

## Применение доплеровского КВ-радиолокатора для исследования пространственной структуры течений в Черном море

© 2017 В.В. Горбачкий<sup>1</sup>, К.Д. Сабинин<sup>2</sup>, В.А. Телегин<sup>3</sup>,  
А.Г. Зацепин<sup>4,\*</sup>, С.Б. Куклев<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Акустический институт им. Н.Н. Андреева, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*E-mail: zatsepin@ocean.ru

<sup>5</sup>Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия

Поступила в редакцию 06.06. 2016 г. После доработки 20.06.16 г.

Представлены результаты измерений пространственной структуры течений с использованием одного доплеровского коротковолнового радиолокатора *SeaSonde* (рабочая частота 25 МГц) в акватории Черного моря, прилегающей к г. Геленджик. Измерения проводились с применением специальной методики последовательных измерений в двух выбранных точках береговой линии. Сначала измерения выполняются в первой из двух выбранных точек берега на протяжении двух часов. Затем радиолокационная система переносится во вторую точку берега, где измерения проводятся таким же образом. При этом полагается, что поле скорости остается неизменным на протяжении суммарного (с учетом переезда) периода измерения из обеих точек. Результаты измерений показаны в виде пространственной карты векторов скоростей течений в наблюдавшейся области с размерами 20 × 20 км. Выявлены некоторые характерные особенности пространственно-временной изменчивости течений в прибрежных водах. В частности, обнаружены вихревые образования диаметром в несколько километров, которые быстро перемещаются и разрушаются. Поскольку подобные же вихри обнаруживаются при использовании контактных методов измерения, сложная и изменчивая структура поверхностных течений, измеренных радаром не представляется артефактом. Тем не менее достоверность данных, полученных при радиолокационном измерении поля скорости поверхностного течения, в дальнейшем должна быть проверена путем их сопоставления с результатами квазисинхронных измерений поля скорости, выполненных с помощью стационарных, дрейфующих и буксируемых за судном измерителей скорости течения.

**Ключевые слова:** Черное море, прибрежная зона, доплеровский радиолокатор КВ-диапазона, двухточечные измерения, радиус корреляции, антенна, поверхностные течения, вихревые структуры.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-3-63-73

**Введение.** Технология измерения скорости поверхностного течения в прибрежных зонах морей и океанов с помощью доплеровских радиолокаторов (радаров) разрабатывается и используется за рубежом (в США, Канаде, Великобритании, Франции, Австралии и Японии) на протяжении почти

40 лет [1]. Различными фирмами выпускаются доплеровские радары КВ-диапазона (например, *SeaSonde* фирмы *CODAR Ocean Sensors*, США [2], и *WERA* от *Helzel Messtechnik GmbH*, Германия [3]), позволяющие измерять скорость поверхностных течений в прибрежной зоне от 0,5 – 5 до 20 – 200 км от берега с пространственным разрешением 0,5 – 5 км в зависимости от диапазона рабочей частоты и дальности измерений. При наличии многих разнесенных вдоль берега радаров удается восстанавливать поле скорости поверхностных течений в протяженной вдоль берега полосе моря, как это делается, например, в Калифорнии, США [4].

В настоящее время доплеровские радиолокационные системы действуют во многих странах, чтобы контролировать течения и ветровое волнение в прибрежных районах океана и внутренних морей. Постоянные наблюдения за водной поверхностью с помощью таких систем позволяют предупреждать о приближении цунами, обеспечивать безопасность проведения морских операций в акваториях освоения морского шельфа. Применение доплеровских радаров повышает эффективность мероприятий по борьбе с последствиями аварийных ситуаций в местах нефтяных разливов. В Соединенных Штатах Америки такие приборы широко используются Береговой охраной США в чрезвычайных ситуациях при проведении поисковых и спасательных операций в прибрежных акваториях океана, для чего создана сеть доплеровских радаров вдоль восточного и западного побережий страны.

