

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-2-31-43>

УДК 551.46:621.396

В. И. Веремьев¹ ✉, В. М. Кутузов¹, Е. С. Плотницкая¹, В. В. Коваленко², В. А. Телегин³

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Нахимовский пр., д. 36, Москва, 17997, Россия

³Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН
Калужское шоссе, д. 4, Москва, г. Троицк, 108840, Россия

КОРОТКОВОЛНОВАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ

Аннотация

Введение. Современный подход к обеспечению необходимого качества морской деятельности, связанный с оценкой текущей информации о состоянии океанической среды в России, явно недостаточен. Указанный подход определяется развитием оперативных методов и инструментария наблюдения, а также оценкой состояния океана и его прогноза. Поэтому развитие концепции, инструментария и разработка методов получения данных является актуальной задачей становления оперативной океанографии.

Цель работы. Рассмотрение концепции мониторинга морской поверхности с использованием коротковолновой радиолокации поверхностной волны.

Методы и материалы. Представлен ряд конкретных океанологических примеров, требующих оперативного мониторинга состояния прибрежных вод мирового океана и отдельных регионов. Описаны наблюдательные системы, используемые в других странах. Особое внимание уделено развитию радиолокационного зондирования поверхностных вод, проводимого в нашей стране эпизодически. Резонансные отражения позволяют получать карты высокоточных измерений поверхностных течений и характеристик волнения на большой площади в реальном масштабе времени. Отмечены трудности проведения экспериментов и интерпретации результатов, выделены вопросы, требующие особого внимания для создания оперативного мониторинга морской поверхности, и методы их решения. Сформулирована основная задача прогноза параметров мирового океана с целью обеспечения безопасности морского транспорта от природных и антропогенных угроз, а также решения задач эффективного природопользования.

Результаты. Показано, что оптимальным средством получения натуральных данных служит создание наблюдательной сети из прибрежных коротковолновых радиолокаторов, позволяющей оценивать поверхностные течения и характеристики волнения, а также в целом решать задачу мониторинга. Отмечено, что важным элементом является разработка адекватной прибрежной модели и соотнесение ее параметров с экспериментальными данными. Неадекватность физических моделей конкретным природным условиям преодолевается адаптивным моделированием и мониторингом с помощью современных технических средств.

Заключение. Ассимилируясь в моделях гидродинамики и волнения, эти данные становятся применимыми при пространственном картировании гидрофизических неоднородностей водного слоя, скорости звука и подводных акустических шумов.

Ключевые слова: мониторинг прибрежных зон мирового океана, коротковолновая радиолокация, морское волнение, прогноз экспериментальных данных, оперативная океанография

© Веремьев В. И., Кутузов В. М., Плотницкая Е. С., Коваленко В. В., Телегин В. А., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Для цитирования: Коротковолновая радиолокация в системе мониторинга прибрежных акваторий / В. И. Веремьев, В. М. Кутузов, Е. С. Плотницкая, В. В. Коваленко, В. А. Телегин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 2. С. 31–43. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-2-31-43

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (темы № 0149-2019-0010 и 0149-2019-0004) и ИЗМИРАН (гр. № 01201356396).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.02.2019; статья принята к публикации 18.03.2019; опубликована онлайн 24.04.2019

**Vladimir I. Veremyev¹✉, Vladimir M. Kutuzov¹, Katsiaryna S. Plotnitskaya¹,
Valery V. Kovalenko², Viktor A. Telegin³**

¹Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences
36, Nahimovskiy pr., 117997, Moscow, Russia

³IZMIRAN
4, Kaluzhskoe Hwy, 108840, Moscow, Troitsk, Russia

HIGH-FREQUENCY RADAR FOR COASTAL AREAS MONITORING

Abstract

Introduction. *The modern approach for ensuring marine activities of necessary quality related to the assessment of current information on the state of the ocean environment in Russia is clearly insufficient. The development of operational methods and instruments of observation, as well as the assessment of the state of the ocean and its forecast naturally determine such an approach. Therefore, the development of the concept, tools and methods of obtaining data is an urgent task of the operational Oceanography formation.*

Objective. *The objective of the paper is to consider the concept of ocean surface monitoring using short-wave surface wave radar.*

Methods and materials. *The paper presents a number of specific Oceanologic examples that require operational monitoring of the state of coastal waters of the oceans and individual regions. Also, it describes observational systems used in other countries. The paper pays special attention for the development of radar sensing of surface waters, carried out in our country occasionally. The resonant nature of the reflections gives the opportunity to obtain maps of high-precision measurements of surface currents and wave characteristics on the long-range area in real time. The paper notes difficulties of the experiments implementation and the results interpretation, shows the insistent issues for the establishment of the ocean surface operational monitoring, and gives the approaches for solvation of the existing problems. The paper formulates the main task of the world ocean parameters forecast for ensuring of the sea transport safety from natural and anthropogenic threats, as well as formulates the problems solution of effective nature management.*

Results. *The paper shows that the optimal means of natural data acquisition is the creation of an observation network of coastal HF radars, which enables to assess surface currents and wave characteristics, as well as to solve the problem of monitoring. It is important to develop an adequate coastal model and correlate its parameters with experimental data. The adaptive modeling and monitoring by modern technical means can overcome inadequacy of physical models to specific natural conditions can.*

Conclusion. *By assimilation in hydrodynamic and wave models, these data become applicable in spatial mapping of hydrophysical inhomogeneities of the water layer, sound velocity, and underwater acoustic noise.*

Key words: monitoring of coastal zones of the oceans, shortwave radar, sea waves, experimental data forecast, operational oceanography

For citation: Veremyev V. I., Kovalenko V. V., Kutuzov V. M., Plotnitskaya K. S., Telegin V. A. High-Frequency Radar for Coastal Areas Monitoring. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 2, pp. 31–43. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-2-31-43 (In Russ.)

Source of financing. The work was implemented within the frames of State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (grant No 0149-2019-0010 и 0149-2019-0004) and Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences IZMIRAN (grant No 01201356396).

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Received 13.02.2019; accepted 18.03.2019; published online 24.04.2019

Введение. Вследствие особенностей своего географического положения прибрежные акватории и литоральные области океана относительно большой ресурсной доступности связаны с интенсивной морской деятельностью различного вида. К ней следует отнести вопросы безопасности от природных и антропогенных угроз, природопользование и морской транспорт.

