

## **Методы оценки батиметрии в прибрежных районах по данным радиолокационного зондирования водной поверхности\***

**А.В. Безуглов, В.И. Веремьев, Н.В. Гоголев**

### **Аннотация**

В докладе рассматриваются возможности дистанционного измерения батиметрии в прибрежных районах по анализу отраженного от взволнованной морской поверхности радиолокационного сигнала. Приводятся предложения по практической реализации рассматриваемых методов.

### **Methods for estimating bathymetry in coastal areas based on the water surface radar sensing**

**A.V. Bezuglov, V.I. Veremjev, N.V. Gogolev**

### **Abstract**

The possibilities of bathymetry remote measurement in the coastal areas based on analysis of reflected from the ruffled sea surface radar signal are considered. Suggestions on the practical realization of these methods are given.

Гидродинамические процессы, происходящие в мелководных акваториях, вызывают постоянное смещение грунта и эрозию морского дна, что приводит к изменению его рельефа и, соответственно, карты глубин. Это требует постоянного проведения измерений для планирования дноуглубительных работ в районах прохождения фарватеров в прибрежных зонах судоходства.

Морфодинамические процессы в прибрежных областях, определяющиеся течениями и динамикой морского состояния, приводят к перемещению осадка вдоль песчаных морских уровней. С другой стороны, эти процессы сами находятся под влиянием изменений фактической батиметрии. Непрерывное наблюдение за областями высокой морфодинамической деятельности важно, чтобы избежать или, по крайней мере, предупредить воздействия, связанные с изменениями или потерей информации о рельефе дна.

Исследования показали, что наибольшую скорость частицы наносов имеют в самой верхней прибойной зоне - зоне контакта с берегом. В ней происходят интенсивное разрушение береговой черты и перемещение обломочного материала на глубину. Процессы разрушения берега, его размыва делятся до тех пор, пока отток обломочного материала в глубинную часть берегового склона не будет полностью компенсирован его поступлением из зоны аккумуляции (рис. 1). Так вырабатывается профиль равновесия.

Каждому начальному уклону соответствует свой профиль равновесия. Выработка такого профиля осложняется при косом подходе волн к берегу. В этом случае на формирование профиля равновесия образующимся вдольбереговым потоком наносов влияет не только начальный профиль дна в данном месте, но и извилистость берегов, интенсивность шторма, направление волн относительно береговой черты. Поэтому практически после каждого шторма происходит изменение рельефа дна берегового склона.

---

\* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы" (гос. контракт № П1114 от 26.08.2009).

Например, средний шторм силой 4 - 5 баллов и продолжительностью около суток вызывает на Черноморском побережье Кавказа перемещение гальки на расстояние 150 - 200 м. При штормах большой силы общее количество перемещенного материала резко возрастает. В этом же районе объем перемещенного через поперечное сечение берегового склона за сутки материала составляет до 1700 кубических метров.

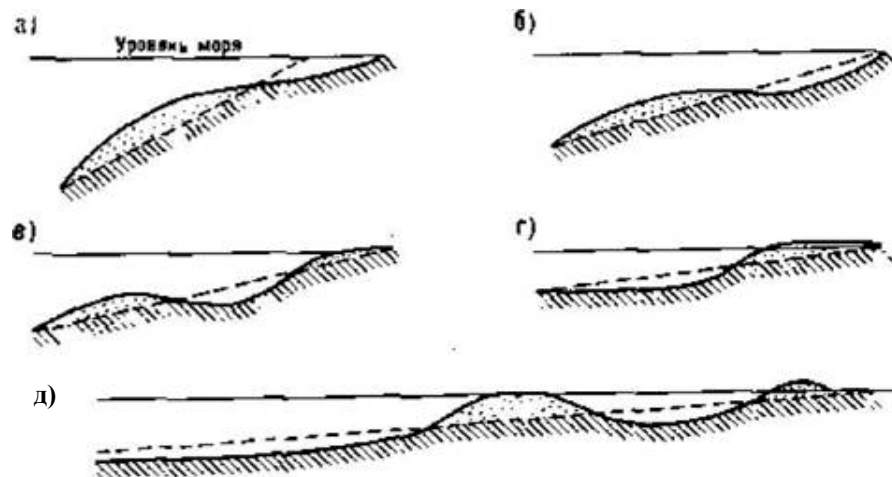


Рис. 1. Выработка профиля равновесия при различных начальных уклонах дна: а - большой уклон; б, в, г - промежуточные уклоны; д - малый уклон.