К сожалению, приходится отметить, что в России не развита радарная технология исследований морских гидродинамических процессов и не производятся доплеровские радиолокаторы КВ-диапазона, предназначенные для измерения скорости поверхностного течения в морских акваториях. Описанная в статьях [5, 6] работа над созданием российского КВ-радаров заморозена из-за отсутствия финансирования. При этом очевидно, что проведение постоянных радиолокационных наблюдений в таких районах, как прибрежные акватории Черного моря, имеет не только научное, но и большое практическое значение. В частности, результаты могут быть использованы для решения задач оперативной океанологии (прогноз развития опасных гидродинамических процессов, экстремальных волнения и течения и предупреждение связанных с ними возможных аварийных ситуаций); экологических задач (регистрация и прогноз распространения аварийных разливов нефтепродуктов); для наблюдения и предупреждения опасной метеорологической обстановки на море (смерчей, грозовой облачности) и в других целях.

В отечественной практике морских исследований на протяжении ряда лет (2005 – 2009 гг.) измерения поверхностных течений с использованием доплеровского радиолокатора *SeaSonde* (рабочая частота 25 МГц) выполнялись в Балтийском море (район Куршской косы [7]), в Карском море с борта судна [8]. Однако указанные исследования носили эпизодический характер и не были направлены на изучение специальных гидрофизических процессов, существенных для прибрежных акваторий. В данной работе представлены результаты измерений поверхностных морских течений в Черном море, ранее обнародованные лишь в докладе [9].

**Условия проведения измерений и их методика.** Измерения скорости поверхностных течений проводились с помощью одного доплеровского

радиолокатора *SeaSonde* в районе Геленджика 19 – 21 октября 2010 г. Такие измерения позволяют получать радиальные (вдоль лучей, исходящих из точки положения антенн радиолокатора) компоненты скоростей течений. Для прямого измерения полных векторов скорости течений требуется использование радиолокаторов, располагающихся в двух и более точках береговой линии обследуемой акватории. В данном случае применена использованная в работе [7] методика измерений, позволяющая выполнять оценки векторов скорости течения в конфигурации одноточечной измерительной системы. До начала измерений предварительно исследовалось, как влияют на принимаемый сигнал расположение антенн радиолокатора в различных точках берега, прилегающего к обследуемой акватории Черного моря, и высота установки антенн над уровнем моря (на уровне моря, на высотах 4, 20 и 60 м над уровнем моря), а также как отражались на качестве сигнала деревья, кустарники, металлический парапет. В результате выбрано положение антенн, обеспечивающее оптимальную по размерам и положению область регистрации течений и высокое качество их измерения.

Подробные технические характеристики доплеровского радиолокатора *SeaSonde* представлены в работе [7]. Здесь перечислим лишь основные из них, необходимые для понимания методики проведения работ: рабочая частота – 25 МГц, пространственное разрешение – 0,75 км, количество ячеек измерения вдоль каждого луча – 32, угловое расстояние между лучами радиолокатора, вдоль которых определяются радиальные компоненты скоростей течений, – 5°, дальность зондирования ~ 22 км (ограничивается значением солености воды в акватории ~ 18 ‰).

При проведении измерений был реализован метод с последовательным использованием одного радиолокатора в двух разнесенных точках берега. Суть метода заключается в следующем.

На предварительном этапе установки радиолокационных антенн определяются береговые точки, отвечающие нижеперечисленным критериям:

- 1) удаление от уреза воды не более 100 м;
- 2) максимальная открытость морского горизонта для распространения радиоволн (отсутствие мысов, возвышений рельефа местности, искусственных сооружений и прочих препятствий);
- 3) максимально возможная область пересечения зон радиолокации, беспрепятственно покрываемых с выбранных береговых точек;
- 4) удобные подъезды на автотранспорте, обеспечивающие минимально возможные затраты времени при перемещении из одной точки измерения в другую.

Сначала измерения выполняются в первой из двух выбранных точек берега на протяжении 2 ч. Затем радиолокационная система переносится во вторую точку берега, где измерения проводятся таким же образом. При этом полагается, что поле скорости остается неизменным на протяжении суммарного (с учетом переезда) периода измерения из обеих точек. Полученные радиальные (по направлению излучения локатора) составляющие поверхностного течения обрабатываются с использованием специального программного обеспечения *HFRadarmap* на языке *Matlab*, которое распространяется свободно в Интернете (URL: <http://www.oc.nps.edu/~radlab/HFRadarmapToolbox/>).