Для обеспечения необходимого качества указанных видов морской деятельности усредненных (климатических) данных недостаточно; необходима оценка текущей информации о состоянии океанической среды. Это требует развития оперативных методов и инструментария наблюдения, оценки и прогноза состояния океана, называемых оперативной океанографией [1]–[5].

Характерным примером литоральных областей океана, рассматриваемых в работах по оперативной океанографии, могут служить регионы Баренцева моря и шельфов Норвежского моря. Им, как и литоральным зонам Мирового океана, присуща сильная пространственная и временная изменчивость свойств океанической среды, включая течения и волнение моря. Их изменчивость в значительной степени характеризуется наличием процессов и явлений малых масштабов, в частности образованием субмезомасштабных вихревых структур и меандров [6].

К отличительным свойствам мелководных областей относят: выраженную динамику свободной

поверхности, вертикальное перемешивание, прилив и приливное перемешивание, развитое волнение. В этих условиях основная задача мониторинга формулируется как непрерывное текущее оценивание в реальном времени и прогноз океанологических свойств водного слоя. Требования, предъявляемые к указанным системам, подразумевают использование комплексных средств съема натуральных данных, специфических прибрежных моделей и гибких адаптивных процедур настройки и соотнесения моделей и экспериментальных данных [6].

Среди характерных для оперативной океанографии средств реально-временного измерения и съема данных об океанической среде заметное место заняли радиолокационные системы (РЛС), эксплуатирующие эффект дальнего распространения волн вдоль поверхности моря при настильном приповерхностном зондировании и эффекты взаимодействия поля зондирующих сигналов с неровностями поверхности. Более того, радиолокация – это единственный инструмент, способный покрыть практически непрерывными измерениями прибрежные районы [1]–[3]. К критическим характеристикам РЛС относятся качество указанных измерений, возможности их обработки применяемыми моделями и соответствие последних изменчивости прибрежных районов, позволяющее с необходимой точностью отображать поверхностные и подповерхностные процессы с необходимым разрешением.



Рис. 1. Карта расположения системы оперативного мониторинга прибрежных акватории США с использованием коротковолновой (КВ) радиолокации
Fig. 1. Location map of the US coastal operational monitoring system using short-wave radar



Рис. 2. Пример восстановленной структуры возмущений морской поверхности у побережья США по данным КВ-радиолокации
Fig. 2. Example of the restoration structure of the sea surface perturbations of the US coast according to the short-wave radar

В настоящее время указанными характеристиками обладают системы коротковолновой радиолокации, широко применяемые в мире для решения задач оперативной океанографии. В качестве примера на рис. 1 и 2 представлена карта расположения систем оперативного мониторинга прибрежной зоны мирового океана на территории США и результаты восстановления морских возмущений в этой зоне, полученные в результате радиолокационного мониторинга [4], [5].

Принципы получения данных о возмущениях морской поверхности коротковолновой радиолокацией и информативность этих данных. В распространении коротких радиоволн (3...30 МГц) различают два механизма: поверхностная волна за счет дифракции на поверхности Земли и пространственная волна при ионосферной рефракции. В РЛС мониторинга надводной обстановки используются оба типа распространения, однако при локации морской поверхности с целью получения данных о ее возмущениях используются только РЛС с поверхностным типом распространения волн. При этом дальность действия РЛС достигает 300...400 км.

Использование коротковолновой радиолокации поверхностной волны позволяет получать в реальном масштабе времени информацию о надводном судоходстве, ледовой обстановке и метеоусловиях, в том числе определять кромку и динамику ледового покрова, характеристики приводного ветра, степень волнения моря и течений. В число оцениваемых гидрофизических и метеорологических параметров входят направление и сила ветра у поверхности моря, направление распространения и средняя высота волн, скорость и направление поверхностных течений.

В задачах оценивания гидрофизических характеристик водного слоя и генерируемого поверх-

ностью моря и судоходством подводных акустических шумов эти данные – входные. Они же будут промежуточными для ряда других задач.

На рис. 3 представлен модельный спектр отражений от морской поверхности. Изучение подобного спектра показало [2], что частотные компоненты, соответствующие узким пикам спектра вблизи частоты Брега f_{Br} ($F_{отн} = f/f_{Br} = \pm 1$) (рис. 3, C), обусловлены так называемыми отражениями первого порядка. Эти компоненты соответствуют рассеиванию радиоизлучения с длиной волны λ возмущениями морской поверхности (волнами) с пространственной протяженностью между гребнями $\lambda/2$. Отражения от гребней таких возмущений имеют разность хода, равную λ , и поэтому суммируются синфазно. Частота Брега, она же доплеровское смещение частоты f_d , определяется выражением

$$f_{Br} = \pm \sqrt{g/(\pi\lambda)},$$

где g – ускорение свободного падения.

Составляющие спектра, порожденные возмущениями морской поверхности (рис. 3, 2), обусловлены отражениями второго порядка. Например, этому соответствует сигнал, образованный последовательным отражением от совокупностей морских возмущений разной протяженности, обеспечивающих общую разность хода, близкую к λ .

Резонансный характер взаимодействия радиоволн и возмущенной поверхности моря позволяет связать основные параметры указанных возмущений с параметрами спектра отраженного морем сигнала. Физической основой для разработки методов определения состояния морской поверхности служит теория рассеяния коротких радиоволн на взволнованной морской поверхности [2].

Теория взаимодействия радиоволн и морских возмущений первого порядка описывает природу и информационную содержательность пиков в доплеровском спектре отраженного морем сигнала (брегговских или доплеровских составляющих).