В естественных условиях за тысячелетия штормового взаимодействия моря и берега природа выработала установившийся режим движения наносов и рельеф дна. Этим с успехом пользуются гидрографы и судоводители.

Но нарушения естественного режима наносов ведут к тяжелым последствиям. Достаточно часто морские порты строятся на открытых морских побережьях. При этом для защиты подходных каналов и портов от волнения возводят оградительные молы или волноломы. Эти сооружения вторгаются в естественный процесс движения наносов, что нередко приводит к размыву одних и нарастанию других участков берега, отложению наносов на дне портов и в подходных каналах.

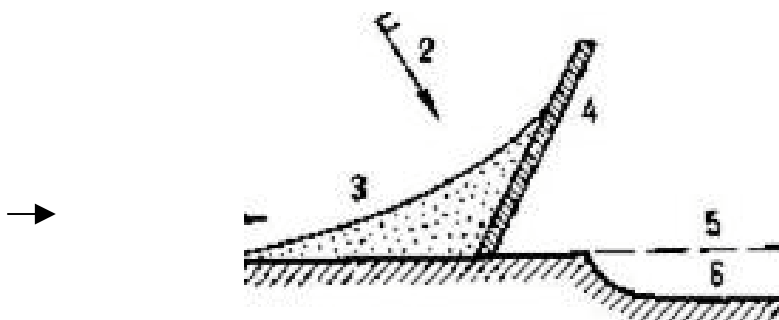


Рис. 2. Изменение берега после возведения мола при крупных наносах: 1 - направление потока наносов; 2 - направление господствующего ветра; 3 - зона аккумуляции наносов; 4 - мол; 5 - линия берега до возведения мола; 6 - зона размыва.

При явно выраженном потоке крупнозернистых наносов, которые перемещаются вблизи уреза, строительство мола, ориентированного примерно перпендикулярно берегу, вызовет аккумуляцию наносов у мола со стороны их

движения и размыв берега - с противоположной стороны (рис. 2). Зачастую наносы быстро заполняют «карман» между молом и берегом и начинают засыпать подходной канал, на котором после этого приходится систематически проводить ремонтное дночерпание. Еще хуже обстоит дело, когда наносы не только заполняют угол между молом и берегом, но и способствуют быстрому выдвигению линии берега к голове мола. При этом порт может оказаться полностью занесенным.

Процессы у берегов, сложенных мелкими песками, протекают еще более интенсивно и захватывают большую зону. На отмелях побережьях перемещение песчаных наносов происходит под действием волнения и течений на широком участке; оно прослеживается до глубин, превышающих трехкратную глубину забурунивания. Поэтому в таких районах ограждающие молы обычно выводят далеко в море, что, однако, не предохраняет берег от размыва и намыва.

Движение наносов в прибрежной зоне моря происходит также под действием течений. Постоянные плотностные или дрейфовые течения обычно обладают скоростями, недостаточными для движения донных наносов. Среди причин природного характера, влияющих на изменения донного рельефа, следует отдельно отметить штормовые ветра, наводнения, прохождение тающих льдов. Последние характеризуются повышенной динамикой развития, и их последствия практически неопишуты прогностическими моделями.

Непрерывное наблюдение за состоянием прибрежных акваторий важно как для контроля опасных явлений, так и текущей батиметрии. Поэтому существует большая потребность в дистанционных методах контроля, позволяющих определять важнейшие гидрографические параметры с высоким пространственным разрешением.

В стратегии контроля структуры состояния прибрежной акватории должны быть синтезированы многочисленные источники данных, которые могли бы быть использованы государственными структурами для осуществления экологического контроля, предупреждения ЧС, управления движением судов, предотвращения террористических актов [5].

