rightarrow \bar{v}$ проходили в малой окрестности фазовых траекторий эталонного процесса $v^*(t) \rightarrow \bar{v}$, задаваемого эталонной моделью в виде дифференциального уравнения

$$\dot{v}^*(t) + \alpha v^*(t) = \alpha \bar{v}, \quad t \in [t_0, t_f], \quad (8)$$

где параметр $\alpha > 0$, определяющий динамические и статические свойства эталонного процесса, должен выбираться. При этом в качестве меры невязки процессов $v^*(t) \rightarrow \bar{v}$ и $v(t) \rightarrow \bar{v}$ примем целевую функцию

$$G(u) = 0,5[\dot{v}^* - \dot{v}(u)]^2. \quad (9)$$

Искомую управляющую функцию $u(t)$ найдем из условия $G(u) = \min$ ме-

тодом градиентного спуска [11], в соответствии с которым

$$\frac{du}{dt} = -\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, \quad \lambda = const. \quad (10)$$

Вычисляя производную (9), приведем уравнение (10) с учетом (7) и (8) к виду

$$\frac{du}{dt} = \lambda b[\alpha(\bar{v} - v^*) - \dot{v}]. \quad (11)$$

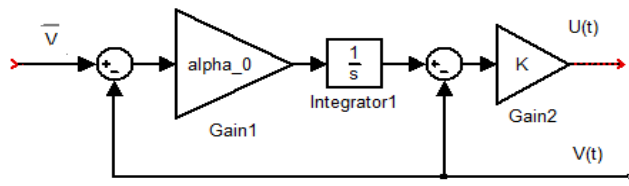
Далее, интегрируя обе части (11) при нулевых начальных условиях, можно найти выражение для искомого закона адаптивного управления с эталонной моделью

$$u(t) = \lambda b[\alpha \int_0^t (\bar{v} - v^*) dt - v]. \quad (12)$$

При формировании управляющего сигнала в соответствии с найденным законом управления в выражение (12) должны быть включены следующие сигналы: сигнал установки скоростного режима \bar{v} , сигнал от выхода эталонной модели v^* и сигнал отрицательной обратной связи v . Полагая $v^* = v$, перейдем к закону адаптивного управления с неявной эталонной моделью, который примет следующий вид

$$u(t) = \lambda b[\alpha \int_0^t (\bar{v} - v) dt - v]. \quad (13)$$

Структурная схема адаптивного регулятора, предназначенного для реализации закона управления (13), представлена в виде S-модели на рис. 2.