Полные вектора поверхностных течений находятся сложением радиальных векторов, полученных из двух различных точек.

В описываемом эксперименте для транспортировки радиолокационной системы между точками установки антенн на береговой линии использовался микроавтобус УАЗ высокой проходимости, в салоне которого было размещено измерительное оборудование (рис. 1, а). На рис. 1, б можно видеть установку излучающей и приемной антенн в одной из точек проведения измерений. На рис. 2 представлена карта района, в котором 19 – 21 октября 2010 г. проводились измерения с указанием положения всех точек установки радиолокатора.



**Рис. 1.** Размещение измерительного оборудования в микроавтобусе (а) и пример расположения радиолокационных антенн на береговой линии (б)



**Рис. 2.** Расположение точек установки радиолокационных антенн на береговой линии при измерениях 19 – 21 октября. Точки А1 и А2 – 19 октября, точки В1 и В2 – 20 октября, точки В1 и В2 – 21 октября

В первый день измерений, 19 октября, точка А1 располагалась непосредственно на берегу Голубой бухты на высоте 4 м (высота антенн) над уровнем воды. При этом радиолокационный обзор был ограничен мысом с западной стороны бухты. Преимуществом данной точки является простой и быстрый доступ к ней для установки радара. Именно поэтому она использовалась для первоначальной настройки системы измерений на прилегающей акватории.

В тот же день измерения производились из точки А2, находящейся на берегу моря возле Тонкого мыса Геленджикской бухты на расстоянии 3,5 км от первой точки и приблизительно на том же уровне высоты над водой. Форма береговой линии в окрестности этой точки близка к прямолинейной и локатор имеет свободный обзор прилегающей к берегу акватории в широком диапазоне углов развертки, что делает условия измерений оптимальными с точки зрения покрытия акватории. Однако оперативная установка антенн в данном месте, имеющем каменистую почву, представляет определенную трудность.

20 октября местоположение для точки В1 было выбрано на обрывистом берегу моря западнее Голубой бухты на высоте около 60 м. Данная точка обеспечивает хороший обзор для эффективной работы радиолокационной системы, однако требуется значительное время для подъезда к этой точке и транспортное средство должно иметь высокую проходимость в связи с отсутствием обхожденной дороги в горной местности.

В тот же день точка В2 находилась в 8,5 км от В1 на обрывистом берегу Толстого мыса Геленджикской бухты на высоте 20 м над уровнем моря. Эта точка имеет хороший обзор для регистрации радиальной составляющей скорости течения на всей обследуемой акватории, вместе с тем она легкодоступна для любого вида транспортного средства.

С целью изменения области обзора 21 октября точку В1 выбрали на юго-восточном берегу Голубой бухты. Точка В2 на Толстом мысе в этот день находилась на том же месте, которое было выбрано 20 октября для точки В2. При этом расстояние между точками В1 и В2 составляло 5,3 км.

Большинство выбранных точек расположения антенн радиолокатора обеспечивали хороший обзор и возможность сокращения интервала между измерениями в точках до 1,5 ч.

**Результаты измерений.** Карта радиальных составляющих скорости течения на морской поверхности, полученных системой *SeaSonde* 19 октября в точке А1 (рис. 3, а), охватывает сравнительно узкую пространственную область, что обусловлено высоким берегом Голубой бухты, ограничивающим обзор локатора в западном направлении.

На рис. 3, б представлена карта распределения радиальных составляющих скорости течения 21 октября в точке В2. Области измерения во всех точках (за исключением А1) имеют хорошее покрытие, аналогичное продемонстрированному на рис. 3, б, что позволяет получить протяженный участок пересечения областей измерений, выполненных из двух точек.