Соотношение амплитуд этих линий для "приближающихся" и "удаляющихся" возмущений (на частотах $F_{отн} = -1$ и $+1$) (рис. 3, A) содержит информацию о генеральном направлении распространения морских возмущений и ветра у поверхности моря относительно угла визирования. Как показали экспериментальные исследования, ширина брегговских составляющих (рис. 3, G)

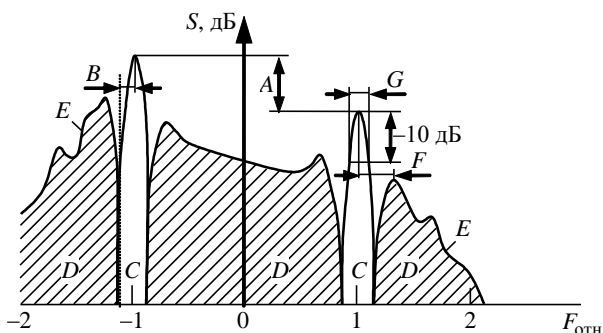


Рис. 3. Характерный доплеровский спектр отражений от морской поверхности в КВ-диапазоне радиоволн

Fig. 3. Typical Doppler spectrum of reflections from the sea surface in the short-wave range of radio waves

содержит информацию о скорости ветра, воздействующего на морскую поверхность. Информация о смещении этих составляющих по частоте (рис. 3, *B*) служит основой для оценивания компонент и векторов скорости поверхностных течений (направлений и скорости в каждом элементе пространственного разрешения).

Теория резонансного взаимодействия второго порядка описывает континуальную составляющую доплеровского спектра рассеянного морем сигнала. Этот спектр содержит информацию о морском волнении. Огибающая спектра справа и слева от береговских линий (рис. 3, *E*) описывает скалярный спектр морского волнения, из которого выделяются параметры доминирующей длины морской волны и оценка ее средней высоты (рис. 3, *F*). При наличии зыби в скалярном спектре морского волнения возможно определение не только длины волны, но и ее направления. Для получения обобщенной оценки средней высоты морских волн или степени волнения используется соотношение площадей, заключенных под огибающими спектров второго и первого порядков (рис. 3, *D/C*).

Как показали экспериментальные исследования, для получения достоверной гидрофизической и метеорологической информации из рассеянного морем сигнала требуется усреднение результатов нескольких зондирований и учет помех различного происхождения. Выполненные теоретические расчеты [2] обосновывают необходимость 9–15 независимых зондирований морской поверхности. Спектральные и статистические свойства отражений от морской поверхности в КВ-диапазоне к настоящему времени достаточно хорошо исследованы [3].

Специфический характер спектра отраженно-морем сигнала позволяет достаточно надежно фиксировать границы типа "земля–море" и "лед–море". На основании этой информации определяются границы ледовых полей, обнаруживаются и сопровождаются отдельные льдины и айсберги на больших дистанциях. Измерение скорости их дрейфа возможно с точностью до единиц сантиметров в секунду.

Пример реального пространственно-частотного спектра отражений от морской поверхности $S(F_{отн}, d)$ (d – номер элемента разрешения по дальности) при КВ-радиолокации приведен на рис. 4 [4]. На рисунке на фоне континуальной составляющей выделены дискретные элементы, соответствующие отражениям от надводных движу-

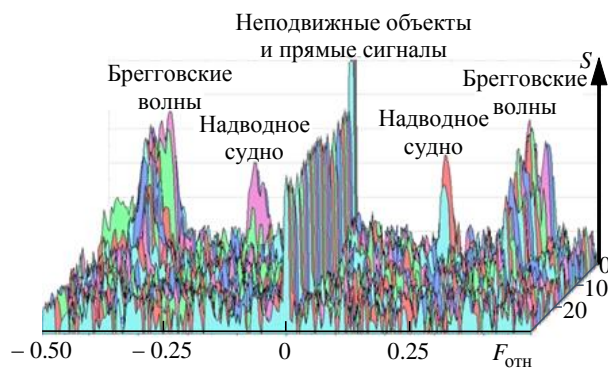


Рис. 4. Пример реального пространственно-частотного спектра отражений от морской поверхности

Fig. 4. An example of a real spatial-frequency spectrum of reflections from the sea surface

щихся и неподвижных объектов и береговским отражениям от возмущений морской поверхности.

Обработка данных в КВ-радиолокации морской поверхности. В океанологии основным объектом измерений служат течения, прибрежные вихри, характеристики морского волнения. Также возможно зафиксировать положение и перемещение надводных объектов. Векторы течений, полученные по радиолокационным данным, рассчитываются на заданной пространственной сетке с фиксированным разрешением. На больших площадях измеряются радиальные компоненты скорости течений и/или компоненты скорости, характерные для бистатической (мультистатической) локации, когда излучатель и приемник разнесены. Системы КВ-радиолокации обеспечивают получение в реальном времени синоптической картины распределения векторов поверхностных течений и информации о поверхностном волнении. Характерный период обновления данных в известных системах составляет десятки минут, что отчасти согласовано с природной изменчивостью океанических процессов.

В большинстве случаев для определения векторов течений обрабатываются данные о радиальных компонентах их скоростей, полученные от двух и более станций (рис. 5). Для повышения точности измерений используются бистатические локационные системы, в которых излучатели и приемники разнесены на расстояния, составляющие существенную долю дальности действия КВ РЛС, это также позволяет увеличить пространственное покрытие на 30...100 %.

Данные измерений позволяют получать информацию о поверхностных течениях, но при этом результаты измерения амплитуды и изменчивость оценок КВ РЛС могут содержать существенные

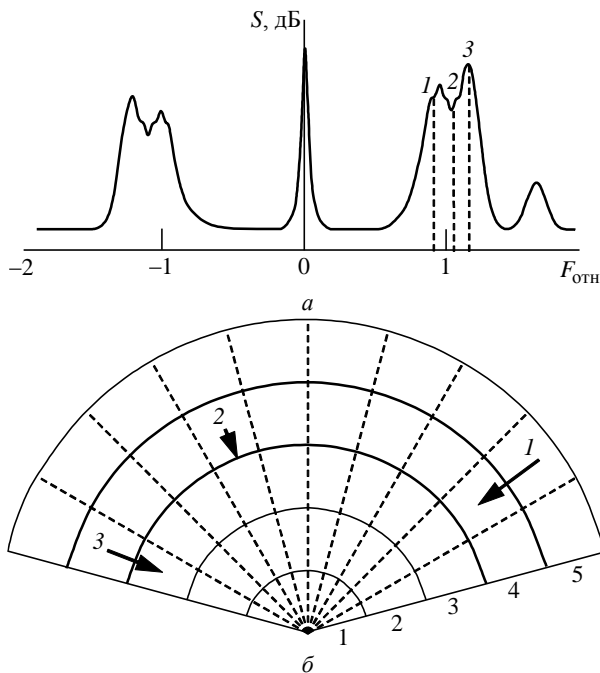


Рис. 5. Связь направления движения и доплеровского смещения частоты эхосигнала
 Fig. 5. Relationship between driving direction and Doppler frequency shift of the echo signal

ошибки, сравнимые с измеренными значениями. Для преодоления этого затруднения обработка данных КВ РЛС ведется по робастным алгоритмам и включает процедуры фильтрации и интерполяции измерений.

