

# ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ОХРАНА ВОД СУШИ, МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-09-1

УДК 502.51

## МЕТОДИЧЕСКОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗОНЫ ГЕОЭКОСИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ АЗОВСКОГО МОРЯ

Д-р физ-мат. наук, проф. **Крапивин В.Ф.**<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук **Потапов И.И.**<sup>2</sup>,  
канд. физ-мат наук **Солдатов В.Ю.**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники РАН им. В.А. Котельникова,  
Москва(vkrapivin\_36@mail.ru)

<sup>2</sup> Всероссийский институт научное и технической информации РАН,  
Москва(ipotapov37@mail.ru)

## METHODICAL AND TECHNICAL EQUIPING OF MONITORING SYSTEM OF GEOECOSYSTEM AREA-CASE STUDY OF ASOV SEA

**V.F. Krapivin, I.I. Potapov, V.Yu. Soldatov**

**Ключевые слова:** *спектроэллипсометр, спектральный анализ, метод, алгоритм, диагностика, прогнозирование.*

**Key words:** *spectroellipsometer, spectral analysis, method, algorithm, diagnostics, prognosis.*

*Рассмотрены задачи мониторинга морской гидроэкосистемы и обсуждены методы решения задач, возникающих при ее диагностике. Отмечена роль спектральных методов при оценке качества водной среды. На примере Азовского моря указан комплексный характер проблемы диагностики моря, обусловленный совокупностью разнородных и разноплановых теоретических и прикладных исследований, которые ведутся во многих странах по национальным и международным программам. Охарактеризованы методы спектроэллипсометрии и дистанционного зондирования. Приведены примеры их применения.*

*The monitoring problems of hydroecosystem sea are considered and methods for the solution of tasks arising under the sea diagnostics are discussed. Role of spectral methods is marked to be use for the assessment of the water quality. Complex character of the sea diagnostics problem is shown for the Asov Sea determined by the series of heterogeneous and various theoretical and applied investigations that are realized in numerous countries within national and global programs. Methods of the spectroellipsometry and remote sensing are characterized. Examples of their using are given.*

## Введение

Проблема синтеза информационно-измерительных систем нового поколения, ориентированных на изучение и оценку состояния природно-техногенных структур различного масштаба вплоть до наноструктур, требует решения огромного спектра задач, входящих в компетенцию многих областей знания. Комплексный характер этой проблемы обусловлен совокупностью разнородных и разноплановых теоретических и прикладных исследований, которые ведутся во многих странах по национальным и международным программам. Основная цель всех подобных исследований состоит в попытке ответить на единственный базовый вопрос: какова должна быть структура и режим работы системы наблюдения за элементами изучаемой среды, чтобы обеспечивались надежные оценки ее текущего состояния и прогноз ее развития на ближайшее и перспективное будущее?. К сожалению, ответа на этот вопрос пока нет. Развиваемые в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН подходы к решению этой проблемы дают теоретическую основу новой стадии развития науки об информационно-измерительной технике [1,4,14]. Одним из препятствий здесь является отсутствие научной базы, которая бы объединяла усилия ученых в направлении развития новых информационных технологий, которые бы давали механизмы оптимизации информационных потоков в системах мониторинга и способствовали бы поиску методов решения указанной задачи. Особенно актуальной данная задача является при создании систем наблюдения и контроля окружающей среды таких социально и экономически важных природно-техногенных систем, как бассейн Азовского моря [2,3].

Существующие технические средства мониторинга объектов окружающей среды во многих случаях не обеспечивают необходимой точности оценок их состояния, особенно при анализе химических и биологических загрязнений водных сред с учетом их неоднородности в пространстве. В [8,9] предложена новая технология синтеза систем мониторинга окружающей среды, обобщающая технологию географических информационных систем за счет комплексного использования методов имитационного моделирования, эволюционной технологии синтеза баз знаний, алгоритмов восстановления пространственных образов по отрывочным в пространстве и фрагментарным во времени измерениям, приемов компьютерной картографии и дистанционного зондирования [15]. Эта технология (ГИМС-технология) реализует процедуру адаптивной оценки структуры информационно-измерительной конкретной задачи с учетом ее динамической эффективности в рамках установленных технических и функциональных ограничений. В рассматриваемом здесь частном случае учитываются возможности спектральной эллипсометрии, обеспечивая чувствительность и точность оценки содержания примесей в жидких растворах до наночастиц.

### Спектральная эллипсометрия как элемент ГИМС-технологии

В последнее время интенсивно развивается спектральная поляризационно - оптическая аппаратура для исследований в реальном масштабе времени - многоканальные поляризационные спектрофотометры, спектрополяриметры, спектральные эллипсометры и дихрометры, нефелометры, рефрактометры. Использование в современных поляризационно-оптических приборах эффективных модуляторов состояния поляризации и многоканальных анализаторов, развитие методов программирования определяют их высокие технические характеристики. Так, современные спектрофотометры обеспечивают измерение нескольких спектров в

секунду с точностью и чувствительностью на уровне 1% и 0.01% соответственно, а измерения спектров вращения плоскости поляризации в реальном масштабе времени на спектрополяриметрах выполняются с высокой точностью. В то же время, коммерческие многоканальные поляризационно-оптические спектральные приборы еще не получили широкого распространения.

Предметом нанотехнологии является конструирование, производство и использование функциональных структур, по крайней мере, с одним характерным размером в диапазоне 1-100 нм. Информационно-измерительная система, обеспечивающая реализацию таких измерений, обладают высокой чувствительностью при контроле физических, химических и биологических свойств, явлений и процессов. Такой уровень чувствительности достигается при использовании спектроэллипсометра [11-13,16] в решении задач генерации наночастиц с заданными размерами, для контроля с обратной связью процессов напыления пленочных структур, при определении среднего радиуса пор и их распределения по размерам в различных наноструктурах, а также во многих других исследованиях.

Предложенный и развиваемый в ИРЭ РАН новый метод эллипсометрических измерений – эллипсометрия с дискретной модуляцией состояния поляризации, основан на попеременном облучении изучаемого объекта пучком монохроматического света с двумя состояниями поляризации. Переключатель состояния поляризации обеспечивает точность до  $10^{-5}$  в спектральном диапазоне от 220 до 2200 нм и высокую (до единиц кГц) точность достижимую частоту модуляции пучков излучения. В соосном ахроматическом компенсаторе на основе ромба Френеля из плавленого кварца используется пара плоских параллельных зеркал, установленных под углом 12-15 градусов к падающему на них пучку, при этом повышение ахроматичности компенсатора обеспечивается противоположными знаками изменения фазового сдвига в ромбе и в зеркалах [4].

### Алгоритм идентификации спектральных образов

Применение спектроэллипсометра для решения конкретной задачи сводится к предварительной подготовке обучающей выборки спектральных образов в виде эталонной базы в виде векторного пространства  $A_{\mu,l}^i = \{a_1^i, \dots, a_n^i, I, \mu\}$ ,  $\theta_{\mu,l}^i = \{\theta_1^i, \dots, \theta_n^i\}$ , где  $a_j^i$  - амплитудная характеристика,  $\theta_j^i$  - фазовая характеристика,  $I$  – идентификатор исследуемого объекта,  $n$  – число используемых каналов,  $\mu$  - оценка изучаемого параметра объекта. В общем случае при измерениях определяются два вектора: один  $\Xi_A$  – интенсивность света на фотодетекторе, другой  $\Xi_\Psi$  - тангенс относительного сдвига фаз двух ортогональных поляризованных компонент. В простейшем случае считается, что  $\Xi_A = \{a_1^i, \dots, a_n^i\}$ ,  $\Xi_\Psi = \{\theta_1^i, \dots, \theta_n^i\}$ .

Основная идея алгоритма идентификации состоит в том, что полученный набор векторов  $\Xi_A$  и  $\Xi_\Psi$  сравнивается с соответствующими векторами базы эталонов и по одному из критериев их близости с применением алгоритма интерполяции находится оценка для параметра  $\mu$  или набора таких характеристик. При этом в случае, когда оценивается набор характеристик объекта, база эталонов расширяется за счет создания векторных индикаторов самих спектральных образов (табл. 1).

Идентификация полученного спектрального образа испытуемого образца осуществляется путем сопоставления его вектора  $\Xi(X_1, \dots, X_n, Y)$  с набором эталон-

ных векторов в базе данных. Идентификация образца осуществляется путем поиска в базе эталонов образцов, имеющих минимальное удаление от полученных спектров. Расстояние между векторами рассчитывается по среднему значению:

$$\Delta = \min_n \rho(\Xi - \Xi_n) = \frac{1}{2n} \min_i \left[ \sum_{j=1}^n |X_j - A_j^i| + \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_j - A_j^i)^2} \right]$$

Применение этой формулы дает большую точность по сравнению с использованием только отклонения по абсолютной разнице компонент векторов или только по среднеквадратическому отклонению.

Таблица 1.

### Пример структуры эталона спектрального образа контролируемого объекта.

Номер эталона в базе данных	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$B$
1	$A_{11}$	$A_{21}$	$A_{31}$	$A_{41}$	$A_{51}$	$A_{61}$	$A_{71}$	$A_{81}$	$A_{91}$	$B_1$
.....										
$n$	$A_{1n}$	$A_{2n}$	$A_{3n}$	$A_{4n}$	$A_{5n}$	$A_{6n}$	$A_{7n}$	$A_{8n}$	$A_{9n}$	$B_n$

Обозначения:  $A_1$  – площадь под спектральной кривой;  $A_2$  – максимальное значение спектральной кривой;  $A_3$  – минимальное значение спектральной кривой;  $A_4$  – расстояние в нанометрах между максимальным и минимальным значениями спектральной кривой;  $A_5$  – максимальная производная спектральной кривой;  $A_6$  – максимальная вторая производная спектральной кривой;  $A_7$  – число максимумов на спектральной кривой;  $A_8$  – значение спектральной кривой при  $\lambda=400$  нм;  $A_9$  – значение спектральной кривой при  $\lambda=800$  нм;  $B$  – значение оцениваемой характеристики.

