

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### АНОМАЛЬНО СИЛЬНЫЕ БОРЫ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2013 г. А. Ю. Иванов<sup>1\*</sup>, А. Ю. Антониук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии  
им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup>Инженерно-технологический центр “СКАНЭКС”, Москва

\* E-mail: ivanoff@ocean.ru

Поступила в редакцию 10.05.2012 г.

С использованием данных дистанционного зондирования анализируются два случая аномальной боры (ветер до 40–45 м/с), которые охватили прибрежную зону российского сектора Черного моря в январе и феврале 2012 г. и привели к катастрофическим последствиям. Показано, что воздействие боры на характеристики ветрового волнения, верхнего слоя моря и облачности приводит к формированию характерных сигнатур, которые отображаются на радиолокационных (РЛ) изображениях и снимках из космоса видимого диапазона. За развитием боры, особенно аномальной, можно следить из космоса в оперативном режиме, используя мультиспутниковые и мультиспектральные съемки. Совместное использование данных космической радиолокации и оптической съемки для мониторинга и исследования боры позволяет существенно расширить знания об этом опасном явлении.

**Ключевые слова:** аномальная бора, г. Новороссийск, Черное море, радиолокационные изображения, оптические снимки

DOI: 10.7868/S0205961413010028

#### ВВЕДЕНИЕ

Синоптические ситуации, складывающиеся над Черным морем в зимнее время, часто приводят к резкому ухудшению погоды на большей части Краснодарского края и на российском Черноморском побережье. Быстрое продвижение средиземноморских циклонов на восток может привести к резкому усилению ветра в черноморском регионе до ураганных значений и резкому понижению температуры. Очень часто в таких синоптических условиях развивается знаменитый норд-ост, или новороссийская бора — сильный холодный северо-восточный (СВ) ветер, дующий с гор на море (Бурман, 1969). На побережье, особенно в р-не Новороссийска, локальное резкое усиление ветра происходит за счет местного рельефа (Бурман, 1969).

В начале 2012 г. наиболее экстремальные погодные условия сложились в Новороссийске и окрестностях 25–29 января и 6–9 февраля во время аномально сильных бор. Ветер над акваторией Черного моря в р-не Новороссийска разогнался до ураганных значений — 30–40 м/с, с порывами до 45 м/с; температура воздуха упала до  $-19^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). На море наблюдались волны высотой 3–6 м. В прибрежной зоне моря холодный штормо-

вой ветер срывал брызги с гребней волн, что привело к обледенению судов, портовых сооружений и набережных (рис. 1). Последний раз такая экстремальная бора случилась в 1997 г.

Региональное управление МЧС разослало экстренные предупреждения; в СВ части Черного моря несколько раз объявлялось штормовое предупреждение. В связи с экстремальными погодными условиями в Новороссийске и других прибрежных городах региона возникли чрезвычайные ситуации: были повреждены кровли зданий, линии электропередач, повалены деревья и рекламные конструкции, обледенели суда в порту и на его акватории. Из-за обрыва линий электропередач без света временно оказались 250 тыс. жителей. В целях безопасности все работы в порту были остановлены, закрыт участок федеральной трассы “Дон”, отменено автобусное сообщение. Жертвами боры в Новороссийске стали два человека.

Оперативный космический мониторинг, организованный Инженерно-технологическим центром (ИТЦ) “СКАНЭКС”, позволил увидеть развитие ситуации в СВ части Черного моря из космоса.



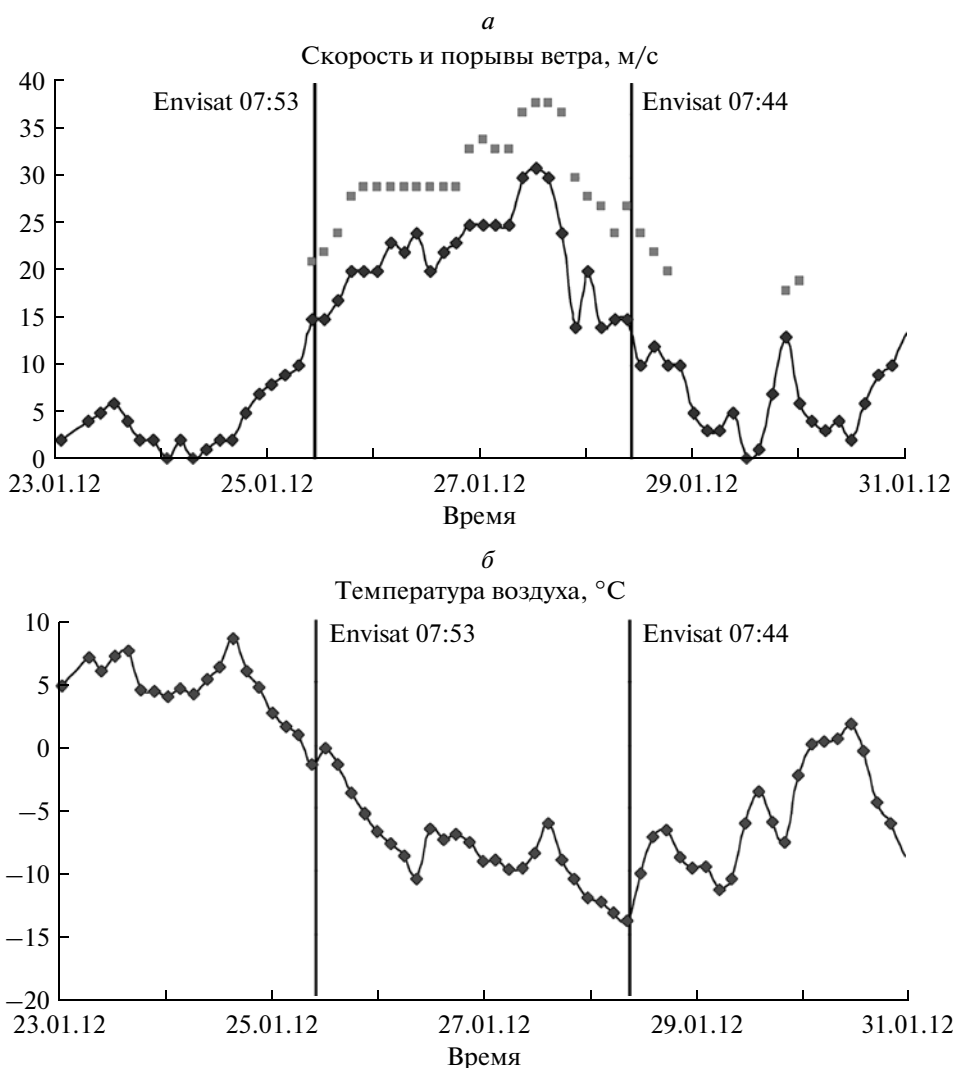
**Рис. 1.** После боры: обледеневшее судно у одного из причалов г. Геленджик (фото Н. Скалацкого).