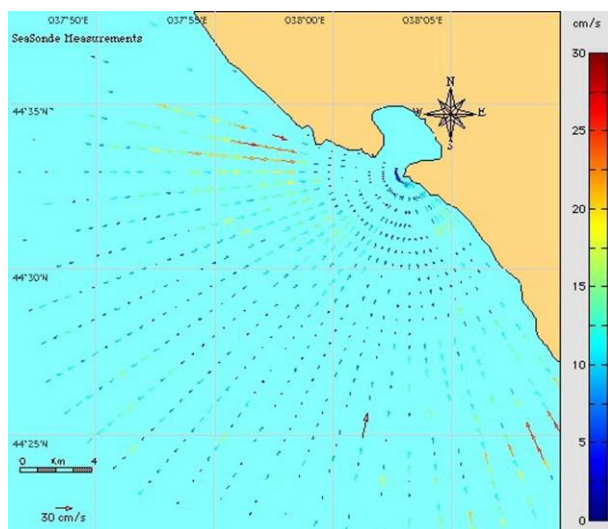
Область построения поля векторов скорости течения по данным радиолокационных измерений определяется размерами и положением области пересечения карт радиальных компонент скорости, полученных в двух смежных

точках размещения антенн радиолокатора. На рис. 4 можно видеть пример такого пересечения по данным измерений, выполненных 21 октября.

Построение поля векторов было произведено с использованием прямоугольной координатной сетки с шагом  $0,015^\circ$  по широте и долготу. На картах векторов скорости течения, датированных 19 – 21 октября, кружком соответствующего масштаба в нижнем левом углу указана область осреднения радиальных компонент скорости, попадающих в окрестность узлов координатной сетки с указанным радиусом (рис. 5).



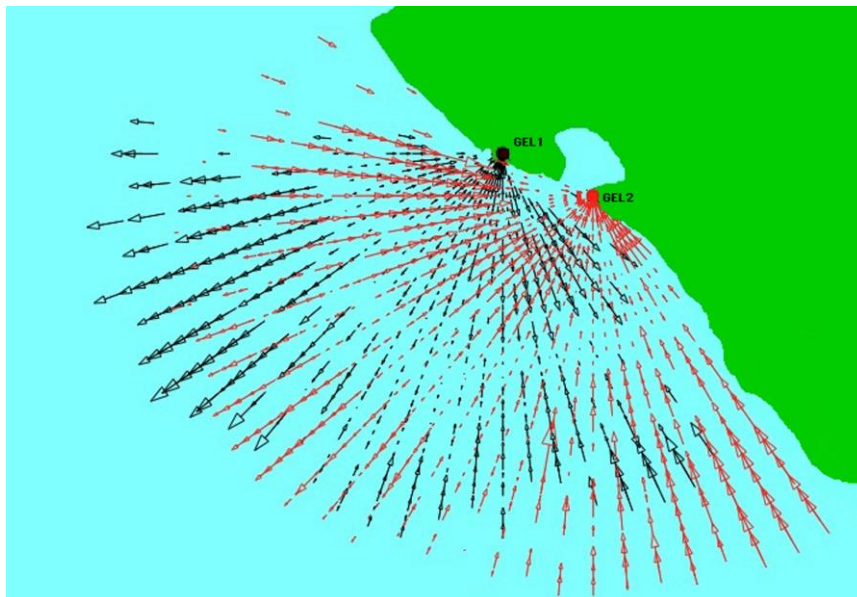
*a*



*б*

**Рис. 3.** Примеры карт радиальных компонент скорости течений 19 октября (*a*), 21 октября (*б*)

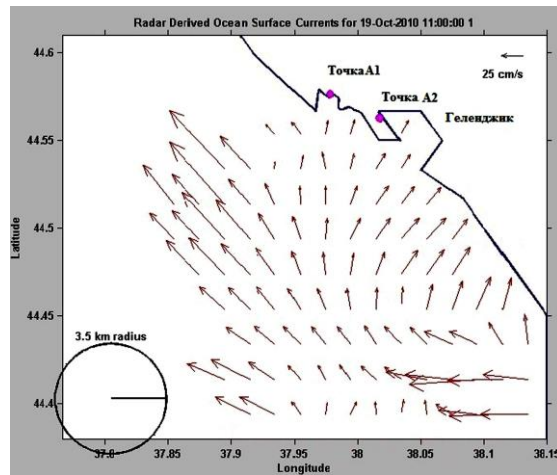
В первый день измерений, 19 октября, наблюдается сравнительно однородное по площади распределение скорости течения, отражающее общий вдольбереговой перенос вод в северо-западном направлении (рис. 5, а). Отмечается также поворот течений к берегу в прибрежной области. Скорость течения в основном составляет  $\sim 25 - 30$  см/с, однако на отдельных участках достигает 50 см/с.