### ГИМС-технология и водные растворы

В настоящее время совместное применение технических средств и software для оперативного мониторинга водной среды развито недостаточно из-за сложности синтеза комплексной системы мониторинга. Особенно сложны задачи сочетания алгоритмического обеспечения с уровнем информационного обеспечения системы мониторинга. Актуальная задача экологического мониторинга требует разработки компактных прецизионных поляризационно-оптических приборов для экспресс анализа жидких сред. При этом эффективность решения многопараметрических задач в большой мере определяют чувствительность и точность приборов, их универсальность, возможность использования широкого спектрального диапазона. Спектральные измерения в водной среде дают информативную базу для применения современных методов и алгоритмов распознавания и идентификации загрязнителей этой среды.

В институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук впервые созданы устройства, основанные на принципах многоканальной регистрации спектров ослабленного, отраженного или рассеянного света [4]. Совместное использование оперативных измерений спектрометрии и методов обработки данных впервые реализовано в адаптивном идентификаторе, принципиальная схема которого представлена на рис.1, а различные его модификации указаны на рис. 2 и 3.

## Галогенная лампа

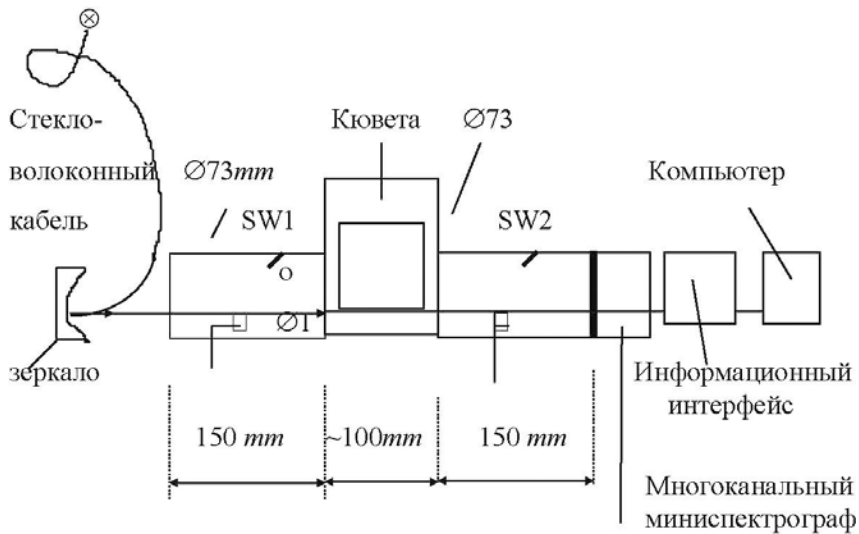


Рис. 1. Принципиальная схема адаптивного идентификатора. Через SW1 и SW2 обозначены переключатели состояния поляризации.

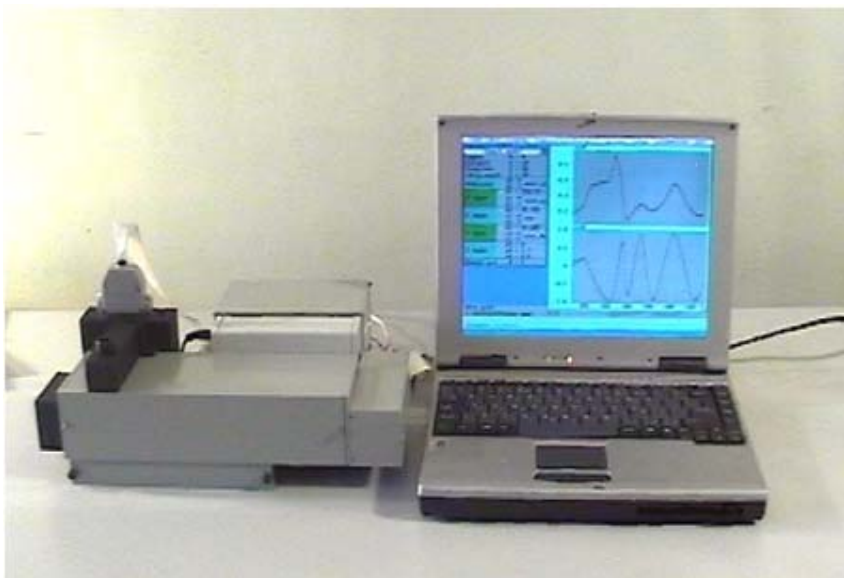


Рис. 2. Спектроэллипсометрическая система для регистрации характеристик водной среды в лабораторных условиях.

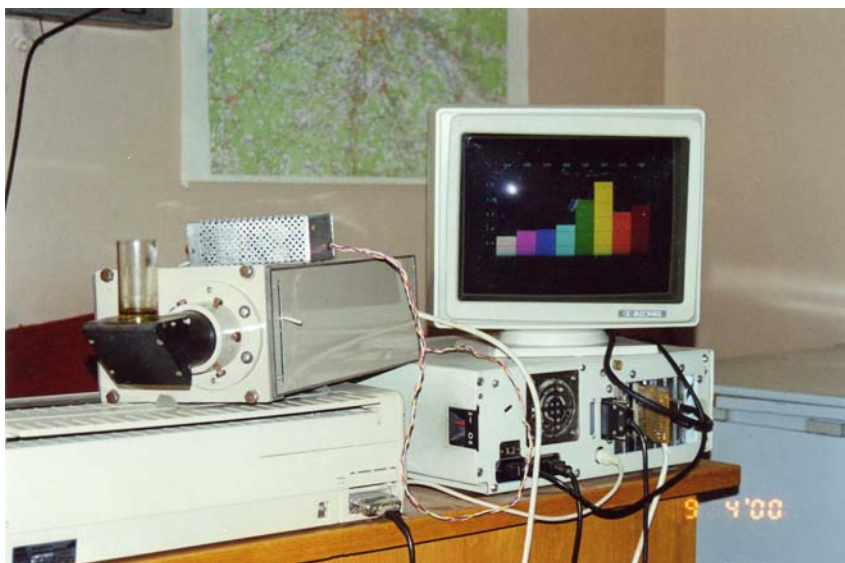


Рис.3. Адаптивный идентификатор для изучения характеристик водной среды в лабораторных и полевых условиях в реальном масштабе времени.

Адаптивный идентификатор был испытан в экспедиционных условиях на НИС «Дмитрий Менделеев» в Японском море и Центральных районах Тихого океана, а также при обследовании водных систем Южного Вьетнама и Сибири (о. Байкал, реки Ангара и Енисей) в рамках программ международного сотрудничества с Вьетнамским Научным Центром естественных наук и технологий, а также с рядом университетов США. Эти эксперименты показали перспективность применения технологии спектроскопии для оперативного контроля сточных вод, водных растворов в медицинской промышленности и изучения экосистем водоемов (пятнистость загрязнений поверхности водоемов, биомасса фитопланктона, мутность водной среды, содержание взвешенных веществ и др.). Поэтому спектроэллипсометр может быть успешно использован для контроля вод рек, впадающих в Азовское море, а также для оценки качества морской воды в зонах возможного загрязнения.

Традиционно оптические методы исследования жидкостей являются одними из наиболее информативных. В частности, поляризационно-оптические спектральные измерения позволяют решить широкий круг сложных задач экологического мониторинга водных сред. Задача определения концентрации различных веществ в многокомпонентных растворах по спектрам оптического пропускания и отражения, линейного и циркулярного двулучепреломления и дихроизма и по спектрам нарушенного полного внутреннего отражения успешно решается только с помощью развитого программного обеспечения.

Одним из перспективных направлений анализа растворов является жидкостная хроматография с прецизионными поляризметрическими устройствами. Следует отметить определенные трудности при создании компактных многоканальных поляризационно-оптических приборов. Как правило, ключевым элементом поля-

ризациянно- оптический прибор является модулятор состояния поляризации излучения. Это либо вращающийся поляризационный элемент (поляризатор, анализатор или компенсатор), ограничивающий частоту модуляции и значительно повышающий уровень помех, либо дорогостоящий фотоупругий модулятор, требующий совершенной термостабилизации. Используются в основном ПЗС линейки и матрицы фотодетекторов, имеющие недостаточно высокие фотометрические характеристики: малый динамический диапазон, недостаточная линейность, отсутствие доступа к отдельным пикселям, последовательное считывание фотоприемных элементов, приводящее к неэквивалентности измерительных промежутков на всех фотоприемниках.

Создание адаптивного идентификатора оказалось возможным благодаря развитию нового подхода в области поляризационной оптики. Разработаны эффективная элементная база поляризационной оптики, метод дискретной модуляции состояния поляризации, и на их основе созданы высокоточные поляризационно-оптические приборы различного назначения. Применение простых высокоэффективных переключателей поляризации и линеек кремниевых фотодиодов с производным доступом к фотодиодам существенно упростило задачу создания компактных недорогих поляризационно-оптических приборов: спектрофотометров, спектрополяриметров, спектроэллипсометров и т.д.