В настоящее время основным методом батиметрического контроля является гидроакустическое зондирование с применением гидролокаторов. Измерение карты глубин современными эхолотами требует наличия судна, с которого производятся измерения непосредственно в каждой отдельной точке. Поскольку стоимость построения реальной карты глубин на больших акваториях, в которых осуществляется интенсивное судоходство, а также временные затраты на проведение полномасштабных измерений очень велики, такие работы осуществляются с малой регулярностью, недостаточной для оперативного изменения лоцманских карт. Это не позволяет адекватно оценивать морфодинамику гидрографических процессов при локальных во времени и пространстве ситуациях, связанных, например, со штормовыми явлениями, наводнениями, перемещением льда и др. Следует подчеркнуть, что в большинстве случаев эти процессы могут приводить к изменению структуры и рельефа дна.

Эти проблемы особенно актуальны для северо-западных и восточных акваторий России, поскольку эти регионы наиболее подвержены сложным циклоническим процессам, сопровождающимся большим количеством ураганных ветров, наводнений, которые приводят к быстрой эрозии дна и возможным серьезным изменениям его рельефа иногда даже в очень короткие временные промежутки.

Можно в качестве примера привести ряд аварий, основными причинами которых были расхождения в информации о глубинах и рельефе дна, содержащейся в лоцманских картах, с реальным состоянием фарватера.

В сентября 2003г в Финском заливе село на мель судно "Омский-137" с грузом леса на борту. В результате аварии пробиты четыре балластных бака сухогруза. В июле

2003г в Финском заливе сел на мель танкер "Охта", перевозивший 4,6 тыс. тонн мазута. В 2007г в Финском заливе сел на мель греческий танкер Prorontis с российской нефтью. В декабре 2005г в четырехстах метрах от Кронштадта сел на мель буксир типа «Ярославец». В октябре 2008г в Финском заливе сел на мель теплоход "Лотос". Это лишь некоторые инциденты, их перечень можно было бы продолжить.

Следует также отметить и активизация транспортировки нефтепродуктов судами и связанную с ней проблему увеличения рисков загрязнения акватории, что требует применения комплексных мер для их снижения, в том числе и совершенствование технического обеспечения безопасности мореплавания.

Гидролокационные средства (например, российский гидроакустический комплекс АГКПС-200, зарубежные системы ATLAS FANSWEEP 20, Sea Beam 1000), позволяющие осуществлять обзор подводного пространства, недостаточно эффективно работают на мелководье и при малых углах зондирования имеют низкую точность измерения глубин.

Согласно Инструкции ТК "Морфлот" от 17.06.2004 N 16\*РД 31.74.04-2002 "Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним", регламентирующей, в частности, периодичность проведения глубопромерных работ, последние рекомендуется проводить 1-2 раза в год, что, конечно же, не дает возможности оперативно оценивать текущую батиметрию.

Для преодоления вышеупомянутых проблем предлагается использовать методы дистанционного измерения глубин по анализу отраженного от взволнованной морской поверхности радиолокационного сигнала, в спектре которого содержится информация о глубине. Такие методы способны осуществлять батиметрию в мелководных акваториях дистанционно, охватывая во время локальных замеров, область радиусом до 1-1,5 км, что позволяет значительно сократить время и стоимость работ по сравнению с применяемыми технологиями измерений, а это в свою очередь дает возможность увеличить частоту регулярных периодических измерений, а также позволяет проводить оперативную корректировку информации о состоянии дна после наводнений, сильных штормов, ледохода и других природных явлений, оказывающих определяющее влияние на кратковременную донную эрозию.

Поскольку характеристики морских поверхностных волн во многом определяются глубиной акватории и течением, предлагается использование этих зависимостей, которые физически описываются отношениями дисперсии поверхностных морских волн, в качестве информативных параметров.

В мелких водах, где глубина намного меньше, чем длина главной волны, определяющей морское состояние, волновое поле становится неоднородным из-за меняющейся батиметрии. Локальные изменения волнового поля содержат информацию о локальной батиметрии и поверхностных сдвигах, что используется при расчетах. Для вычисления батиметрии используются главным образом длинные волны с высокой степенью направленности.