В наиболее распространенной схеме сети моностатических станций эхосигналы содержат информацию о расстоянии r , азимутальном угле θ и о доплеровском сдвиге f_d . В силу конечной разрешающей способности по этим координатам общая картина принимаемых вследствие брэгговского рассеяния сигналов оказывается сегментированной. Эхосигналы в конкретном элементе разрешения по дальности интегрируются на временном интервале T с тем, чтобы сформировать доплеровский спектр (см. рис. 4). Размер этого элемента в КВ РЛС составляет 500...1500 м, поэтому в процессе измерений усредняется сигнал от сотен гребней волн. Радиальные составляющие скоростей течений определяются по малым доплеровским сдвигам на основе информации, содержащейся в сигналах элементов разрешения по расстоянию δr и по доплеровскому сдвигу. Из данных о расстоянии и доплеровском сдвиге получают значение и знак радиальной скорости и дальность.

Совокупности значений, полученных на часовом интервале, показывают значительную пространственную и временную изменчивость из-за

мезомасштабной изменчивости течений, изменчивости ветровой нагрузки и приливных процессов. В качестве оценки компонентов скорости обычно принимаются среднеквадратичные значения при усреднении по ансамблю. Из других особенностей обработки следует отметить использование процедур ограничения выбросов оценок, превышающих разумный предел по скорости течений и устранение ионосферных искажений и кратковременных импульсных помех, влияющих на корректную оценку доплеровского сдвига.

Для измерения спектра морского волнения требуется интегрирование сигнала в течение 50...100 с. Из-за длительного времени накопления при обработке сигнала в каждом элементе разрешения по дальности необходимо объединять результаты нескольких зондирований. С учетом указанного интервала получить приемлемый темп съема пространственных данных возможно только при параллельной обработке сигнала во всех элементах разрешения по дальности и по частоте.

Для КВ РЛС характерно присутствие на входе приемника помех, значительно превышающих уровень ее собственных шумов. Среди этих помех можно отметить атмосферные, промышленные и помехи, создаваемые радиостанциями и другими радиоэлектронными средствами.

В большей части КВ-диапазона преобладают сосредоточенные на отдельных частотных интервалах спектра активные помехи от радиостанций. Измеренный перепад интенсивности между интервалами, занятыми сосредоточенными помехами и свободными от них, доходит до 80...100 дБ. Выбор для работы свободного участка спектра снижает влияние помех.

Особенности конструкций КВ-радиолокатора.

Кроме диапазона рабочих частот важной особенностью КВ-радиолокации являются конструкции и характеристики антенных систем. Для РЛС поверхностной волны антенная система должна находиться вблизи кромки воды.

Системы КВ-радиолокации создаются либо как фазированные решетки (две линии антенн (передающих и приемных), установленные вдоль берега), либо как распределенные системы с оценкой направлений. Фазированные решетки первоначально были одночастотными; новые используют несколько частот. Системы с оценкой направлений CODAR [7] конфигурируются в различные по разрешению (по расстоянию) комбинации. Это версии, рассчитанные на большие расстояния (до 300

км от берега), и версии с высоким разрешением, позволяющие создавать и обновлять карту поверхностных течений с разрешением до 100 м на умеренных расстояниях.

Область КВ-радиолокационного наблюдения может быть расширена за счет установки дополнительных бистатических передатчиков на вынесенных в море буях. Полученная в результате эллиптическая координатная система обеспечивает восстановление скорости течений вдоль гипербол при расширении области покрытия по всем направлениям с получением ряда дополнительных преимуществ [5].

Примером недорогой реализации КВ-РЛС поверхностной волны является стационарная РЛС WERA (Германия) [5], [8]. На рис. 6 представлены антенная система этой РЛС, а на рис. 7 – схема ее типового размещения. В состав РЛС входят передающая антенная система T_x , приемная антенная решетка R_x и блок генерации и обработки сигналов WERA. Эта РЛС позволяет измерять указанные ранее характеристики возмущений поверхности моря и допускает раннее обнаружение цунами [9], [10].

Для РЛС сравнительно малой мощности (до 100...500 Вт) с 16-элементной решеткой предель-

ная дальность составляет 100...200 км. Как правило, вызывает затруднения обеспечение хорошей электромагнитной развязки между передающей и приемной позициями. Приходится искать компромисс между длительностью импульса (а соответственно, и энергетикой РЛС) и размером ближней зоны. Задача разнесения передающей и приемной позиций заключается в том, чтобы приемные цепи находились в линейном режиме. Тогда можно применить методы компенсации прямого сигнала и тем самым обеспечить обзор ближней зоны в непрерывном режиме и дальней зоны в импульсном режиме.

Непосредственно на месте размещения РЛС по текущим условиям могут быть выбраны период следования и скважность импульсов, обеспечивающие обзор всей зоны ответственности РЛС.

В КВ РЛС находит применение линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал. При его использовании достигается развязка между сигналами с разной задержкой по частоте. Однако хорошую развязку трудно реализовать при малых индексах модуляции. При выделении для сигнала достаточно широкой полосы, например 100 кГц, индекс модуляции получается равным 10, что может считаться достаточным.

При ширине спектра сигнала 10 кГц минимальная длительность импульса составляет 100 мкс, при максимальной задержке 1 мс (соответствующей дальности 150 км) получается достаточно хорошая скважность сигнала 10, поэтому можно использовать импульсный сигнал, добавив модуляцию от импульса к импульсу.

Компромиссно-разумными можно считать следующие параметры сигнала: полоса 20 кГц, период следования импульсов 1 мс, длительность импульса 50...200 мкс, длительность сигнала 100 с. Излучаемая посылка состоит из периодических импульсов со специально подобранной фазовой модуляцией, минимизирующей боковые лепестки и внеполосное излучение.