Технология совместного использования спектрометрии и алгоритмов идентификации и распознавания позволило впервые создать типовой цельный комплекс аппаратных, алгоритмических, модульных и программных средств сбора и обработки данных о водной среде с функциями прогноза и принятия решений. Адаптивный идентификатор имеет ряд модификаций, ориентированных на использование в различных условиях. Стационарный вариант охватывает полный комплект технических и алгоритмических средств, обеспечивающих проведение измерений в реальном масштабе времени. Использование этого варианта возможно при наличии сетевого питания 220 в. Полевой переносной вариант адаптивного идентификатора предусматривает два режима использования. При наличии компьютера Note-book в полевых условиях (при отсутствии сетевого питания) весь функциональный спектр адаптивного идентификатора реализуется в режиме реального времени. В противном случае результаты измерений запоминаются в блоке автономной памяти, а затем вводятся в компьютер и обрабатываются.

Алгоритмическое обеспечение адаптивного идентификатора основано на комплексном использовании методов распознавания и классификации дискретных образов, формируемых на базе 512 спектров, регистрируемых за устанавливаемое оператором время. Обычно устанавливается интервал в 1 сек., который обеспечивает получение около 60 отсчетов значений освещенности по каждому из 512 оптических каналов. Полученные спектры являются источниками рядов статистических параметров и различных характеристик, объединяемых в векторные пространства для последующего сопоставления с эталонными образцами, хранящимися в памяти компьютера. Технология этого сопоставления зависит от многообразия методов идентификации.

Адаптивный идентификатор рассчитан на обучение, которое представляет собой процедуру измерения спектральных характеристик и одновременное независимое измерение содержания химических элементов в водной среде. В результате в базе знаний формируется банк эталонов, сопоставление с которыми обеспечивает решение задачи идентификации. В частности, такое сопоставление может реализовываться в рамках расчета среднего квадратического отклонения изме-

ренного спектрального образа объекта от имеющихся в памяти компьютера эталонов. Программное обеспечение адаптивного идентификатора предусматривает различные алгоритмы решения этой задачи, среди которых имеется и кластерный анализ.

Адаптивный идентификатор может применяться в различных областях, где требуется оценить качество водного раствора или выявить присутствие в водной среде определенного набора химических элементов. Эти задачи адаптивный идентификатор решает в режиме непрерывного наблюдения за водной средой. Установленный для стационарного измерения он позволяет следить за динамикой качества воды в потоке, а при размещении на борту судна - измерять характеристики водного объекта по маршруту следования.

Функциональные возможности адаптивного идентификатора могут расширяться за счет увеличения объема эталонов в базе знаний. Переключение на естественный источник освещения позволяет решать задачи экспертизы земных покровов, обнаружения пленок нефтепродуктов на водной поверхности, определение степени загрязнения атмосферного воздуха и оценки состояния других объектов окружающей среды, спектральные образы которых в видимом диапазоне могут изменяться. Созданная за последнее время технология адаптивной идентификации элементов окружающей среды по данным спектральных измерений в видимом диапазоне позволяет перейти к синтезу экспертной системы для адаптивной идентификации параметров окружающей среды (ЭСАИПО). В структуру системы входят компактный многоканальный спектрополяриметр (КМС), информационный интерфейс с компьютером (ИИК), пакет компьютерных программ (ПКП) и расширяющаяся база данных (РБД). ПКП реализует ряд алгоритмов обработки потоков данных от КМС и обеспечивает сервисные функции визуализации и управления режимом измерений. РБД состоит из наборов эталонов спектральных образов пятен загрязнителей, изображаемых точками в многомерном векторном пространстве признаков, предварительно рассчитанных на основе обучающих выборок.

Принцип функционирования ЭСАИПО основан на фиксации изменений светового потока на выходе КМС и преобразование их в цифровой код. Дальнейшая обработка этих данных по своей эффективности определяется составом ПКП, куда включены различные алгоритмы распознавания двумерных образов. Адаптивность процедуры распознавания определяется уровнем накопления знаний об особенностях флуктуации интенсивности и поляризационных качеств отраженного света от водной поверхности. В состав ПКП входят средства, позволяющие в случае неопределенности ситуации с идентификацией пятна загрязнителя принимать экспертное решение на основе визуального анализа его спектрального образа. Эта процедура реализуется в режиме диалога с ЭСАИПО и если решение принято, то оператор может фиксировать его в базе данных в форме эталона для последующих ситуаций возникновения аналогичных пятен.

После обучения функционирование экспертной системы ограничивается только количеством измерений, фиксируемого оператором исходя из соображений достижимости статистической достоверности и сохранения режима реального времени. Оператор имеет две возможности регулировать этот режим, устанавливая объем измерений или фиксируя время их накопления. Оператор связывается с различными блоками ЭСАИПО через человеко-машинный интерфейс ИИК, который обеспечивает селективность управления операциями всех блоков.



Таким образом, применение спектроэллипсометрической технологии и разработанных на ее основе систем для контроля водной среды дает возможность быстро, практически в реальном масштабе времени, решать широкий круг задач оперативного мониторинга водных растворов как искусственного, так и природного происхождения. При этом измерительная часть ЭСАИПО может монтироваться стационарно и пользователь будет получать непрерывный поток данных о состоянии водной среды. Это особенно важно при необходимости инспекции особо опасных химических предприятий.

В табл. 2 приведен фрагмент результатов идентификации однокомпонентных растворов.

Таблица 2.

### Результаты идентификации водных растворов.

Раствор	Вектора-идентификаторы спектрального образа раствора									Погрешность идентификации (%)
CuSO <sub>4</sub>	21,6	0,17	0,1	143	0,67	0,12	2	0,16	0,21	8
	43,1	0,89	0,04	201	0,59	0,09	3	0,65	0,01	
Zn	4,6	0,14	0,07	89	0,56	0,22	1	0,1	0,06	3
	328,1	0,87	0,84	65	0,92	0,15	3	0,84	0,82	
Сахар	76,4	0,09	0,01	234	0,55	0,04	1	0,02	0,03	5
	89,7	0,13	0,03	187	0,63	0,09	1	0,01	0,01	

### Волоконно-оптические информационно-измерительные системы

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН на основе нано-технологий разрабатываются устройства и информационно-измерительные системы нового поколения, основанные на последних достижениях волоконно-оптической техники [1,12]. Научные основы их создания базируются на результатах фундаментальных исследований в области физики распространения света в опто-волоконных структурах. Используются особенности распространения света в диэлектрических средах и прохождения им границ раздела сред с различными свойствами с учетом явлений хроматической дисперсии, интерференции и дифракции световых волн. Многообразие достижений в области волоконной оптики позволяет реализовать их в виде волоконно-оптических систем передачи информации, датчиков физических величин и т.д.

Структура типовой волоконно-оптической системы передачи информации включает кодер, оптический излучатель, оптическое волокно, фотоприемник, декодер и преобразователь сигналов. Если передача оптических сигналов осуще-

ствляется в цифровом виде, то используется кодер, в котором осуществляется избыточное кодирование для обеспечения требуемой помехоустойчивости, удобств синхронизации приемных устройств и контроля исправности регенераторов. Далее электрическим сигналом осуществляется модуляция оптического излучения, генерируемого лазером или светодиодом. Это излучение вводится в оптическое волокно и далее оптический сигнал передается к удаленному приемнику, где он преобразуется в электрический сигнал и приобретает необходимую для потребителя информации форму. На пути распространения оптический сигнал преодолевает границы разветвителей, ответвителей и соединителей, которые осуществляют пространственное разделение оптического сигнала.

Современные достижения в области волоконно-оптических технологий позволяют реализовать ГИМС-технологии с использованием датчиков физических величин, созданных на принципиально новых принципах и обладающих возможностями передачи и обработки информации без ее потерь. На основе развитой теории создан ряд новых датчиков и измерительных систем:

- *Микрорезонаторный волоконно-оптический датчик магнитных полей.* Датчик основан на применении магнитосилового эффекта, возникающего при взаимодействии измеряемого магнитного поля с микрорезонатором, что обуславливает изменение его характеристик и, следовательно, изменение резонансной частоты в системе волоконно-оптический лазер – микромеханический резонатор (ВОЛ-МР). Техническое решение при создании данного датчика основано на том, что коллимирование луча, взаимодействующего с микромеханическим резонатором (МР), осуществляется с помощью волоконного автоколлиматора, а изменение параметров измеряемого магнитного поля сопряжено с изменением характеристик МР, приводящих к изменению резонансной частоты в системе ВОЛ-МР.

- *Многоканальная волоконно-оптическая измерительная система концентрации различных газов.* Система содержит источник излучения, разветвитель, который разделяет световой поток от источника излучения и направляет его в  $N$  измерительных каналов, каждый из которых содержит микрорезонатор, фотоприемник и блок обработки сигнала. Источник излучения представляет собой полупроводниковый лазер накачки. В качестве разветвителя использован многомодовый волоконный разветвитель, входной торец которого оптически связан с полупроводниковым лазером накачки, а  $N$  свободных торцов сопряжены с  $N$  измерительными каналами, каждый из которых дополнительно содержит отрезок активного одномодового световода с зеркалом на основе Брегговской решетки и представляет собой волоконный лазер.

Система работает следующим образом. Накачка волоконных лазеров осуществляется полупроводниковым лазером, излучение которого с помощью волоконного разветвителя направляется в соответствующие отрезки активных световодов. В условиях непрерывной накачки одновременно могут возбуждаться автоколебания различных пар микрорезонаторов. При этом выходной сигнал фотоприемника содержит гармонические составляющие на разностных частотах, соответствующих колебаниям  $N$  пар микрорезонаторов, тем самым осуществляется частотное мультиплексирование микрорезонаторных волоконно-оптических датчиков концентрации газов, обладающих высокой чувствительностью и точностью. Определение концентрации газа осуществляется блоком обработки сигналов с учетом площади сорбента, коэффициента диффузии газа и массы газа ( $m_r$ ), поглощенной пленкой с сорбентом и определяемой по формуле  $\Delta F = -0,5fm_r m^{-1}$  где  $f$  – собственная частота микрорезонатора.