Зависимость состояния морской поверхности от глубины выражается дисперсионной зависимостью [4]:

$$\omega(\vec{k}) = \pm \sqrt{g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d)} + \vec{k} \cdot \vec{u}_c \quad (1)$$

где  $g$  – гравитационное ускорение,  $d$  – глубина,  $\vec{u}_c$  – скорость поверхностного течения,  $k$  – волновое число,  $\omega$  – угловая частота.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot T^{-1},$$

$k = 2 \cdot \pi \cdot \lambda^{-1}$ ,  $T$  и  $\lambda$  – период и длина волны соответственно.

В (1) первый член выражения - собственная (характерная) частота  $\omega_c = \pm \sqrt{g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d)}$ , второй член - частота Доплера  $\omega_D = \vec{k} \cdot \vec{u}_c$ . Частота Доплера  $\omega_D$  характеризует скорость поверхностного течения. В общем случае, волны, длиннее 0,1 м, называют гравитационными волнами. Глубина  $d$  и поверхностное течение, будучи независимыми параметрами, влияют на форму раковины дисперсии в области частоты волнового числа  $\Omega$ . Поэтому форма раковины дисперсии может использоваться, чтобы определить эти параметры.

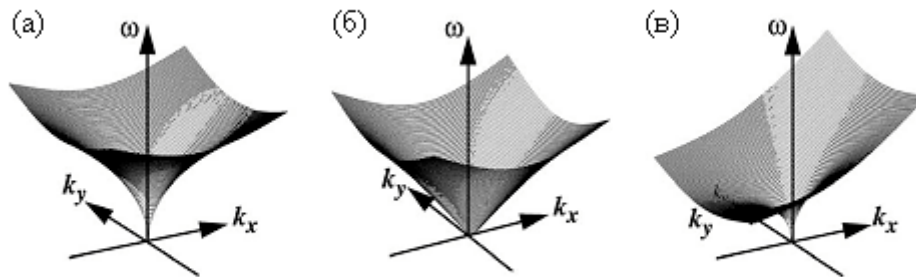


Рис. 3. Дисперсионная зависимость поверхностных гравитационных линейных волн в 3-D частотной области. а - характерная глубоководная раковина дисперсии; б - характерная мелководная раковина дисперсии; в - глубоководная раковина дисперсии, имеющая доплеровское смещение под влиянием поверхностного течения.

Дисперсионную зависимость можно представить в виде раковины в 3-D области. Характерная раковина дисперсии симметрична относительно оси вращения (рис. 3 (а)).

Характерная дисперсионная зависимость имеет два решения, а именно  $\omega_c^-$  и  $\omega_c^+$ . Эти решения обладают избыточностью, которая является следствием симметричного признака  $\omega_c^- = \omega_c^+$  из преобразования Фурье, поэтому для описания энергии волны в области  $\Omega$  необходимо только одно решение.

При наличии поверхностного течения происходит доплеровское смещение частоты. Если течение направлено против движения волн, абсолютная частота (в инерционной системе координат наблюдения) волны уменьшается (и наоборот). Деформация дисперсионной зависимости, вызванная эффектом Доплера, показана на рис. 3 (в).

Для глубоководных волн, которые определены условием  $d \gg \lambda$ , справедливо приближение  $\tanh(kd) \approx 1$ . Предполагая, что течение отсутствует, решение для глубоководной волны следующие:

$$\omega_c^+(k) = \sqrt{g \cdot k}.$$

В мелких водах, где  $d$  является маленьким по сравнению с  $\lambda$ , мелководная дисперсионная зависимость

$$\omega_c^+(k) = k\sqrt{g \cdot d}$$

Деформация дисперсионной зависимости, вызванная изменением водной глубины, проиллюстрирована на рис. 3 (б).

Рассмотрим один из разработанных в процессе исследований алгоритмов, в основе которого лежит анализ последовательности радиолокационных изображений динамических дисперсионных границ для определения гидрофизических параметров в локальном пространственном масштабе.