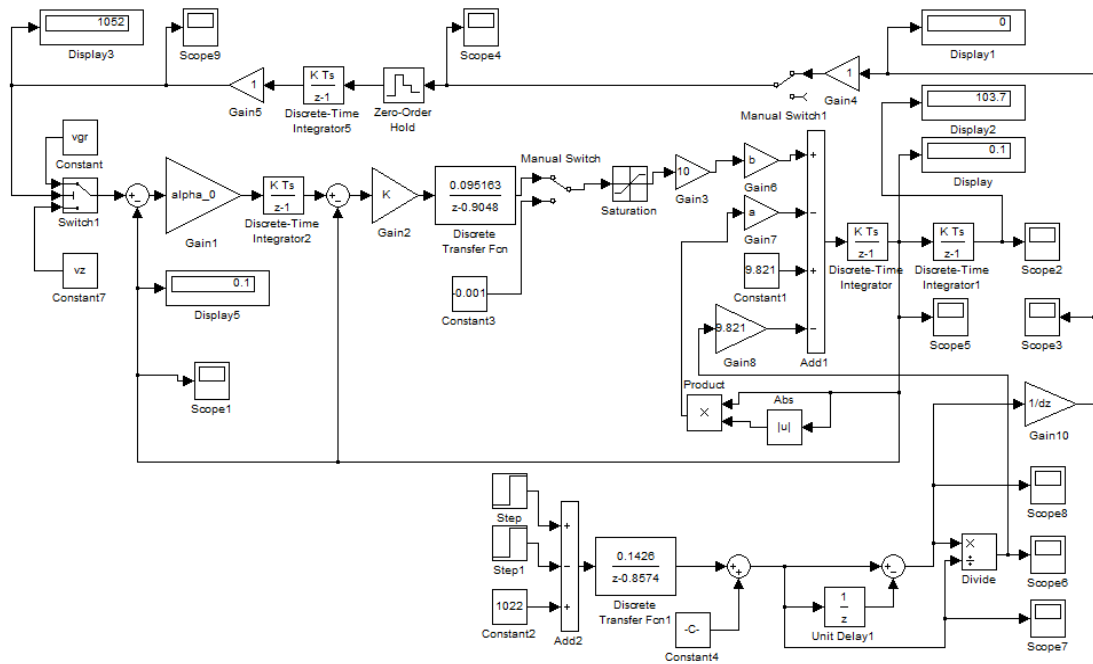


Р и с. 2. Структурная схема регулятора скорости

Моделирование скоростных режимов автономного профилографа как микроконтроллерной системы. Поскольку конструкция регулятора совместно с мехатронной системой регулирования плавучести предполагает техническое исполнение на базе микроконтроллерной системы, то для исследования такой системы была разработана схема моделирования в дискретном времени, которая получена путем преобра-

зования непрерывных моделей, изображенных на рис. 1 и рис. 2, к дискретным методам Тастина [12].

Разработанная модель представлена в виде структурной схемы (*S*-модели), изображенной на рис. 3, и файла с управляющей программой (*m*-файла), ориентированных для исполнения в среде визуального моделирования *Matlab & Simulink* [13].



Р и с. 3. *S*-модель для исследования адаптивной системы управления скоростными режимами автономного профилографа

Управляющая программа предназначена для обеспечения процессов моделирования, а также для расчета параметров регулятора и в соответствии с методикой [14] и выполнения вычислений, связанных с преобразованием исходной непрерывной модели к дискретной. Предложенная *S*-модель работает в дискретном времени с тактовой частотой процессора и имеет блочно-модульную структуру, включающую следующие submodule: объект управления (ныряющий буй с регулируемой плавучестью,

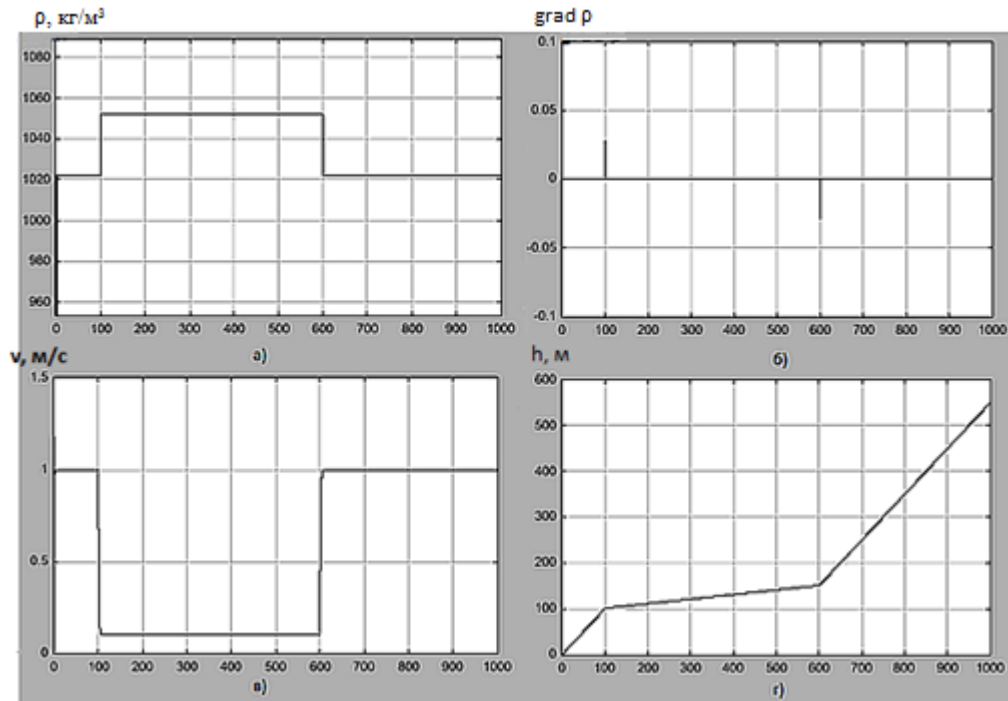
конструктивно выполненный в виде мехатронной системы); адаптивный регулятор для автоматической стабилизации заданной скорости погружения (всплытия); submodule, моделирующий вертикальный профиль стратификации океанской среды как функцию глубины; submodule, моделирующий информационно-измерительный канал с учетом его динамических свойств; элементы, формирующие задающие и возмущающие воздействия; элементы регистрации и

визуализации моделируемых процессов, а также переключатели.