• *Мультиплексная система автогенераторных микрорезонаторных волоконно-оптических датчиков физических величин.* Данная система включает: полупроводниковый лазер накачки; высокоэффективный эрбиевый волоконный лазер (ЭВЛ); многомодовый разветвитель, входной торец которого связан с полупроводниковым лазером, а другие торцы сопряжены с соответствующими резонаторами ЭВЛ; дихроические зеркала, отражающие излучение на линии генерации лазера и пропускающие на длине волны полупроводникового лазера накачки (0,98 мкм); волоконные автоколлиматоры; микрорезонаторы, резонансные частоты которых чувствительны к соответствующей физической величине (температуре, давлению, ускорению и т.д.); отражающие поверхности микрорезонаторов; фотоприемник; блок обработки сигналов и отрезок активного одномодового световода, легированного, например,  $\text{Yb}^{+3}$ - $\text{Er}^{+3}$  с  $\lambda=1,55$  мкм.

В условиях непрерывной накачки в данной системе одновременно возбуждаются автоколебания различных микрорезонаторов, при этом выходной сигнал фотоприемника содержит гармонические составляющие на разных частотах, соответствующих колебанию МР в каждом измерительном канале. Таким образом, осуществляется частотное мультиплексирование микрорезонаторных датчиков физических величин, обладающих высокой чувствительностью и точностью измерений, быстродействием, высоким КПД и расширенными функциональными возможностями.

### **Технология диагностики системы "атмосфера-море"**

Азовское море находится в зоне интенсивной хозяйственной деятельности, и его акватория используется для перевозки различных грузов, в том числе экологически опасных. Хотя в среднем уровень волнения свыше 2 баллов встречается редко, все же в течение года бывают штормовые периоды, когда сила ветра достигает 20-24 м/с. Повторяемость 4-5 балльных волнений составляет 8-16%. Но волнения силой в 6 баллов и свыше все же нечасты. Их повторяемость не превышает 1-5%. В Азовском море высота волны не превышает 3 м, а длина 26 м. Относительно малая длина и большая крутизна волн создают для маломерных судов неприятную и даже опасную качку. Максимальная сила давления волн на вертикальную стенку в Азовском море около 2 т на квадратный метр. Сила же удара волны значительно выше и может быть весьма разрушительной. Достаточно упомянуть ряд аварий морских судов, таких как танкеры «Волгонефть-123» и «Волгонефть-139», сухогрузы «Вольногорск», «Ковель», «Хачь Измаил» и «Нахичевань», потерпевшие крушение из-за сильного шторма в Керченском проливе 11 ноября 2007 г., в результате чего в море попало почти 1300 тонн мазута и около 6800 тонн серы. Поэтому организация системы мониторинга с функциями раннего предупреждения о зарождении шторма для зоны Азовского моря столь же актуальна, как и для тропических районов Мирового океана, где штормы и ураганы являются неотъемлемой частью процессов динамики системы «атмосфера-океан».

Изучение состояния системы "атмосфера-море" (САМ) важно для понимания изменений климата в региональном масштабе и оценки последствий антропогенного воздействия на эти изменения. Среди общих проблем, связанных с измене-

ниями климата, выделяется широкий круг задач инвентаризации чрезвычайных ситуаций в окружающей среде и их предсказание. Наиболее важными и менее всего прогнозируемыми среди них являются морские штормы, интенсивность и частота которых в последние десятилетия повсеместно возрастают, принося значительные экономические потери и человеческие жертвы. Сильные штормы формируются как правило одновременно в Черном и Азовском морях. Масштабность ущербов от штормов определяется многими факторами, среди которых важным является взаимное географическое расположение штормовых зон и доступных для них участков суши.

Если для диагностики системы «атмосфера-океан» (CAO) создана глобальная система мониторинга, а координация и анализ информационных потоков в этой системе осуществляется сетью 10 центров наблюдения за тропическими циклонами, размещенными в различных регионах земного шара и управляемых Национальным Центром Ураганов США ( National Hurricane Center), то в зоне Азовского и Черного морей такая система отсутствует. И хотя по оценкам многих экспертов эффективность этих центров невысока, так как оправдываемость их прогнозов возникновения тропических ураганов не превышает 35%.

Основная трудность в получении высоких показателей при прогнозировании штормов или тропических ураганов заключается в том, что в САМ или CAO определяющими являются нестационарные процессы, применение к анализу которых статистических методов оказывается неэффективным. Имеющиеся климатические модели и модели различных процессов в САМ и CAO содержат высокий уровень шума, выделение полезного сигнала, на уровне которого требует разработки новых нестандартных алгоритмов обработки данных мониторинга, свободных от требований стационарности и ориентированных на параметризацию эволюционных механизмов взаимодействия элементов в САМ и CAO.

Рассмотрим кубическую решетку  $\Xi_d = \{\Xi_{i_1, \dots, i_d}\}$  размерности  $d$  со стороной  $h$  в фазовом пространстве метеорологических параметров, перечисленных в табл. 3. Для глобальной системы мониторинга CAO поток данных от системы TAO/TRITON&PIRATA не ограничен во времени и характеризуется поступлением данных  $\bar{x} = \{x_i; i = 1, \dots, 10\}$  с интервалом в один час. Будем считать, что для САМ аналогичные данные могут быть получены на регулярной основе. Выберем ограниченный интервал  $T$  времени мониторинга, характеризуемый набором последовательных моментов  $\{t_j; j=1, \dots, N\}$  поступления данных о состоянии метеорологической обстановки в заранее выбранном секторе САМ. С течением времени будем закрашивать ячейки  $\Xi_{i_1, \dots, i_d}$ , в которые попадает точка  $\{x_1^*(t_j), \dots, x_d^*(t_j)\}$ , где  $x_i^*(t_j)$  - измеренная величина  $i$ -го параметра в момент времени  $t_j \in T$ . Следуя теории перколяции [10], будем формировать кластеры, объединяя смежные контактирующие окрашенные ячейки в единую цепочку и оценивая долю крашенных ячеек  $\lambda$  и относительный объем кластерного пространства  $\mu$ , а также распределение кластеров по размерам [5,6,10].

**Перечень параметров, необходимых для диагностики САМ  
с целью обнаружения момента зарождения шторма.**

Метеорологический параметр	Обозначение в модели
Температура поверхности океана, °С	$x_1$
Скорость (м/с) и направление ветра (в градусах по часовой стрелке от северного направления)	$x_2, x_3$
Осадки (мм\ч)	$x_4$
Плотность воды ( кг/М <sup>3</sup> )	$x_5$
Глубина изотермы 20°С	$x_6$
Температура воды на фиксированных глубинах $\{h_i\}$ , °С	$x_7(h_i)$
Относительная влажность атмосферного воздуха, %	$x_8$
Атмосферное давление, атм.	$x_9$
Температура атмосферы	$x_{10}$
Соленость морской воды, ‰	$x_{11}$

Структура кластерного пространства зависит от интервала  $T$ , выбор которого определяется содержанием конкретной задачи. При непрерывном режиме мониторинга ограниченной акватории моря следует ожидать формирование устойчивой структуры кластерного пространства с выходом параметров  $\lambda$  и  $\mu$  на асимптотические уровни. При этом характер процесса такого перехода будет отражать изменчивость фазового пространства САМ. Следовательно, рассчитав характеристики кластерного пространства в различных условиях функционирования САМ можно построить решающее правило для оценки момента наступления фазового перехода в динамике САМ. Другими словами, эмпирическая оценка критических порогов  $\lambda^*$  и  $\mu^*$ , а также расчет распределения размеров кластеров в момент фазового перехода САМ позволяет определить момент времени, когда в системе возникает нарушение фонового поведения. В рассматриваемом здесь случае приближение характерных параметров САМ к критическим значениям будет соответствовать приближению момента зарождения шторма.

Согласно [6,10] средний размер кластера  $S$  (число окрашенных ячеек) и корреляционная длина  $\xi$  (линейный размер кластера) хорошо аппроксимируются зависимостями:

$$S(\lambda) \approx |\lambda - \lambda^*|^{-\gamma}, \quad \xi(\lambda) \approx |\lambda - \lambda^*|^{-\nu},$$

где параметры  $\gamma$  и  $\nu$  зависят от размерности пространства  $d$  и в конкретном случае определяются эмпирически. Функции  $S$  и  $\xi$  при приближении момента зарождения шторма начинают резко возрастать. Какая из этих функций является более универсальной определяется компьютерным моделированием различных ситуаций, охватывающих временные интервалы при отсутствии и наличии штормов.

Использование данных системы мониторинга в режиме текущего времени с использованием перколяционной модели эквивалентно схеме блуждания точки  $\{x_i\}$

по ячейкам  $\Xi_d$ . Для наглядности рассмотрим случай  $d=2$  (плоскость  $x_9, x_2$ ). Случайные блуждания точки  $\{x_i\}$  по  $\Xi_2(x_9, x_2)$  подчинены направленному воздействию сменяющейся метеорологической обстановки, характеризующейся переходом от фонового уровня к ситуации, когда возник сильный шторм. Реально при наличии на интервале времени  $T$  периода действия шторма точка  $\{x_9, x_2\}$  осуществляет двойной перколяционный переход по некоторому направлению  $\eta$  между зонами  $\Xi_2^1$  и  $\Xi_2^3$ . Анализ движения точки  $\{x_9, x_2\}$  связан с оценкой вероятностных характеристик смещения ее проекции на направление  $\eta$ . Отклонение этой проекции от некоторой начальной точки отсчета  $A$ , выбранной, например, так, чтобы ее координата  $x_2$  была максимальной, а координата  $x_9$  минимальной, представляет собой сумму  $\Sigma$ , случайного числа случайных слагаемых. Распределение нормированных моментов  $\tau = \sqrt{E\nu}$  первого вхождения точки  $A$  в  $\Xi_2^2$  описывается функцией распределения Вальда [6,10,18].