К основным особенностям приемопередающей аппаратуры относятся прямое цифровое преобразование на несущей частоте во всем КВ-диапазоне, прямой синтез зондирующего сигнала и многоэлементная цифровая решетка [11].

Время развертывания РЛС определяется скоростью расстановки антенных элементов и подключения их к приемнику. Для сокращения этого времени целесообразно заменить кабельные соединения между антеннами и процессором РЛС



Рис. 6. Антенная система РЛС WERA
Fig. 6. WERA radar antenna system

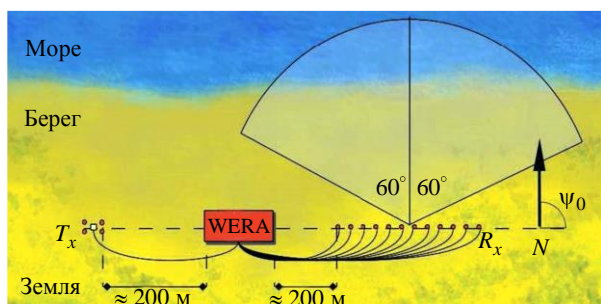


Рис. 7. Типовая схема размещения РЛС WERA
Fig. 7. A typical layout of the radar WERA

на беспроводной интерфейс для сбора данных, например на основе сети Wi-Fi, снабдив каждый антенный элемент GPS-приемником и автономным питанием на основе солнечных батарей с аккумуляторами. Тогда развертывание будет заключаться только в расстановке антенных элементов на выбранном участке берега. Антенные элементы КВ РЛС можно размещать непосредственно в береговой растительности. При необходимости отдельные автономные антенные элементы можно разместить в море на буйках.

В качестве устройства обработки используется компьютер с сетевым Wi-Fi-оборудованием для сбора данных от антенных элементов. Таким образом, в состав РЛС входит: поле приемной антенной решетки, центр приема данных от ее элементов и формирователь сигнала, усилители мощности, передающая антенная система.

Передающая антенная система должна излучать сигнал по азимуту и по углу места в секторе, обслуживаемом РЛС, минимизируя излучение по другим направлениям. Антенна должна перекрывать весь диапазон рабочих частот. Поэтому, несмотря на широкую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости, передающая антенна имеет существенные размеры. Синтез КВ-сигнала с заданными параметрами реализуется с помощью многоканального цифроаналогового преобразователя синтезатора сигнала. Установка фаз и амплитуд по каждому каналу позволяет сформировать заданную диаграмму направленности на передачу, адаптивную к помеховой обстановке.

Для синхронизации достаточно точности сигналов, поступающих от GPS-приемника. Взаимное расположение антенных элементов (конфигурация приемной решетки) уточняется по координатам, получаемым от этого же приемника.

Перспективным направлением может стать применение коротковолновых радиолокационных комплексов с вынесенным приемом, построенных по принципу бистатической когерентной РЛС, с использованием сигналов собственных и сторонних источников излучения для освещения морской обстановки [12].

Состав систем оперативной океанографии. В общем виде системы оперативного мониторинга можно представить состоящими из трех крупных частей:

– наблюдательной сети, функция которой – получение натуральных данных о состоянии океанической среды и о связанном с этим состоянием атмосферном форсинге;



Рис. 8. Система оперативной океанографии с элементами настройки (адаптации) моделей и наблюдательной сети
Fig. 8. System of operational oceanography with elements of adjustment (adaptation) of models and observation network

– физической модели, описывающей изменчивость океанической среды в пространстве и времени;

– механизма подгонки натуральных данных и модели (ассимиляция данных в моделях).

На рис. 8 приведен возможный состав систем для оперативной океанографии с элементами настройки для адаптации данных с моделями наблюдательных параметров.

Вход в систему представлен наборами или полями натуральных (измеренных) данных и данных о воздействующих факторах. Выходом системы становятся поля океанических характеристик, информация о которых востребована в прикладных задачах (рис. 8). В рассматриваемом случае наблюдения состояния морской поверхности проводятся в прибрежной зоне с помощью КВ РЛС. Данными для наблюдений служат характеристики поверхностных течений и волнения. Внешние воздействия – атмосферный форсинг. Инструмент наблюдений, особенности моделей и их настройки под физические процессы, особенности ассимиляции рассмотрены далее.

Отметим, что системы наблюдения часто представляют собой обсерватории, включающие сети КВ РЛС различных частотных диапазонов, а также океанологические станции, метеорологические радары, станции погоды, измерители приливов.

Модели. Используемые оперативной океанографией модели прибрежных районов основываются на системе уравнений геофизической гидродинамики (примитивных уравнений). При этом модели должны адекватно воспроизводить физику этих районов. К особенностям прибрежных районов относят влияние береговой линии, мелководье (обычно до 200 м), сильные течения вдоль берегов и пространственно-временную из-

менчивость океанических процессов. Учитывая сделанный акцент на наблюдении поверхностных явлений, в модели важно учесть влияние физических факторов на водную поверхность. Модели характеризуются переменными состояниями (state variables) – свойствами морской среды – и параметрами (parameters). К переменным состояниям относятся температура, соленость, компоненты скорости течений. Перечень и физический смысл параметров используемых динамических океанических моделей можно найти, например, в [13]. Это коэффициенты, определяющие вертикальное и приливное перемешивание, трение у дна и граничные условия. Параметры являются регуляторами, используя которые, модель настраивают на физические особенности конкретной акватории. Применительно к условиям мелководья и, соответственно, к прибрежному моделированию выделяются [6] параметры, связанные с придонной зоной, которые считаются основным регулятором адекватности прибрежной модели. Это "напряжение у дна" (bottom stress) и коэффициенты трения (bottom friction coefficients) в различных направлениях. Определяемые этими параметрами характеристики придонных течений влияют на общую динамику и состояние водных масс, в том числе на поверхностные течения.

Граничные условия определяются из соображений общности процессов в океане и в прибрежной акватории как его части. Поэтому модели прибрежных региональных или локальных акваторий обычно вкладываются (nesting) в крупномасштабные модели. Граничные условия в значительной степени определяются пространственной изменчивостью состояния океана и процедурой вложения.