Метод, заложенный в данном алгоритме, осуществляет анализ неоднородных последовательностей изображений динамической и дисперсионной поверхности и предполагает выполнение следующей последовательности действий:

- 1) запоминание и сохранение комплексного спектра 3-D FFT изображения;
- 2) фильтрация комплексного спектра для выделения сигнальной волны на фоне шума;
- 3) направленное и дисперсионное разделение комплексного спектра на спектральные отсчеты в 2-D плоскости волновых чисел при фиксированной частоте;
- 4) двумерное обратное преобразование Фурье спектральных отсчетов, замещающее комплексные однокомпонентные пространственные карты в пространственно-частотной области;
- 5) вычисление пространственной карты локальных волновых чисел из однокомпонентных изображений при фиксированной частоте;
- 6) вычисление 3-D спектров из однокомпонентных локальных карт волновых чисел при фиксированной частоте;
- 7) построение пространственных карт гидрографических параметров на основе локальных 3-D спектров.

Этот алгоритм использовался применительно к последовательностям изображений поверхностных волн в прибрежных водах, полученным навигационными радаром СВЧ-диапазона. Алгоритм выдает результаты в форме пространственных карт гидрографических параметров (т. е. пространственных карт водной глубины и поверхностного течения). Пример полученной карты представлен на рисунке 4.

В настоящее время у нас в стране не существует радиолокационных средств, предназначенных непосредственно для решения батиметрических задач. Исследования по созданию таких систем проводятся некоторыми зарубежными организациями, в частности, Научно-исследовательским центром GKSS (Германия), в работах которого в течении последних лет принимали участие авторы доклада [1-4]. В процессе совместных исследований была заложена теоретическая база, которая легла в основу разработки батиметрических алгоритмов, базирующихся на получении информации о глубине по данным радиолокационного зондирования поверхностных морских волн.

В процессе практической реализации результатов исследований были разработаны опытные измерительные радиолокационные системы для измерения батиметрии, осуществлены натурных испытания, часть из которых проводилась на Финском заливе в рамках международного гранта “Гидрографический мониторинг Невской Губы” «HYMNE» (Грант Европейского Союза). При моделировании и апробации разрабатываемых алгоритмов используются радиолокационные записи сигналов, полученных в результате проведения совместных работ в Северном и Балтийском морях.

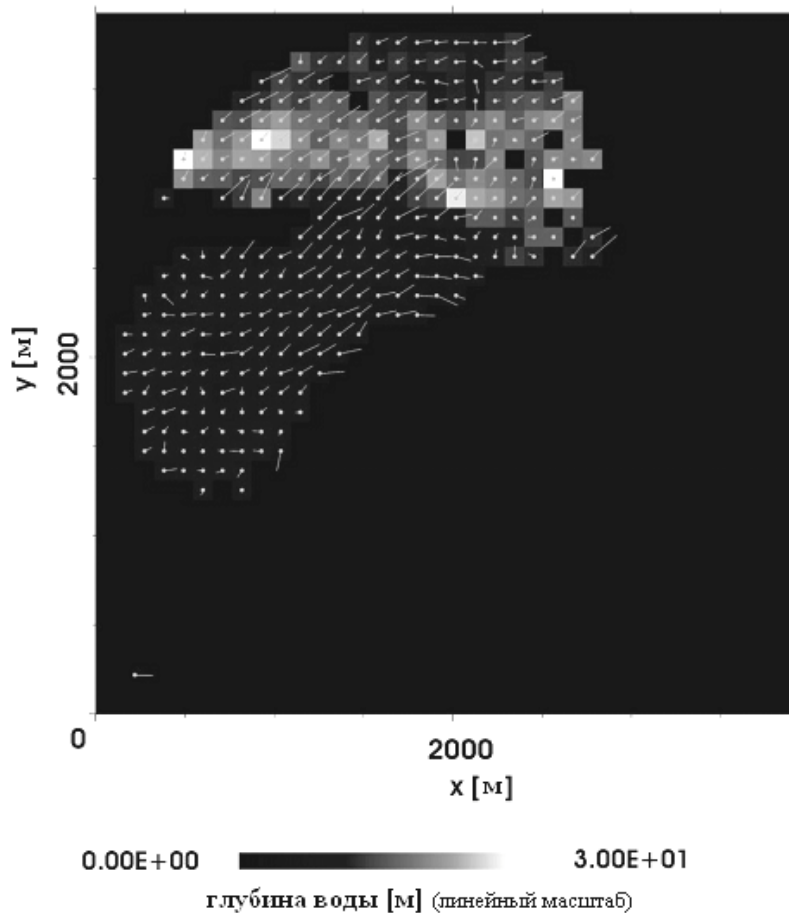


Рис. 4 - Карта батиметрии и векторов течений, определенные по последовательности изображений, остров Зюльт (Северное море) [4]

К настоящему времени авторами осуществлены многочисленные наработки, связанные с вопросами комплексного построения радиолокационных систем различного назначения, экологического радиолокационного мониторинга, разработкой и практической реализацией алгоритмов обработки сигналов, которые могут быть реализованы в процессе решения данной проблемы.