После большого числа шагов  $t$  блуждания точки  $A$  при отсутствии критических переходов среднее число  $N_t$  закрашенных квадратов будет равно:

$$\langle N_t \rangle = t^{\frac{-\theta}{2}},$$

где параметр  $\theta \in [1.29-2.84]$  оценивается в каждом конкретном случае по результатам моделирования.

Чтобы формализовать процедуру обнаружения момента перехода САМ между фазовыми состояниями определим уровень нестабильности окружающей природной среды с помощью интегрального индикатора:

$$I_m(t) = \frac{1}{N+s} \sum_{j=m}^{m+N} \sum_{i=1}^s \alpha_i(t_j)$$

где  $N$  - длина выборки (временного интервала), по объему которой осуществляется усреднение значений параметров;  $m$  - момент начала регистрации выборки;  $s$  - количество измеряемых параметров САМ;

$$\alpha_i(t_j) = \begin{cases} 1 & \text{если } \Delta x_i(t_j) \cdot \Delta x_i(t_{j-1}) \leq 0; \\ 0 & \text{если } \Delta x_i(t_j) \cdot \Delta x_i(t_{j-1}) > 0 \end{cases}$$

где  $\Delta x_i = \bar{x}_i - x_i$ ;  $\bar{x}_i(N) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_i(t_j)$ .

Индикатор нестабильности САМ  $I_m(t)$  является показателем изменчивости текущего среднего значения вектора  $\{x_i\}$ . На рис. 4 приведен расчет этого индикатора для шторма 11 ноября 2007 г. Видно, что с приближением момента зарождения шторма нестабильность окружающей среды нарастает, достигая максимального уровня в момент, когда шторм уже бушевал. При этом четко выделяются три области значений  $I_m(t)$ :

1) область фоновых характеристик, когда вариация параметров САМ за ограниченный промежуток времени изменяется в пределах статистически устойчивого диапазона;

2) область неопределенности, где вероятность возникновения шторма превышает уровень 0.5, а скорость нарастания неустойчивости начинает нарастать;

3) область действия шторма, где скорость изменения среднего всех параметров  $\{x_i\}$  достигает максимальных значений.

Фазовому переходу САМ соответствует участок резкого нарастания производной  $I_m(t)$ . Следовательно, слежение за метеорологической обстановкой и синхронный расчет индикатора неустойчивости с его сопоставлением со структурой кластерного пространства позволяет обнаружить момент фазового перехода САМ от фонового состояния к возникновению шторма. Для полной формализации этой процедуры необходимо проведение модельных расчетов для набора ситуаций возникновения штормов различной мощности с построением соответствующей решающей процедуры. Как следует из рис. 4 применение описанной процедуры позволило бы обнаружить момент возникновения шторма, по крайней мере, за 31 час до его развития.

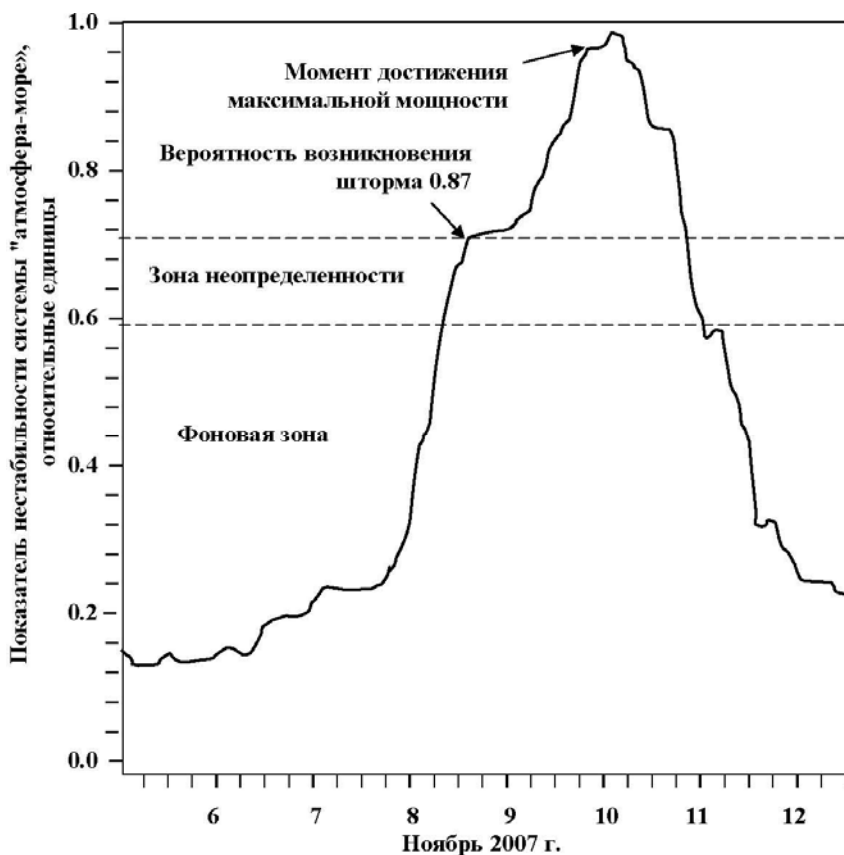


Рис. 4. Пример расчета индикатора неустойчивости САМ в период прохождения мощного урагана в Крыму и шторма на Азовском море.

Таким образом, можно сделать выводы:

1. Применение перколяционной модели позволяет обнаружить момент перехода САМ из одного фазового состояния (фон) в другое состояние (шторм).
2. Введенный индикатор нестабильности позволяет уточнить время зарождения шторма до его мощного развития.
3. Для дальнейшего развития предложенной процедуры раннего обнаружения штормов необходимо:
  - а) Применить методы последовательного анализа для расчета вероятности перехода САМ между фазовыми состояниями.
  - б) Рассчитать весовые коэффициенты для различных характеристик САМ при расчете индикатора ее нестабильности.

### **ГИМС-технология и морская навигация**

Одной из сфер перспективного применения ГИМС-технологии является морская навигация, где управление физической системой «корабль-море» связано с решением многих задач измерения и идентификации в оперативном режиме характеристик окружающей среды [17]. Среди наиболее надежных и оперативных способов контроля и управления физической системой «корабль-море» является дистанционный гидрофизический эксперимент.

Движение судна по находящейся в динамике поверхности моря описывается теорией автоматического управления, уравнения которой дополняются гидрофизическими соотношениями, отражающими взаимосвязь характеристик движения судна с характеристиками течений и турбулентных потоков в море. Совокупность уравнений динамики системы «корабль-море» содержит ряд параметров, от определения количественных оценок которых зависит состояние этой системы. Развитые в экспериментальной гидрофизике методы получения этих оценок в большинстве случаев дают усредненные по времени и пространству величины, что не соответствует требованию оперативности и не дает возможности в полной мере иметь комплектную совокупность данных для управления судном в реальном времени, например, путем их реализации в виде автопилота. Особенно это критично в зонах морских портов, где расчет безопасных условий нахождения судна должен быть оперативным.

Методы дистанционного мониторинга морской поверхности в совокупности с алгоритмами обработки данных обладают свойством оперативности. Развитие этих методов применительно к задачам морской навигации является одной из задач экоиформатики. При этом получение исходной информации для расчета курса и скорости судна по совокупности данных от навигационного оборудования и данных дистанционного зондирования рассматривается как задача экспериментальной экоиформатики, решение которой обеспечивается выбором наиболее надежных источников информации и рациональными методами ее обработки.

#### *Физические факторы воздействия моря на судно*

Схема рис. 5 поясняет взаимосвязь между физическими факторами в системе «корабль-море». Согласно этой схеме период и частота столкновения между кораблем и волнами рассчитывается по следующим соотношениям:

$$T_e = L_{\omega} / [V_{\omega} - V \cos \chi], \quad \omega_l = 2\pi [V_{\omega} - V \cos \chi] / L_{\omega}, \quad (1)$$



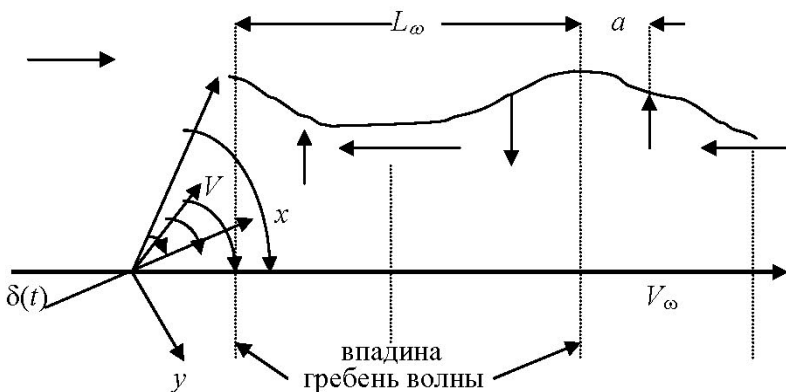


Рис. 5. Диаграмма взаимодействия физических факторов в системе «корабль-море».