Ассимиляция натурных данных в моделях. Следуя [14], различаем ошибки измерений (разница между измеренными и истинными значениями), ошибки моделей (следствие неадекватности описания физических процессов) и ошибки невязки (ϵ) между измеренными и соответствующими им модельными значениями. Ошибки невязки включают в себя и ошибки измерений, и ошибки физической модели. Эти ошибки могут быть реально оценены. Для работы с ними введены модели ошибок-невязок. Статистики невязок получили название неопределенностей. Изменчивость этих статистик по пространству названа полями неопределенностей. Изучение неопределенностей стало в настоящее время важным научным направлением [14]. Информация об ис-

тинных значениях измеряемой величины, как правило, отсутствует, поэтому в отношении ошибок измерений существуют только статистические модельные представления. Неадекватность физических моделей конкретным природным условиям априори оценить сложно. Эта сложность согласно [14] преодолевается с помощью так называемого адаптивного моделирования, для чего вводится процедура ассимиляции – подгонки физической динамической модели и измеренных данных по определенному критерию (см. рис. 8). В качестве критерия принимается минимум некоторой нормы соответствия измеренных и модельных значений. Обычно это – квадратичная норма невязок (ϵ). Задачи ассимиляции решаются различными формальными методами (процедурами), учитывающими нелинейные модельные зависимости. Среди них выделяются ансамблевые, вариационные и гибридные (вариационно-ансамблевые) методы. Поскольку при заданном измерителе результаты измерений – это внешняя для модели (неизменяемой) информация, то в процессе подгонки изменяется сама модель, т. е. начальные и граничные условия и параметры.

Методы ассимиляции данных в моделях разделяются на методы статистического оценивания и обратные методы. В процессе подгонки модели и экспериментальных данных идеальным можно считать одновременное оценивание параметров модели и переменных состояния, удовлетворяющее выбранному критерию. В случае неадекватности или низкого качества модели она подлежит улучшению. Анализ неопределенностей может выявить также потребность в улучшении качества измерений – например, может потребоваться изменение плотности расположения КВ РЛС, их разрешающей способности, минимизация ошибок за счет предварительной обработки и привлечения дополнительных измерителей.

Фазы разработки систем оперативного мониторинга прибрежных акваторий. Создание наблюдательной сети из прибрежных КВ РЛС, позволяющей проводить оценку поверхностных течений и характеристик волнения, не решает задачу мониторинга полностью. Это – лишь один из элементов целостной системы. Другим важным элементом служит разработка адекватной прибрежной модели.

Разработка такой модели предусматривает ряд этапов. Первый из них, по-видимому, – проведение необходимых исследований. Необходимо вы-

явить доминирующие в конкретной прибрежной зоне процессы и их масштабы, особенно связанные с поверхностными явлениями, в том числе субмезомасштабными; выявить влияние характеристик дна на придонные и поверхностные течения. При разработке физической модели следует учесть результаты, полученные на исследовательской фазе. Необходимо предусмотреть возможность настройки модели под изменяющиеся условия района. От использования жесткой модели с назначенными параметрами или ранее разработанной и универсально применяемой модели ожидать адекватности не стоит.

Затем применительно к разработанной модели разрабатываются процедуры ассимиляции данных, потенциально получаемых от прибрежной радиолокации и других измерителей. Эти процедуры должны предусматривать подгонку переменных состояния модели к соответствующим экспериментальным данным и оценку параметров модели. Следующей фазой могла бы стать калибровка сочетания элементов будущей системы. Далее следует предусмотреть натурные эксперименты и верификацию системы в реальном масштабе времени. Последней фазой может стать инженерное проектирование вариантов целостной системы.

Заключение. Результаты применения систем оперативного мониторинга прибрежных акваторий, основанные на использовании КВ-радиолокации, должны носить как практический, так и научный характер. Реально-временной мониторинг и прогноз поверхностных эффектов улучшат управление транспортной и природоохранной деятельностью и приведут к предупреждению опасных явлений. Оценка и прогноз подповерхностных явлений улучшат качество подводного наблюдения. Научный результат выразится в улучшении физических моделей и представлений о природных явлениях в прибрежной зоне.

Ожидается, что при ассимиляции моделью радиолокационных данных и данных о поверхностном ветре улучшится разрешение прибрежных вихрей и фронтов. На рис. 9 приведено сопоставление результатов измерений радиальной составляющей скорости течения по данным КВ РЛС $v_{РЛС}$ и акустического доплеровского профилографа течений (АДПТ) $v_{АДПТ}$ для двух направлений [15]. В одном из них (рис. 9, а) корреляция данных указанных измерений составила 0.96, во втором (рис. 9, б) – 0.82. Среднеквадратическое отклонение составляет

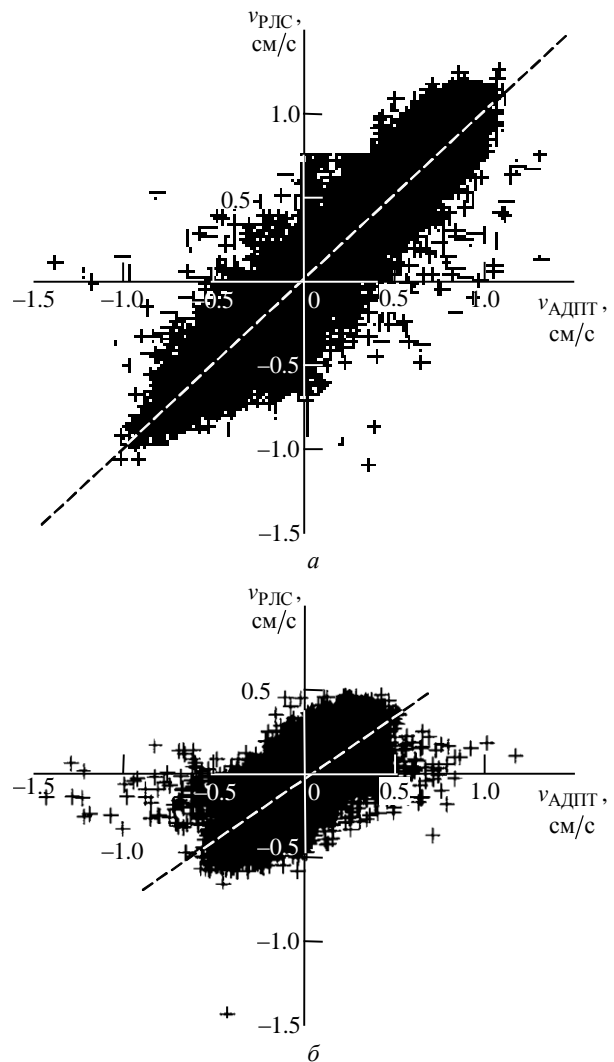


Рис. 9. Сопоставление результатов измерений радиальной составляющей скорости течения по данным КВ РЛС и АДПТ

Fig. 9. Comparison of the results of measurements of the radial component of the flow velocity according to HF radar and acoustic Doppler flow profiler

13.8 и 11 см/с соответственно. Приведенные результаты показывают, что данные о радиальной скорости течения, полученные КВ РЛС и АДПТ, хорошо согласуются между собой.