В процессе исследований рассмотрены теоретические основы предлагаемых методов, разрабатываются новые алгоритмы обработки радиолокационной информации, предлагаются принципы технической реализации разработанных методов и алгоритмов. При этом предполагается использовать в качестве аппарата измерений существующие навигационные РЛС с соответствующей доработкой в части устройств обработки сигнала.

Исходными данными для расчетов и построения карты глубин являются радиолокационные изображения, полученные так же, как и в обычном радиолокационном индикаторе в полярных координатах в виде набора стробов оцифрованного отраженного от морской поверхности сигнала с привязанными данными об угле поворота антенны, а так же курс судна и его координаты.

Именно в таком виде получают данные электронные картографические системы от радара и внешних навигационных источников данных.

Радиолокационные данные поступают от радарного процессора, который подключен непосредственно к радару и преобразует аналоговый сигнал радар в цифровой вид, после чего преобразованные данные поступают в компьютер.

Пример изображения на экране картографической системы с нанесенным радарным изображением приведен на рис. 5.

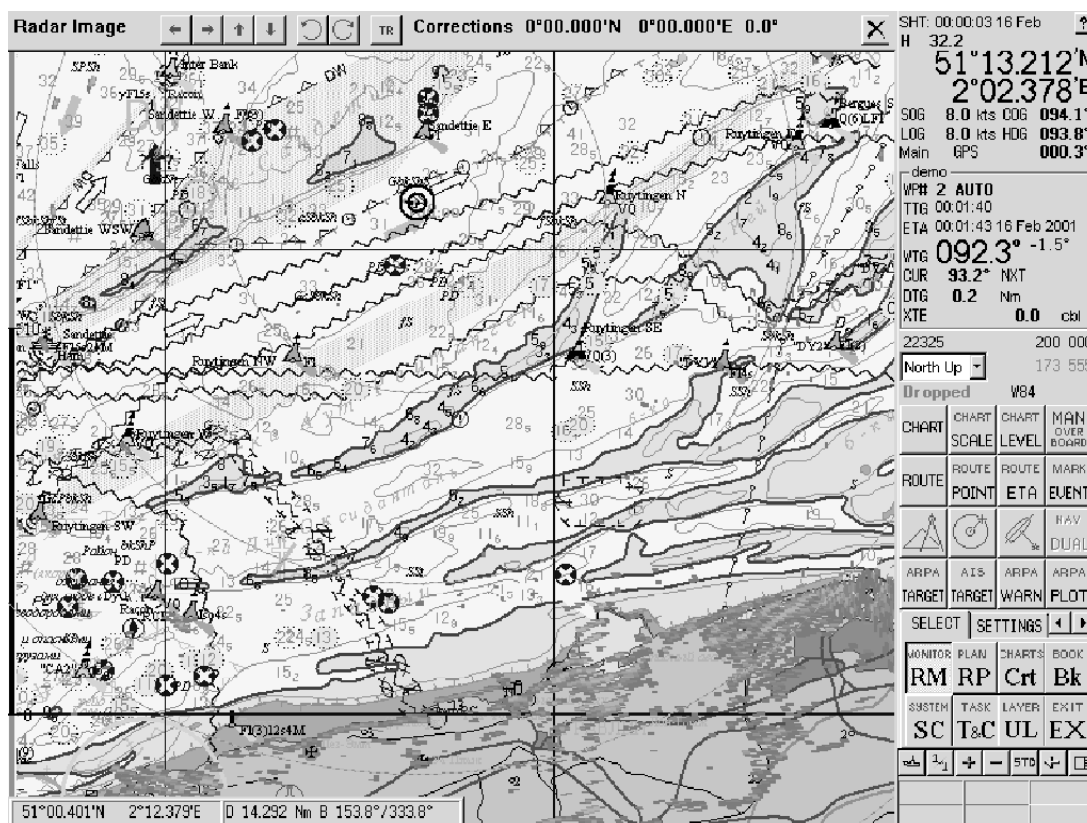


Рис. 5 Изображение на экране картографической системы

Информация о глубинах указана на морской карте. Но, очевидно, данные карты могут перестать соответствовать действительности, и, главное, существует большое количество районов, где подробных промеров глубины нет. Нанесение на электронную карту глубин, данные о которых получены в реальном времени непосредственно по текущим измерениям, существенно повысят безопасность мореплавания. Исследуемые алгоритмы позволяют оценивать глубины локально, непосредственно вблизи корабля, на дальностях до 1-1,5 км. Именно до такой дальности устойчиво наблюдаются отражения от морской поверхности радиолокационными станциями СВЧ-диапазона, несущие в себе информацию о глубине.

Результаты исследований могут быть оформлены как описания алгоритмов или программная библиотека, которая включается в состав электронной картографической системы.

Разработанные методы и алгоритмы могут быть интегрированы в навигационные картографические системы с радарным оверлеем, либо стать основой самостоятельного программного продукта построения карт глубин в прибрежных акваториях, в частности, в районах прохождения фарватеров.

Результаты оценки рельефа дна и прогнозирования динамики его изменения предложенными методами предполагаются к использованию службами управления судоходством для повышения безопасности судоходства.