где  $T_e$  – период столкновения корабля с волновыми компонентами,  $\omega_l$  – угловая частота столкновения ( $=2\pi/T_l$ ),  $L_\omega$  – длина волны,  $V$  – скорость корабля,  $V_\omega$  – скорость волны,  $\chi$  – угол между вектором скорости корабля и направлением распространения волн.

Из рис. 5 и уравнения (1) следует, что если в море волна движется за кормой корабля ( $90^\circ < \chi < 270^\circ$ ,  $\cos\chi < 0$ ), то частота столкновений выше, чем в других случаях ( $0^\circ \leq \chi \leq 90^\circ$ ,  $270^\circ \leq \chi \leq 360^\circ$ ). Движение корабля впереди волны может сопровождаться малыми величинами  $V_\omega - V\cos\chi$  и, следовательно, частота столкновений также будет низкой в отличие от других ситуаций. Значит физические факторы динамики системы «корабль-море» существенно различны в двух зонах изменения угла  $\chi$ . От знания этих факторов зависит степень точности управления кораблем, так как своевременная нейтрализация случайных рысканий судна сокращает и энергетические затраты и уменьшает опасность непредвиденного перемещения судна.

В случае закормовой волны, как видно из (1), имеются три ситуации: а)  $V_\omega > V\cos\chi$  – догоняющая волна, б)  $V_\omega = V\cos\chi$  – полустатическая ситуация и в)  $V_\omega < V\cos\chi$  – убегающая волна. В случае (а) волны догоняют корабль, и частота столкновений является низкой. В ситуации (б) частота столкновений между кораблем и волнами близка к нулю, а если корабль находится в момент времени  $t=0$  в равновесном состоянии по отношению к волнам, то это состояние сохранится и в любой другой момент  $t=t_1$ . Вариант (в) соответствует ситуации, когда частота столкновений, как и в случае (а) может быть низкой, но противоположной по знаку, а корабль будет догонять волну. В этом случае для наблюдателей с корабля и с суши создается неоднозначная картина сочетания колебательных движений моря по отношению к курсу корабля.

Для движущейся впереди корабля морской волны и при условиях (а) и (в), но не при условии (б), колебание, возбуждающее силы, и отклонение от курса, возбуждающее движения, действующие на корабль, являются осциллирующими во времени. Это очевидно, если рассматривать круговые скорости волн. Когда кораблю расположен так, что его корма на гребне волны и нос над впадиной, то орбитальные скорости волн вызывают дестабилизирующий отклоняющий момент

в движении корабля, если углы  $\chi$  и  $\beta$  не точно равны нулю ( $\beta$ -угол между курсом корабля и вектором его скорости). Когда корабль оказывается в положении с его кормой над впадиной и носом на гребне волны, то момент рыскания, вызванный волнами, является стабилизирующим моментом, стремящимся вернуть корабль к его начальному положению. При условии (б) корабль не изменяет своего положения относительно волны во времени, так что возбуждающие силы и моменты также не изменяются.

Экспериментальные результаты, показывающие, что в условиях регулярного волнения кораблю с длиной 152,4 м ( $0,5 < L_w / L < 1,5$ ), отношением высота/длина = 1/48, при  $\chi = 30^\circ$  и  $60^\circ$ ,  $V = 9,3$  м/с находится в ситуации  $V_w > V \cos \chi$ . Наибольшие амплитуды рыскания были около 2,5 градуса. Амплитуда, как следует ожидать, будет возрастать линейно с волновым отношением высота/длина, тогда как частота изменяется интенсивно с квадратным корнем из  $L$ , а амплитуда столкновения возрастает с увеличением скорости судна, но уменьшается резко по мере того, как длина волны убывает. Результаты расчетов также показывают, что в случае догоняющей волны эффект руля по отношению столкновения относится к нормальной ситуации, а в случае убегающей волны важной является длина волны и если начальная скорость спокойной волны превосходит значение  $V/L = 0,84$ .

В практической навигации учет физических сил, вызывающих дрейф корабля, используется приближенная модель Матусевича:

$$\alpha = K_\alpha \left( \frac{W}{V} \right)^2 \sin q,$$

где  $K_\alpha$  - коэффициент дрейфа конкретного корабля,  $q$  - курсовой угол кажущегося ветра,  $W$  - скорость ветра. Коэффициент  $K_\alpha$  определяется экспериментально по формуле:

$$K_\alpha = \sum p_i K_{\alpha i} / \sum p_i,$$

где  $K_{\alpha i}$  - единичное значение коэффициента дрейфа, определяемое по углу дрейфа  $\alpha_i$  в данных конкретных условиях

$$K_{\alpha i} = \alpha_i \left( \frac{W}{V} \right)_i^{-2} \sin^{-1} q,$$

$p_i$  - вес частного угла дрейфа (определяется в зависимости от способа учета угла дрейфа).

Особое место в навигации занимают задачи управления судном при его подходе к порту и расчета сил, воздействующих на него при стоянке у причала. Решение этих задач требует изучения причин формирования волновой энергии. Последние связаны с различными источниками колебания водной массы, что вызывает многообразие физических воздействий морской среды на судно. Для решения возникающих задач привлекаются методы, основанные на уравнениях баланса волновой энергии. Известны такие классические принципы как принцип Юнга и принцип Гюйгенса-Френеля. Однако практически приемлемые решения дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа, возникающих здесь, имеют место при упрощенных предположениях о физическом

облике акватории порта. Поэтому поиск простых, но адекватных параметризаций физических процессов в системе «корабль-море-порт» остается актуальной задачей. Одним из приемлемых подходов является совмещение приближенных решений уравнений с оперативным определением их параметров и возможностью быстрой коррекции этих решений по результатам оценки невязки (расхождения) между измеренными и рассчитанными характеристиками системы.

Расчет характеристик морского волнения в зоне порта ведется с помощью методов диффузии амплитуды и баланса волновой энергии, энергетическим и другими методами. Согласно Крылову [7] возвышение  $\zeta(x,y,t)$  свободной поверхности моря можно описать соотношением:

$$\zeta(x,y,t)=a_0u(x,y)\text{ch}(kH)\exp(-i\omega t), \quad (2)$$

где  $k=2\pi/\lambda$  - волновое число,  $\lambda$  - длина набегающих волн,  $\omega$  - их частота,  $H$  – глубина моря,  $x$  и  $y$  – прямоугольные координаты,  $t$  – время. Для плоских прогрессивных волн, распространяющихся в направлении от  $x$  без наличия препятствий справедлива аппроксимация:

$$u(x,y)=A(x,y)\exp(ikx) \quad (3)$$

и параметр  $a_0$  в (2) является амплитудой волны. Функция (3) удовлетворяет уравнению:

$$\Delta u + k^2 u = 0, \quad (4)$$

где  $\Delta$  - оператор Лапласа, а безразмерная комплексная амплитуда волны  $A(x,y)$  находится из уравнения:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{i}{2k} \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Введение функции  $A(x,y)$  позволяет определить коэффициент дифракции волны:

$$K_d = |A(x,y)| \quad (6)$$

Следуя принципу Юнга, т.е. полагая  $\partial^2 A / \partial x^2 \gg \partial^2 A / \partial y^2$ , и переходя к полярным координатам, получим:

$$\frac{\partial A}{\partial r} = \frac{i}{2k} \frac{\partial^2 A}{\partial l^2} - \frac{A}{2r}, \quad (7)$$

где  $l=r\theta$ , а отношение  $A/(2r)$  отражает кривизну волнового фронта.

В зоне порта имеет место сейшевое колебание, возникающее за счет проникновения в порт низкочастотных колебаний из открытого моря. Это колебание вызывает очень опасное явление тягуна с воздействием на судно, часто приводящему к неприятным последствиям. Периоды тягуноопасных колебаний находятся в пределах 0,5-4 мин с амплитудой горизонтальных колебаний до 4м. Развита теория формирования низкочастотных колебаний говорит о том, что в море при определенных еще недостаточно исследованных условиях развиваются одновременно две системы ветровых волн: резонансная с фазовой скоростью, равной

скорости ветра, и дорезонансная с меньшей монотонно возрастающей фазовой скоростью. В энергетическом спектре ветрового волнения этим системам соответствуют два максимума. Возникновение такой ситуации возможно при длительном сильном устойчивом ветре, дующем над обширной акваторией (линейные размеры порядка 100 км). Для расчета высоты низкочастотных колебаний в прибрежной зоне с глубиной  $H$  применяется формула:

$$h_{н.ч.} = 2\pi^{3/2} \frac{h^2}{g\tau^2} f_2 \left( \frac{H}{g\tau^2} \right), \quad (8)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – высота ветровой волны,  $\tau$  – период ветровой волны. Функция  $f_2$  определяется эмпирически.

Крыловым и др. (1976) предложена также физическая модель функциональной связи между элементами низкочастотных колебаний и ветровых волн:

$$h_{н.ч.} = \alpha \frac{h^2}{g\tau^2} \Psi \left( \frac{H}{g\tau^2} \right), \quad \tau_{н.ч.} = \beta\tau, \quad (9)$$

где эмпирическая функция определяется на основе измерений. При  $H/(g\tau^2) \rightarrow \infty$   $\Psi \rightarrow 1$ , для  $\tau_{н.ч.} = 62$  с и  $\beta = 10^\circ$  имеем  $\tau = 6,2$  с; если  $\alpha = 11,5$ , то  $\Psi = 0,16c^{-1}$ . Подобные измерения следует провести в каждом бассейне и иметь глобальную базу данных.