Выводы. Опыт использования систем оперативного мониторинга прибрежных акваторий с помощью КВ-радиолокации отражен в ряде зарубежных публикаций. Из него, в частности, можно сделать следующие выводы:

– При корректном построении модели и выборе ее параметров – параметров зондирующих сигналов, пространственного разрешения, алгоритмов обработки данных (в том числе межантенной обработки), могут быть получены корректные данные о поверхностных течениях. Известные экспе-

рименты по сравнению результатов, полученных КВ РЛС и иными инструментами, показывают хорошее их согласие.

– Разработаны высокоразрешающие модели океанических процессов в прибрежной зоне, способные описывать как поверхностные явления (в том числе прибрежные вихревые структуры), так и динамику гидрофизических полей в трехмерной области водного слоя.

– При практическом использовании КВ-диапазона в целях мониторинга морских акваторий отечественные разработчики считают целесообраз-

ным создание передислоцируемых РЛС с использованием беспроводных каналов передачи данных в антенной системе. Снижение стоимости одного элемента антенной решетки и развитие сетевых технологий позволяют снизить затраты при развертывании РЛС. Есть все основания полагать, что осуществление проекта радиолокационного океанографического мониторинга в нашей стране реально реализуемо как в техническом, так и в методическом отношении и необходимо для развития и совершенствования морского транспорта и решения экологических проблем мирового океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Helzel T., Hansen B. How monitoring by Coastal Radar becomes more and more important as tool for hazard management and environmental protection. URL: <https://helzel-messtechnik.de/files/432/upload/Pressreleases/Press-Release-WERA-100118.pdf> (дата обращения 09.04.2019)
2. Directional Sea Spectrum determination using HF Doppler radar techniques / D. Trizna, J. Moore, J. Headrik, R. Bogle // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1977. Vol. AP-25, № 1. P. 4–11. doi: 10.1109/TAP.1977.1141549
3. Barrick D. E., Snider J. The statistic of HF sea echo Doppler spectra // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1977. Vol. AP-25, № 1. P. 19–28. doi: 10.1109/TAP.1977.1141529
4. Detection of ships with multi-frequency and CODAR SeaSonde HF radar systems / D. M. Fernandez, J. F. Vesecky, D. E. Barrick, C. C. Teague, M. M. Plume, C. Whelan // Canadian J. of Remote Sensing. 2014. Vol. 27, № 4. P. 277–290. doi: 10.1080/07038992.2001.10854871
5. Long-term real-time Coastal Ocean Observational Networks/ S. M. Glenn, T. D. Dickey, B. Parker, W. Boicourt // Oceanography. 2000. Vol. 13, № 1. P. 24–34. doi: 10.5670/oceanog.2000.50
6. Data assimilation within the advanced circulation (ADCIRC) modeling framework for the assimilation of Manning's friction coefficient / T. Mayo, T. Butler, C. Dawson, I. Hoteit // Ocean Modeling. 2014. Vol. 76. P. 43–58. doi: 10.1016/j.ocemod.2014.01.001
7. Results from the Mid Atlantic high frequency radar network / H. Roarty, E. Handel, M. Smith, E. Rivera, J. Kerfoot, J. Kohut, S. Glenn. URL: <https://ru.scribd.com/presentation/55643049/Results-from-the-Mid-Atlantic-High-Frequency-Radar-Network> (дата обращения 20.03.2019)
8. How to set up a WERA Site. URL: http://wera.cen.uni-hamburg.de/WERA_Guide/WERA_Guide.shtml (дата обращения 20.03.2019)
9. Dzvонkovskaya A., Gurgel K.-W. Future contribution of HF radar WERA to tsunami early warning systems // European J. of Navigation. 2009. Vol. 7, № 2. P. 17–23.
10. Dzvонkovskaya A., Petersen L., Helzel T. HF ocean radar with a triangle waveform implementation // Proc. of Int. Radar Symposium IRS 2018, June 20–22 2018, Bonn, Germany. Bonn: German Institute of Navigation (DGON), 2018. P. 1487–1493.
11. Безуглов А. В., Веремьев В. И., Кутузов В. М. РЛС декаметрового диапазона для мониторинга прибрежных акваторий // Морские информационно-управляющие системы. 2018. № 1 (13). С. 60–66.
12. Концепция построения коротковолновых радиолокационных станций с вынесенным приемом и использованием сигналов собственных и сторонних источников излучения для освещения морской обстановки / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, В. А. Родионов, С. В. Куприянов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 4. С. 50–54.
13. An operational circulation modeling system for the gulf of maine/Georges Bank Region. Part I: Basic Elements / W. Brown, A. Gangopadhyay, F. Bub, Zhitao Yu // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2007. Vol. 32, № 4. P. 807–822. doi: 10.1109/JOE.2007.895277
14. Lermusiaux P. F. J. Adaptive modeling, adaptive data assimilation and adaptive sampling // Physica D. 2007. Vol. 230, iss. 1–2. P. 172–196. doi: 10.1016/j.physd.2007.02.014
15. Robinson A. M., Wyatt L. R. A two-year comparison between HF radar and ADCP current measurements in Liverpool Bay // J. of Operational Oceanography. 2011. Vol. 4, № 1. P. 33–45. doi: 10.1080/1755876X.2011.11020121

Веремьев Владимир Иванович – кандидат технических наук (2000), директор НИИ "Прогноз" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – комплексный экологический мониторинг; комплексные вопросы построения радиолокационных систем; многодиапазонные многопозиционные радиолокационные комплексы для мониторинга воздушного пространства и морской поверхности.
E-mail: vervladiv@gmail.com

Кутузов Владимир Михайлович – доктор технических наук (1997), профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – комплексные вопросы радиолокации; морская радиолокация.