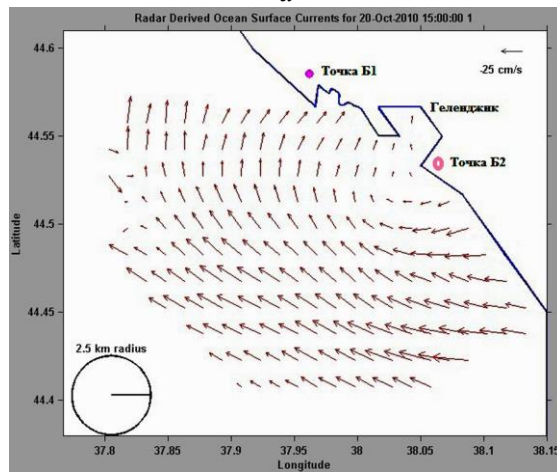
**Рис. 4.** Пример формирования области определения векторов скорости течения по наложению карт радиальных компонент скорости течения 21 октября

На карте скорости течения 20 октября отмечается наличие антициклонической завихренности (рис. 5, б). При этом скорость течения направлена преимущественно на северо-запад, а ее значение не превышает 25 см/с. Участок пересечения областей измерений, выполненных 20 октября из двух точек, на котором может быть осуществлено построение векторов скорости течения, имеет бóльшую площадь, чем участок пересечения областей измерений, выполненных 19 октября. При этом расстояние между точками расположения антенн 20 октября более чем в два раза превышает расстояние между точками измерения 19 октября, что уменьшает вероятность возникновения ошибок в определении векторов скорости течения.

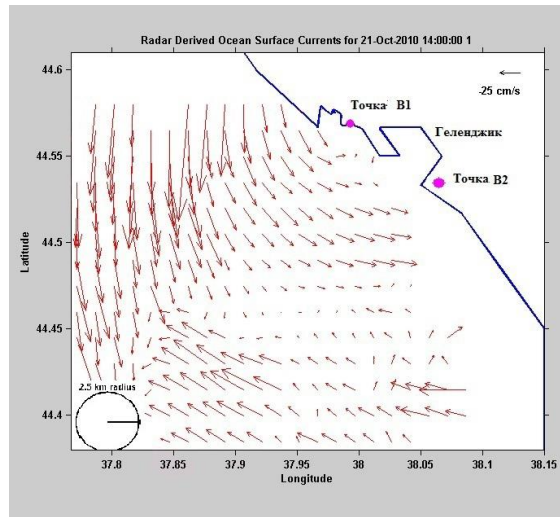
На карте течения, полученной 21 октября, область измерения имеет хорошее покрытие и содержит выраженные элементы вихревых течений (рис. 5, в). Наиболее характерными чертами данной карты являются зона конвергенции течений в средней части измеряемой области и высокие значения скорости течения южного направления (до 89 см/с) на западном участке перекрестной области. Пространственная неоднородность распределения скорости течения может быть обусловлена изменением ветровых условий в течение 3-часового интервала между измерениями в двух точках.