Система управления скоростными режимами автономного профилографа имеет два контура. Первый контур управления предназначен для автоматической стабилизации скорости вертикального движения, которая задается значением константы $v_z = 1$ («крейсерский» режим движения со скоростью $v = 1$ м/с) или константы $v_{gr} = 0,1$ (замедленный «измерительный» режим движения со скоростью $v = 0,1$ м/с, обеспечивающий малый уровень динамических искажений, вызываемых инерционностью сенсоров). Второй контур вычисляет и фиксирует относительные изменения плотности окружающей воды, которые передаются в динамическую модель ныряющего буя и устройство (автоматический переключатель) выбора скоростного режима движения профилографа. Резкое отклонение плотности морской воды от начального среднестатистического значения 1022 кг/м^3 , фиксируемое вторым контуром управления, приводит к автоматическому изменению скоростного режима профилографа с «крейсерского» на «измерительный» путем подачи задающего сигнала $v_{gr} = 0,1$ в первый контур (контур стабилизации

скорости), что обеспечивает уменьшение скорости с $v = 1$ м/с до $v = 0,1$ м/с. При этом дальнейшее движение профилографа с установленной для режима «измерений» скоростью продолжается под управлением системы стабилизации, которая парирует параметрические и другие внешние возмущения некоторое время (устанавливается в настройках моделирования), а затем его движение снова переключается в «крейсерский» режим. Таким образом, система автоматического управления движением автономного профилографа устанавливает «измерительный» скоростной режим всякий раз, когда текущие данные измерений начинают резко изменяться относительно предшествующих. При этом «измерительный» режим снова переключается на «крейсерский», когда на некотором заданном интервале данные теряют изменчивость.

Результаты моделирования динамики смены скоростных режимов под воздействием градиентов по плотности морской воды приведены на рис. 4. Предполагается, что такие градиенты в реальных условиях могут косвенно определяться по температурным градиентам.



Р и с. 4. Графики процессов в динамической системе измерений при изменении скоростного режима погружения «крейсерский» на «измерительный»:

а) плотности морской воды; б) градиентов плотности воды; в) скорости погружения; г) глубины

Заключение. Управление процессами профильных измерений путем изменения скоростных режимов движения автономного профилографа с целью снижения динамических искажений в измерительных каналах является эффективным способом повышения качества и репрезентативности информации о вертикальной стратификации океанской среды и, в частности, обнаружения ее тонкой структуры. При этом за счет сокращения времени на выполнение профилирования возможно снижение затрат на проведение экспериментальных исследований и уменьшение объема запоминающих устройств, предназначенных для хранения временных рядов данных, которые в рассматриваемом случае не требуют последующей обработки и могут быть использованы в реальном масштабе времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dexter P., Summerhayes C.P.* Ocean observations—the Global Ocean Observing System (GOOS) // D. Pugh, G. Holland G (Eds.), *Troubled waters: ocean science and governance*, Cambridge University Press, Cambridge. – 2010. – С. 161–178.
2. *Данченков М.А., Волков Ю.Н.* Проект ARGO – создание Глобальной сети океанографических станций // *Подводные технологии и мир океана*. – 2005. – № 1. – С. 29–34.
3. <http://www.argo.ucsd.edu> (дата обращения: 10.12.2015).
4. *Le Reste S., Gould J.* Euro-Argo. Global Ocean Observing Infrastructure. Float technology analysis. Del. n°4.2.1. – 2011.
5. *Красnodубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В.* Управление морскими буями профиломерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // *Морской гидрофизический журнал*. – 2012. – 4. – С. 69–80.
6. *Thomson R.E., Emery W.J.* Data analysis methods in physical oceanography. – Newnes, 2014.
7. *World ocean circulation experiment.* Requirements for WOCE hydrographic programme data reporting. WHP office report WHP0 90-1, WOCE report N67/91, 1991, Rev.1, Woods Holl, Mass. USA, 71p. unpublished manuscript.
8. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987.
9. *Красnodубец Л.А.* Терминальное управление в морских наблюдательных системах с подвижными платформами сбора данных // *Известия РАН. ТиСУР*. – 2008. – № 2. – С. 141–153.
10. *Красnodубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В.* Управление морскими буями профиломерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Синтез и моделирование системы управления // *Морской гидрофизический журнал*. – 2012. – № 5. – С. 70–82.
11. *Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю.* Адаптивное управление в технических системах. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2001. – 244 с.
12. *Смит Д.М.* Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.
13. *Гуляев А.* MATLAB. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие. – СПб.: Корона, 1999. – 288 с.
14. *Красnodубец Л.А.* Аналитическое конструирование адаптивных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации // *Вестник СевНТУ: сб. научн. тр.* – Севастополь. – 2010. – Вып. 108. – С. 213–217.