### Список литературы

1. Hatten, H., Seemann, J., Bezuglov A., Veremjev, V., and F. Ziemer, Determination of the sea surface current field out of the Doppler shift of the radar backscatter under grazing



incidence, Oceans"2000, Conference Proceedings, Volume I, pp. 549-554, Rhode Island, USA, 2000.

2. Determination of the near surface current field from Doppler shift of the coherent radar backscatter under grazing incidence Authors: H. Hatten, J. Seemann, C.M. Senet, A. Bezuglov, V. Veremjev, F. Ziemer Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. 02/2000; 2:899-901 vol.2.

3. Sea-Surface Current Features Observed by Doppler Radar Authors: N. Braun, F. Ziemer, A. Bezuglov, M. Cysewski, G. Schymura Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. 05/2008; 46(4):1125-1133.

4. Christian M. Senet, Joerg Seemann, Stylianos Flampouris, and Friedwart Ziemer. Determination of Bathymetric and Current Maps by the Method DiSC Based on the Analysis of Nautical X-Band Radar Image Sequences of the Sea Surface (November 2007) // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 46, no. 8, august 2008. - С 2267-2279.

5. В.И.Веремьев, А.А.Коновалов, В.Н.Михайлов, А.Г.Попов. Принципы построения многофункциональных радиолокационных комплексов мониторинга ЧС и прогнозирования состояния акваторий северных морей. XVI международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 13-15 апреля 2010 г. – Том 3. – С. 1744-1751.

#### Сведения об авторах



**Веремьев Владимир Иванович.** Родился в 1963 г. Окончил Ленинградский Электротехнический институт (ЛЭТИ) в 1986 г. Кандидат технических наук с 2000 г. Директор НИИ систем мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций “Прогноз”, в.н.с. Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

**Сфера научных интересов:** комплексные вопросы построения радиолокационных систем, комплексы для мониторинга воздушного пространства и морской поверхности. Автор свыше 50 работ.

E-mail: : [ver\\_vi@mail.ru](mailto:ver_vi@mail.ru)



**Безуглов Александр Владимирович.** Родился в 1966 г. Окончил Ленинградский Электротехнический институт (ЛЭТИ) в 1989г. Кандидат технических наук с 1998 г. С.н.с. Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

**Сфера научных интересов:** комплексные вопросы построения радиолокационных систем, цифровая обработка сигналов. Имеет более 10 печатных трудов.

E-mail: : [Alexander.Bezuglov@gmail.com](mailto:Alexander.Bezuglov@gmail.com)



**Гоголев Никита Владимирович.** Родился в 1988 г. Учащийся магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Сфера научных интересов: комплексные вопросы радиолокации.