*a*



*б*

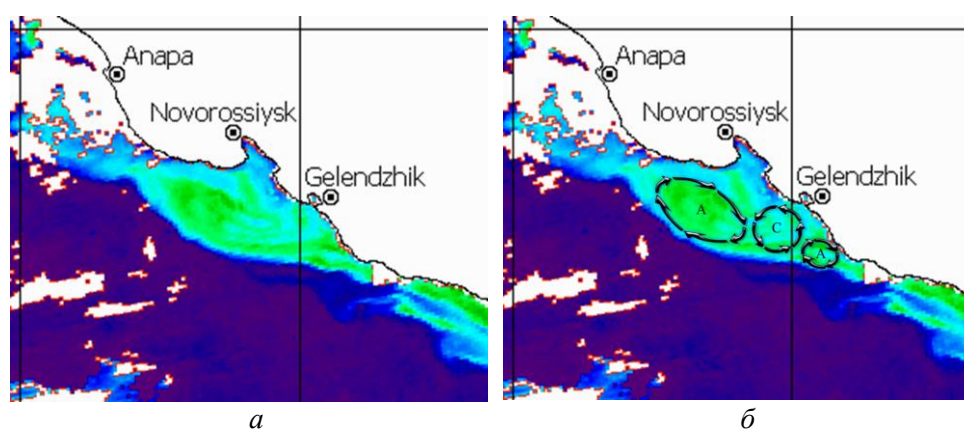


*в*

**Рис. 5.** Карты векторов скорости течения 19 октября (*a*), 20 октября (*б*), 21 октября (*в*)



Разнообразие карт полей скорости течения, полученных на протяжении трех дней радарных измерений, может поставить под сомнение их репрезентативность. Однако в период проведения этих измерений динамика вод прибрежной зоны в районе Геленджика и Новороссийска характеризовалась сложностью структуры течений и их высокой пространственно-временной изменчивостью. Определенным свидетельством этому является спутниковое изображение *MODIS-Aqua* данной акватории моря в поле взвешенного вещества от 18 октября 2010 г. (рис. 6). По мнению авторов данной работы, на этом изображении четко выделяются три вихря: антициклон А (ближе к Новороссийску), циклон С (ближе к Геленджик) и антициклон А (восточнее Геленджика), – которые формируют конвергентную структуру течения у берега и дивергентную – мористее. На рис. 6, б контуры вышеуказанных субмезомасштабных вихревых структур обозначены пунктиром, а направление вращения – стрелками. Поскольку, по данным выполненных ранее комплексных наблюдений, эти вихревые образования быстро перемещаются и разрушаются [10, 11], сложная и изменчивая структура поверхностных течений, измеренных радаром, не представляется артефактом.



**Рис. 6.** Проявления субмезомасштабных вихрей на морской поверхности в области радарных измерений 18 октября, по данным спутника *MODIS-Aqua*

**Заключение.** В период 19 – 21 октября 2010 г. в Геленджикском районе Черного моря осуществлена успешная попытка измерения поля скорости поверхностного морского течения с помощью доплеровского КВ-радар *SeaSonde*. В работе применен метод проведения радиолокационных измерений из двух смежных точек берега с помощью одного радиолокатора, последовательно перемещаемого из одной точки в другую.

Результаты измерений показали возможность получения правдоподобной структуры поля течений и ее изменчивости даже в ходе кратковременной серии оперативных наблюдений. В частности, зарегистрировано существование вихревых структур во вдольбереговых течениях. В то же время достоверность данных, полученных при радиолокационном измерении поля скорости поверхностного течения, должна быть подтверждена путем их сопоставления с результатами квазисинхронных измерений поля скорости, выполненных