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

Плотницкая Екатерина Сергеевна – студентка 2-го курса Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – радиолокационное распознавание.

E-mail: katya.plotnitskaya@yandex.ru

Коваленко Валерий Вениаминович – кандидат технических наук (1978), ведущий научный сотрудник ИО РАН. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – информационно-управляющие системы, оперативная океанография; подводная акустика.

E-mail: hydrophys@mail.ru

Телегин Виктор Алексеевич – кандидат физико-математических наук (1984), старший научный сотрудник ИЗМИРАН. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – исследование неоднородностей ионосферы; создание радиолокационных комплексов для мониторинга состояния ионосферы и морской поверхности; вопросы построения радиолокационных систем; разработка систем мониторинга морского волнения и течений.

E-mail: telvika@gmail.com

REFERENCES

1. Helzel T., Hansen B. How Monitoring by Coastal Radar Becomes More and More Important as Tool for Hazard Management and Environmental Protection. Available at: <https://helzel-messtechnik.de/files/432/upload/Pressreleases/Press-Release-WERA-100118.pdf> (accessed 09.04.2019)
2. Trizna D., Moore J., Headrik J., Bogle R. Directional Sea Spectrum determination using HF dopler Radar Techniques. IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1977, vol. AP-25, no. 1, pp. 4–11. doi: 10.1109/TAP.1977.1141549
3. Barrick D. E., Snider J. The Statistic of HF Sea Echo Doppler Spectra. IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1977. Vol. AP-25, no. 1, pp. 19–28. doi: 10.1109/TAP.1977.1141529
4. Fernandez D. M., Vesecky J. F., Barrick D. E., Teague C. C., Plume M. M., Whelan C. Detection of Ships with Multi-Frequency and CODAR Seasonde HF Radar Systems. Canadian J. of Remote Sensing. 2014, vol. 27, no. 4, pp. 277–290. doi: 10.1080/07038992.2001.10854871
5. Glenn S. M., Dickey T. D., Parker B., Boicourt W. Long-Term Real-Time Coastal Ocean Observational Networks. Oceanography. 2000, vol. 13, no. 1, pp. 24–34. doi: 10.5670/oceanog.2000.50
6. Mayo T., Butler T., Dawson C., Hoteit I. Data Assimilation within the Advanced Circulation (ADCIRC) modeling framework for the assimilation of Manning's friction coefficient. Ocean Modeling. 2014, vol. 76, pp. 43–58. doi: 10.1016/j.ocemod.2014.01.001
7. Roarty H., Handel E., Smith M., Rivera E., Kerfoot J., Kohut J., Glenn S. Results from the Mid Atlantic High Frequency Radar Network. Available at: <https://ru.scribd.com/presentation/55643049/Results-from-the-Mid-Atlantic-High-Frequency-Radar-Network> (accessed 20.03.2019)
8. How to set up a WERA Site. Available at: http://wera.cen.uni-hamburg.de/WERA_Guide/WERA_Guide.shtml (accessed 20.03.2019)
9. Dzvонkovskaya A., Gurgel K.-W. Future Contribution of HF Radar WERA to Tsunami Early Warning Systems. European J. of Navigation. 2009, vol. 7, no. 2, pp. 17–23.
10. Dzvонkovskaya A., Petersen L., Helzel T. HF Ocean Radar with a Triangle Waveform Implementation. Proc. of Int. Radar Symposium IRS 2018, June 20–22 2018, Bonn, Germany. Bonn, German Institute of Navigation (DGON), 2018, pp. 1487–1493.
11. Bezuglov A. V., Verem'ev V. I., Kutuzov V. M. Decimeter Radar for Coastal Waters Monitoring. *Morskije informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Marine Information Management Systems]. 2018, no. 1 (13), pp. 60–66. (In Russ.)
12. Barkhatov A. V., Verem'ev V. I., Rodionov V. A., Kupriyanov S. V. The Concept of Building Shortwave Radar Stations with Remote Reception and Use of Signals From Own and Third-Party Radiation Sources to Illuminate the Marine Environment. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied Hydrophysics]. 2015, vol. 8, no. 4, pp. 50–54. (In Russ.)
13. Brown W., Gangopadhyay A., Bub F., Zhitao Yu. An Operational Circulation Modeling System for the Gulf of Maine/Georges Bank Region. Part I: Basic Elements. IEEE J. of Oceanic Engineering. 2007, vol. 32, no. 4, pp. 807–822. doi: 10.1109/JOE.2007.895277
14. Lermusiaux P. F. J. Adaptive Modeling, Adaptive Data Assimilation and Adaptive Sampling. *Physica D*. 2007, vol. 230, iss. 1–2, pp. 172–196. doi: 10.1016/j.physd.2007.02.014
15. Robinson A. M., Wyatt L. R. A Two-Year Comparison between HF Radar and ADCP Current Measurements in Liverpool Bay. *J. of Operational Oceanography*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 33–45. doi: 10.1080/1755876X.2011.11020121

Vladimir I. Veremyev – Cand. of Sci. (Engineering) (2000), Director of the Research Institute "Prognoz". The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: complex ecological monitoring, complex questions of the radar systems design, multiband multistatic radars for air space and sea surface surveillance.
E-mail: vervladiv@gmail.com

Vladimir M. Kutuzov – Dr. of Sci. (Engineering) (1997), Head of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: radar systems design for sea surface surveillance.
E-mail: vmkutuzov@etu.ru

Katsiaryna S. Plotnitskaya – 2nd year student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Area of expertise: radar recognition.
E-mail: katya.plotnitskaya@yandex.ru

Valery V. Kovalenko – Cand. of Sci. (Engineering) (1978), Leading Researcher of Institute of IO RAS. Author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: management-information systems; operational oceanography.
E-mail: hydrophys@mail.ru

Viktor A. Telegin – Cand. of Sci. (Physics and Mathematics) (1984), Senior Researcher of IZMIRAN. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: the study of the heterogeneity of the ionosphere; creation of radar systems for monitoring the state of the ionosphere and the sea surface; issues of building radar systems; development of monitoring systems for sea waves and currents.
E-mail: telvika@gmail.com