Физическое воздействие колебаний моря на судно проявляется в виде его поперечно-горизонтальной качки с амплитудой колебаний центра масс судна:

$$A_\eta = \kappa_\eta a = 0,5h\kappa_\eta \operatorname{ch}[2\pi(H-z)/\lambda] / \operatorname{sh}[2\pi H/\lambda],$$

где  $a$  – амплитуда поперечно-горизонтальных колебаний частиц воды на уровне центра массы судна,  $H$  – глубина моря,  $z$  – возвышение центра масс судна над ватерлинией,  $\kappa_\eta$  – редуцированный коэффициент поперечно-горизонтальной качки,  $h$  – и  $\lambda$  – высота и длина гармонической волны соответственно.

*Стохастическая модель взаимодействия физических факторов в задаче навигации*

Движение корабля по морской поверхности определяется указанными выше физическими факторами, а также множеством других обстоятельств: отклонениями магнитного поля Земли, ошибками навигационных приборов, неточностями в измерениях дальности от маяков и т.п. Суммируя все причины возможного отклонения судна от курса рассмотрим следующую модель. Пусть на плоскости  $\varphi O \lambda$  из начала координат  $O$  в момент времени  $t=0$  выходит корабль. Его движение подчинено следующему закону: перемещение по оси  $\varphi$  подвержено регулярному воздействию, смещающему корабль за единицу времени на  $\Delta\varphi \geq 0$ , в перемещение по оси  $\lambda$  подвержено случайному воздействию. Как результат в момент  $t=T$  корабль окажется в точке с координатами  $(\varphi_T, \eta)$ . Но конечная цель корабля попасть в положение  $(\varphi_T, 0)$ , т.е. не отклоняться от курса. При этом, не теряя общности, можно считать, что ось  $\varphi$  соответствует оси  $t$ , и весь процесс заканчивается в момент  $T = \varphi_T / \Delta\varphi$ . Предположим, что смещение корабля по оси  $\lambda$  имеет нормальное распределение:

$$P(\Delta\eta < \Delta\lambda) = \Phi\left(\frac{a - \Delta\lambda}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\Delta\lambda} \exp\left\{-\frac{(a-z)^2}{2\sigma^2}\right\} dz,$$

где  $a$  – математическое ожидание,  $\sigma^2$  – дисперсия отклонения  $\Delta\eta$ .

Разобьем путь движения корабля на интервалы, которые он проходит за времена  $t_1, \dots, t_{n+1}$  ( $t_1 + \dots + t_{n+1} = T$ ) и пусть при  $t=0$   $a=0$ . Тогда в момент  $t_1$  корабль с вероятностью  $p$  будет иметь координату  $\eta_1$  ( $|\eta_1| \leq u_p \sigma \sqrt{t_1}$ ,  $u_p$  –  $p$ -квантиль нормального распределения). В этот момент закон изменения координаты корабля становится следующим:

$$P(\Delta\eta < \Delta\lambda) = \Phi\left(\frac{a_1 - \Delta\lambda}{\sigma}\right),$$

где  $a_1 = \eta_1 / (t_1 - T)$ .

Поскольку корабль обладает инерционностью и его маневренность ограничена, то  $|a| \leq h$ , где  $h$  – некоторая константа, в частности, равная тангенсу максимального допустимого угла поворота корабля. Задаваясь некоторой величиной вероятности  $p$ , имеем:

$$P\left\{|\eta_1| < u_p \sigma \sqrt{t_1}\right\} = p$$

Отсюда следует, что

$$u_p \sigma \sqrt{t_1} \leq h t_2^*,$$

где  $t_2^* = T - t_1$ . Значит при  $n=1$  для получения минимума дисперсии отклонения корабля от положения  $(\varphi_T, 0)$  в момент  $T$  необходимо предварительно произвести управление в момент:

$$t_1 = T + 0,5y^2 - y\sqrt{T + 0,25y^2}, \quad y = u_p \sigma / h$$

При этом в момент  $T$  корабль будет иметь положение  $\eta$  со средним значением  $E\eta = \eta_1 + E[(T - t_1)\Delta\eta] = \eta_1 - \eta_1(T - t_1)/(T - t_1) = 0$  и дисперсией  $D\eta = (T - t_1)\sigma^2$ .

Для любого числа моментов управления разобьем интервал регулируемых значений  $|a|$ , определяемый константой  $h$ , на частичные интервалы  $[h_i, h_{i+1}]$ . Тогда

$$u_p \sigma \sqrt{t_i} / [T - t_1 - \dots - t_i] \leq h_i - h_{i-1}, \quad (i = 1, \dots, n), \quad h_0 = 0, \quad h_n = h$$

Отсюда получаем:

$$D\eta = \sigma_n^2 = \sigma^2 t_{n+1} = \sigma^2 \left(T - \sum_{j=1}^n t_j\right)$$

Для определения оптимальных моментов регулирования  $\{t_i\}$  как функции  $T$  составим систему уравнений. Очевидно, что величина  $t_j$  не зависит от числа последующих регулирований, а полностью определяется разбиением интервала  $[0, h]$ .

Предположим, что моменты  $\{t_i\}$  определены и зафиксированы. Тогда имеем:

$$t_1 = T + 0,5y_1^2 - y_1\sqrt{T + 0,25y_1^2},$$

.....

$$t_{i+1} = T - T_i + r_i \left[ r_i - 2\sqrt{r_i^2 + T - T_i} \right],$$

где  $r_i = y_i / [2(h_{i+1} / h_i - 1)]$ ,  $y_i = u_p \sigma / h_i$  ( $i = 1, \dots, n-1$ );  $t_{n+1} = T - T_n$ ,  $T_i = t_1 + \dots + t_i$ .

В рассмотренном способе регулирования случайных отклонений курса корабля предусмотрен такой выбор среднего значения  $a$ , который обеспечивает после каждого регулирования попадание в среднем в наперед заданную позицию. Но можно рассмотреть и другой способ регулирования, при котором среднее значение  $a$  выбирается на каждом шаге регулирования так, чтобы судно приходило в положение с нулевой ординатой к следующему моменту регулирования.

Предположим  $h_i = h$ , т.е. рыскание судна не регулируется. Тогда естественно потребовать, чтобы корабль все время стремился к точке с нулевой ординатой, т.е. потребуем выполнения условия

$$u_p \sigma \sqrt{t_i} \leq h t_{i+1}, \quad (i = 1, \dots, n-1)$$

Отсюда следует:

$$t_{n-j} = \mu^s t_{n+1}^l, \quad s = 2(2^j - 1), \quad l = 2^j, \quad \mu = 1/y,$$

$$T = t_{n+1} + y^2 \sum_{j=1}^n (\mu^2 t_{n+1})^l$$

Эти уравнения полностью однозначно определяют разбиение интервала  $(0, T)$ .

Рассмотренный способ регулирования рысканий судна слишком жесткий и для его выполнения требуются высокоточные измерительные приборы. Поэтому рассмотрим другой способ регулирования случайной компоненты реального процесса движения, когда моменты регулирования выбираются в зависимости от распределения моментов выхода показателя стабильности движения корабля из некоторой  $\varepsilon$ -полосы. В самом деле, если корабль вышел в момент  $t=0$  из начала координат с параметрами курса  $(0, \sigma^2)$ , то он достигнет в момент  $T$  некоторой точки  $(T, \eta)$  с  $E\eta=0$  и  $D\eta = T\sigma^2$ . Естественно, если производить регулирование движения судна путем изменения параметра  $a$  в моменты выхода судна из  $\varepsilon$ -полосы по отношению к курсу, то число моментов регулирования на прямой  $t$  будет меньше, чем в предыдущем случае, а максимальное отклонение от курса не будет превышать  $\varepsilon$ .

Как и прежде предположим, что за единицу времени корабль перемещается регулярно на  $\Delta\eta$  по оси  $\lambda$ , где  $\Delta\eta$  распределено нормально с параметрами  $(a, \sigma^2)$ . Нормированные моменты  $\tau=v/Ev$  ( $v$  - число выходов за пределы  $\varepsilon$  - полосы) распределены по закону Вальда.

### *Адаптивный регулятор физических факторов*

На движущийся или стоящий корабль действуют силы, формируемые совокупностью процессов в море, возникновение которых связано с ветром, температурными градиентами, изменениями плотности, гравитационными волнами и др. Траекторные задачи управления судном поэтому делятся на два класса. Одни задачи локального характера, когда требуется оперативный контроль за физическими процессами в системе «корабль-море», возникают в связи с необходимостью предотвращения сильной качки судна или уменьшения угла рыскания. В этой ситуации измерительная дистанционная система монтируется на борту судна. Другой класс глобальных задач связан с оценкой состояния моря на больших участках курса корабля с априорным информационным обеспечением его системы управления. Получение такой информации возможно со спутников, летающих лабораторий или береговых стационаров.

Задача состоит в построении регулятора, который, будучи установлен на корабле, в реальном времени на основе получаемой информации о состоянии моря или данных о метеопараметрах обеспечит оптимальное управление курсом корабля. Поскольку в процессе движения корабля происходит непрерывная смена параметров окружающей среды, то регулятор должен обладать адаптивностью с временем адаптации, меньшим промежутка между моментами изменения параметров. Другими словами, время адаптации  $\tau_a$  должно быть меньше интервала между измерениями, т.е. должно выполняться ограничение:

$$\tau_a \leq \max_i |t_i - t_{i-1}|$$

Здесь снова возникают две ситуации: (а) наличие полной информации и (б) неполная информация о параметрах системы «корабль-море».