с помощью стационарных, дрейфующих и буксируемых за судном систем измерения скорости течения [10, 11]. Такие сопоставительные измерения уже проводятся на Геленджикском полигоне ИО РАН в Черном море [9].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00095.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barrick D.E., Evans M.W., Weber B.L.* Ocean surface currents mapped by radar // *Science*. – 1977. – 198, Issue 4313. – P. 138 – 144. – doi:10.1126/science.198.4313.138
2. *SeaSonde Remote Unit Specifications & Configuration Options* // *Codar Ocean Sensors*: web-site. – URL: <http://www.codar.com/SeaSonde.shtml> (дата обращения: 10.05.2016).
3. *Information of HR-Radar* // *University of Hamburg HR-Radar Home Page*: web-site. – URL: <http://ifmaxp1.ifm.uni-hamburg.de> (дата обращения: 10.05.2016).
4. *Lynch D.R., Holboke M.J., Naimie C.E.* The Maine coastal current: spring climatological circulation // *Con. Shelf Res.* – 1997. – 17, Issue 6. – P. 605 – 634. – doi:10.1016/S0278-4343(96)00055-6
5. *Гарбацевич В.А., Телегин В.А., Лапшин В.С. и др.* Малогабаритная многочастотная РЛС декаметрового диапазона для мониторинга океана и ионосферы. Концепции разработки и первые результаты // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2011. – 8, № 4. – С. 100 – 106. – URL: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2011v8n4/100-106.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n4/100-106.pdf) (дата обращения: 9.05.2016).
6. *Гарбацевич В.А., Лапшин В.С., Телегин В.А. и др.* РЛС декаметрового диапазона, предназначенная для радиолокационного мониторинга природных сред // *Специальная Техника*. – 2012. – № 3. – С. 30 – 34. – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17781930> (дата обращения: 7.05.2016).
7. *Горбачкий В.В., Бабаков А.Н., Гурова Е.А. и др.* Измерение параметров прибрежных морских течений доплеровским радиолокатором CODAR SeaSonde // *Тр. XXV Всеросс. симп. «Радиолокационные исследования природных сред»*. – СПб, 2008. – С. 198 – 206.
8. *Горбачкий В.В., Гудошников Ю.П., Нестеров А.В.* Измерения течений на морской поверхности доплеровским радаром, установленным на судне // *Сб. тр. XXVII Всеросс. симп. «Радиолокационное исследование природных сред»*. – СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – С. 111 – 115.
9. *Баранов В.И., Горбачкий В.В., Дудко Д.И. и др.* Новый подход к исследованию субмезомасштабной динамики вод черноморского шельфа дистанционными и контактными методами // *13-я Всеросс. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*, Москва, 16 – 20 ноября 2015 г. – Москва: ИКИ РАН, 2015. – С. 236. – URL: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=109](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109) (дата обращения: 9.05.2016).
10. *Зацепин А.Г., Корж А.О., Кременецкий В.В. и др.* Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений // *Океанология*. – 2008. – 48, № 4. – С. 510 – 519.
11. *Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др.* Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2014. – 50, № 1. – С. 16 – 29.

## The Doppler short-wave radar applied to studying spatial structure of currents in the Black Sea

V.V. Gorbatskiy<sup>1</sup>, **K.D. Sabinin**<sup>2</sup>, V.A. Telegin<sup>3</sup>, A.G. Zatsepin<sup>4,\*</sup>,  
S.B. Kuklev<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Krylov State Research Centre, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>N.N. Andreev Acoustic Institute, Moscow, Russia

<sup>3</sup>N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>4</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*e-mail: zatsepin@ocean.ru

<sup>5</sup>Southern Department of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Gelendzhik, Russia

The results of the surface currents' spatial structure observations performed by a short-wave Doppler radar *SeaSonde* (operating frequency is 25 MHz) in the Black Sea region adjacent to the city of Gelendzhik are represented. The observations imply a special technique consisting in successive measurements at two selected points of the coastline. Initially, the measurements are carried out in the first of two selected coastal points during two hours. Then the radar system is transferred to the second point on the coast where the procedure is reiterated in the very same way. At that the velocity field is assumed to remain unchanged during the total measurement period (including the time of the radar displacement) from both points. The measurement results are shown in a form of a spatial map of the currents' velocity vectors in the region under study (its dimensions is 20 × 20 km). Some features of the currents' spatial and temporal variability in the coastal waters are revealed, in particular, the vortex formations (the diameter is a few kilometers) which rapidly move and collapse. Since similar vortices are detected using the contact measurement methods, complex and variable structure of the surface currents measured by a radar does not seem to be an artifact. Nevertheless, reliability of the data resulted from the radar measurements of the surface current velocity field should be verified in future by comparing it with the results of the quasi-synchronous velocity field measurements performed by stationary, drifting and towed velocity meters.

**Keywords:** Black Sea, coastal zone, Doppler radar HF band, two-point measurement range, correlation radius, antenna, surface currents, vortex structures.