Рассмотрим ситуацию, когда корабль должен пройти через область сильных течений. Величина и направление скорости течения задаются как функции фазовых переменных (географические координаты:  $\varphi$  - широта,  $\lambda$  - долгота):  $V_\varphi = V_\varphi(\varphi, \lambda)$  - компонента вектора скорости вдоль широты  $\varphi$ ,  $V_\lambda = V_\lambda(\varphi, \lambda)$  - тоже вдоль долготы. Задача состоит в нахождении такого управления, при котором корабль, двигаясь со скоростью  $v$ , за минимальное время преодолет расстояние между точками  $N$  и  $M$ . Уравнения движения корабля имеют вид:

$$d\varphi/dt = v\cos\psi + V_\varphi(\varphi, \lambda), \tag{10}$$

$$d\lambda/dt = v\sin\psi + V_\lambda(\varphi, \lambda),$$

где  $\psi$  - угол курса, т.е. угол между осью корабля и фиксированной координатной осью (например,  $\varphi$ ),  $(\varphi, \lambda)$  - координаты корабля в момент времени  $t$ .

В качестве критерия качества управления рассмотрим функционал:

$$\Phi(\varphi(T), T) = 0, L(\varphi, u, t) = 1 \tag{11}$$

т.е.  $J=T-t_0$ . В этом случае Гамильтониан системы (94) равен:

$$H=1+\mu_{\varphi}(v\cos\psi+V_{\varphi}(\varphi,\lambda))+\mu_{\lambda}(v\sin\psi+V_{\lambda}(\varphi,\lambda)) \quad (12)$$

Функционал (11) определяет требование, чтобы корабль достиг состояния  $\varphi(T)$  за минимальное время. Уравнения Эйлера-Лагранжа имеют вид:

$$\mu_{\varphi} = -\partial H / \partial \varphi = -\mu_{\varphi} \partial V_{\varphi}(\varphi,\lambda) / \partial \varphi - \mu_{\lambda} \partial V_{\lambda}(\varphi,\lambda) / \partial \varphi, \quad (13)$$

$$\mu_{\lambda} = -\partial H / \partial \lambda = -\mu_{\varphi} \partial V_{\varphi}(\varphi,\lambda) / \partial \lambda - \mu_{\lambda} \partial V_{\lambda}(\varphi,\lambda) / \partial \lambda,$$

Оптимальное управление курсом корабля (углом  $\psi$ ) есть точка стационарности гамильтониана (12):

$$\partial H / \partial \psi = v(-\mu_{\varphi}\sin\psi + \mu_{\lambda}\cos\psi) = 0$$

или

$$\operatorname{tg}\psi = \mu_{\varphi} / \mu_{\lambda} \quad (13)$$

Так как  $H$  явно не зависит от времени, то  $H = \text{const} = C_1$  для  $\forall t \in [t_0, T]$ , где  $C_1$  – первый интеграл системы. Поскольку мини-мизируется время, то постоянная  $C_1$  должна быть нулем (время окончания переходного процесса  $T$  не фиксировано).

Разрешаем уравнения (12) и (13):

$$\mu_{\varphi} = -\cos\psi / [v + V_{\varphi}\cos\psi + V_{\lambda}\sin\psi], \quad (14)$$

$$\mu_{\lambda} = -\sin\psi / [v + V_{\varphi}\cos\psi + V_{\lambda}\sin\psi]$$

Из (97) и (98) получаем:

$$\psi(t) = \sin^2 \psi \frac{\partial V_{\lambda}(\varphi, \lambda)}{\partial \varphi} + \sin \psi \cos \psi \left( \frac{\partial V_{\varphi}(\varphi, \lambda)}{\partial \varphi} - \frac{\partial V_{\lambda}(\varphi, \lambda)}{\partial \lambda} \right) - \cos^2 \psi \frac{\partial V_{\varphi}(\varphi, \lambda)}{\partial \lambda}$$

Итак, оптимальный курс определяется из этого уравнения с учетом (94). Такое управление носит название закона Цермело. Если  $V_{\varphi} = V_{\varphi}(\lambda)$  и  $V_{\lambda} = V_{\lambda}(\lambda)$ , то будем иметь:  $\mu_{\varphi} = \text{const}$ . Из (14) получаем:

$$\cos\psi / [v + V_{\varphi}\cos\psi + V_{\lambda}\sin\psi] = \text{const}$$

Таким образом, роль адаптивного регулятора состоит в уточнении параметров навигационной прокладки курса корабля. При этом выполняются следующие операции:

- измерение элементов счисления и навигационных параметров для определения места корабля;
- обработка и анализ измеренной навигационной информации с целью определения вероятнейшего значения искомым величин – места и элементов движения корабля;
- расчет невязок прогнозных и измеренных элементов курса корабля;
- принятие обоснованного критерием оценки невязок решения по корректуре элементов движения корабля;
- контроль вновь назначенных элементов движения корабля по приборам и наблюдениям;
- прогноз положения корабля на очередной интервал времени.



## Заключение

Создание ГИМС для мониторинга геозкосистемы Азовского моря позволит решить ряд важных социально-экологических и хозяйственных задач:

- Повышение достоверности и оперативности оценок состояния геозкосистемы в целом и отдельных ее регионов с получением рекомендаций по принятию решений об использовании доступных в регионе технологий по предотвращению чрезвычайных ситуаций и снижению от них ущерба.
- Снижение стоимости системы мониторинга геозкосистемы за счет оптимизации ее методического и технического оснащения при сохранении ее эффективности и информативности.
- Раннее обнаружение ситуаций возникновения чрезвычайных ситуаций на море с возможностью предотвращения бедствий с кораблями, перевозящими экологически опасные грузы (нефть, мазут, химикаты).
- Получение оценок возможных последствий различных антропогенных проектов до их реализации (построение плотин на реках, открытие новых производств в бассейне моря, построение новых и реконструкция старых портов, изменение интенсивности судоходства и т.д.).
- Расширение туристско-рекреационных зон с развитием лечебно-оздоровительных курортов и использованием природных лечебных ресурсов без ущерба для геозкосистемы.

## Литература

1. Верба В.С., Гуляев Ю.В., Шутко А.М., Крапивин В.Ф. (ред.) (2014). СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике. София: Академическое Изд-во им. Проф. Марина Дринова, 2014, 296 с.
2. Горстко А.Б. Математическая модель экосистемы Азовского моря. МГУ, Москва, Математика. Кибернетика, 1979, 60 с.
3. Горстко А.Б., Угольницкий Г.А. Введение в прикладной системный анализ. АО «Книга», 1996, Ростов-на-Дону, 132 с.
4. Ковалев В.И. Методы и приборы лазерной и спектральной эллипсометрии с бинарной модуляцией состояния поляризации. Докторская диссертация, ИРЭ им. В.А. Котельникова. РАН, 2011, 250 с.
5. Крапивин В.Ф., Потапов И.И., Солдатов В.Ю. Методы глобальной экоинформатики. Изд-во Твори, Винница, Украина, 2019. 383 с.
6. Крапивин В.Ф., Потапов И.И., Солдатов В.Ю. Природные катастрофы. Изд-во Твори, Винница, Украина, 2019. 383 с.
7. Крылов Ю.М. Спектральные методы для исследования и вычисления генерируемых ветром волн. Гидрометеиздат, Ленинград, 1986, 255 с.
8. Савиных В.П., Крапивин В.Ф., Потапов И.И. Информационные технологии в системах экологического мониторинга. М.: Геодекартиздат, 2007, 388 с.
9. Солдатов В.Ю., Крапивин В.Ф., Потапов И.И. Алгоритм принятия решения в задаче мониторинга гидрофизической системы на примере лагуны Ньок Нгот (Южный Вьетнам). Экономика природопользования, 2019, №1, с. 72-87.
10. Суков А.И., Солдатов В.Ю., Крапивин В.Ф., Потапов И.И. Диагностика системы «океан-атмосфера» с помощью перколяционной модели. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2008, №7, с. 61-71.

11. Klimov V.V., Kovalev V.I., Krapivin V.F., and Mkrtchyan F.A. (1999). An expert system to diagnose pollutant spills in the water surface. Proceedings of the 12-th International Conference on Control Systems and Computer Science, 26-29 May 1999, Bucharest. University Politehnica of Bucharest, Romania, pp. 277-283.
12. Klimav V.V., Kovalev V.I., Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A., Nitu C. An expert system to diagnose pollutants spills on the water surface. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Control Systems and Computer Science. 23-26 May 1999, Bucharest, Romania, pp. 277-283.
13. Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A., Kovalev V.I., and Klimov V.V. An adaptive system to identify the spots of pollutants on the water surface. Proceedings of the Eighth International Symposium "Ecoinformatics Problems", 16-17 December 2008, Moscow. The Moscow Sciences Engineering A.S. Popov Society for Radio, Electronics and Communication, Moscow, 2008, pp. 35-46.
14. Krapivin V.F., Nitu C., Varotsos C.A. (2019) Remote sensing tools and ecoinformatics. Matrix Rom, Bucharest, Romania, 332 pp.
15. Krapivin V.F. and Shutko A.M. Information technologies for remote monitoring of the environment. Springer/Praxis, Chichester U.K., 2012, 498 pp.
16. Mkrtchyan F.A., Krapivin V.F., Kovalev V.I., Klimov V.V., Rukovishnikov A.I., and Golovachev S.P. 2004. An adaptive spectroellipsometric technology for the ecological monitoring of the aquatic environment. Proceeding of 25-th ACRS, Chiang-Mai, Thailand, P. 13-15.
17. Varotsos. C.A. and Krapivin V.F. Modeling the state of marine ecosystems: A Case study of the Okhotsk Sea. Journal of Marine Systems, June 2019, V.194, pp. 1-10.
18. Varotsos C.A., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. Monitoring and forecasting of tropical cyclones: A new information-modeling tool to reduce the risk. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 36: 1-7.