В настоящей статье проведен анализ данных со спутников Envisat, Radarsat-1, Radarsat-2, EOS (Terra и Aqua), полученных во время этих аномальных событий. Методологические основы анализа и интерпретации радиолокационных изображений (РЛИ) и снимков из космоса, отображающих проявления местных ветров (боры, фёна), изложены в работах (Иванов, 2008, 2010, 2012; Alpers et al., 2008, 2009, 2010a, 2010b, 2011).

### ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Данные дистанционного зондирования (ДЗ) на СВ Черного моря были получены из Европейского космического агентства (ESA) и ИТЦ «СКАНЭКС». Основные сведения о съемках, проведенных во время боры, приведены в таблице.

РЛИ спутника Envisat использовались в виде стандартных продуктов ASA\_WSM (Wide Swath Mode) с размером кадра  $400 \times 400$  км, с пространственным разрешением 150 м и вертикальной поляризацией сигнала. РЛИ спутников Radarsat-1 и Radarsat-2 – в виде стандартных продуктов SCN (ScanSAR Narrow) с размером кадра  $300 \times 300$  км, с пространственным разрешением 50 м и горизонтальной поляризацией. Для оценки гидрометеорологических условий до, во время и после съемок была собрана доступная метеорологическая информация (данные метеостанций в гг. Новороссийск, Анапа, Геленджик и Туапсе). Эти метеоданные (рис. 2, 6), а также карты приземного анализа (с сайта [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)), стали основным подспутниковым материалом, позволяющим провести анализ РЛИ. Как видно из рис. 2 и 6, ветер во время съемок изменялся значительно – от 3 до 35 м/с; это позволило увидеть поверхностные



**Рис. 2.** Ход метеорологических параметров в Новороссийске во время январской боры: *a* – скорость ветра и его порывы; *б* – температура воздуха. Вертикальными линиями показано время (UTC) съемок Envisat.

проявления различных типов на снимках из космоса.

Помимо РЛИ использовались квазисинхронные съемки оптических датчиков MERIS и MODIS (таблица), установленных на ИСЗ Envisat, Terra и Aqua, на которых отобразились главным образом облачные поля.

Обработка РЛИ проводилась по стандартной схеме (Иванов, 2008, 2012). Для анализа РЛИ и исследования отпечатков сильного ветра на поверхности моря использовалась методика, применявшаяся в ряде публикаций (Иванов, 2008, 2012; Alpers et al., 2009, 2010б). Основной метод исследования – анализ сигнатур, видимых на снимках и РЛИ, с учетом подспутниковых метеорологических измерений, а также результатов моделирования (модель GFS NOAA  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

NOMADS), представленных на сайте МГИ НАНУ <http://dvs.net.ua>.

Воспользовавшись описанными выше подходами, проведем анализ спутниковых снимков, которые были получены в конце января и начале февраля 2012 г.

#### *Бора 25–29 января 2012 г.*

В конце января в условиях противостояния мощного антициклона, расположенного на северной частью ЕТР (1058 гПа), и средиземноморского циклона (1003 гПа), который вышел на Черное море и затем перемещался на восток, развивалась экстремально сильная новороссийская бора. Кроме того, это привело к резкому ухудшению погоды на большей части Южного и Северо-Кавказского федеральных округов и над Азов-

Основные сведения о съемках, проведенных во время боры в январе и феврале 2012 г.

Спутник / Сенсор	Дата, время (UTC)	Дата, время (UTC)
Envisat/ASAR	25.01.2012, 07:53	
	28.01.2012, 07:44	
Envisat/MERIS	25.01.2012, 07:55	08.02.2012, 07:43
	28.01.2012, 07:44	
Radarsat-1/PCA		06.02.2012, 03:43
		09.02.2012, 15:15
Radarsat-2/PCA		07.02.2012, 15:25
Terra/MODIS		07.02.2012, 08:30
		08.02.2012, 09:10
Aqua/MODIS		07.02.2012, 10:10
		08.02.2012, 10:55

ским морем, в частности, к резкому усилению ветра до ураганных значений и понижению температуры до отрицательных величин.

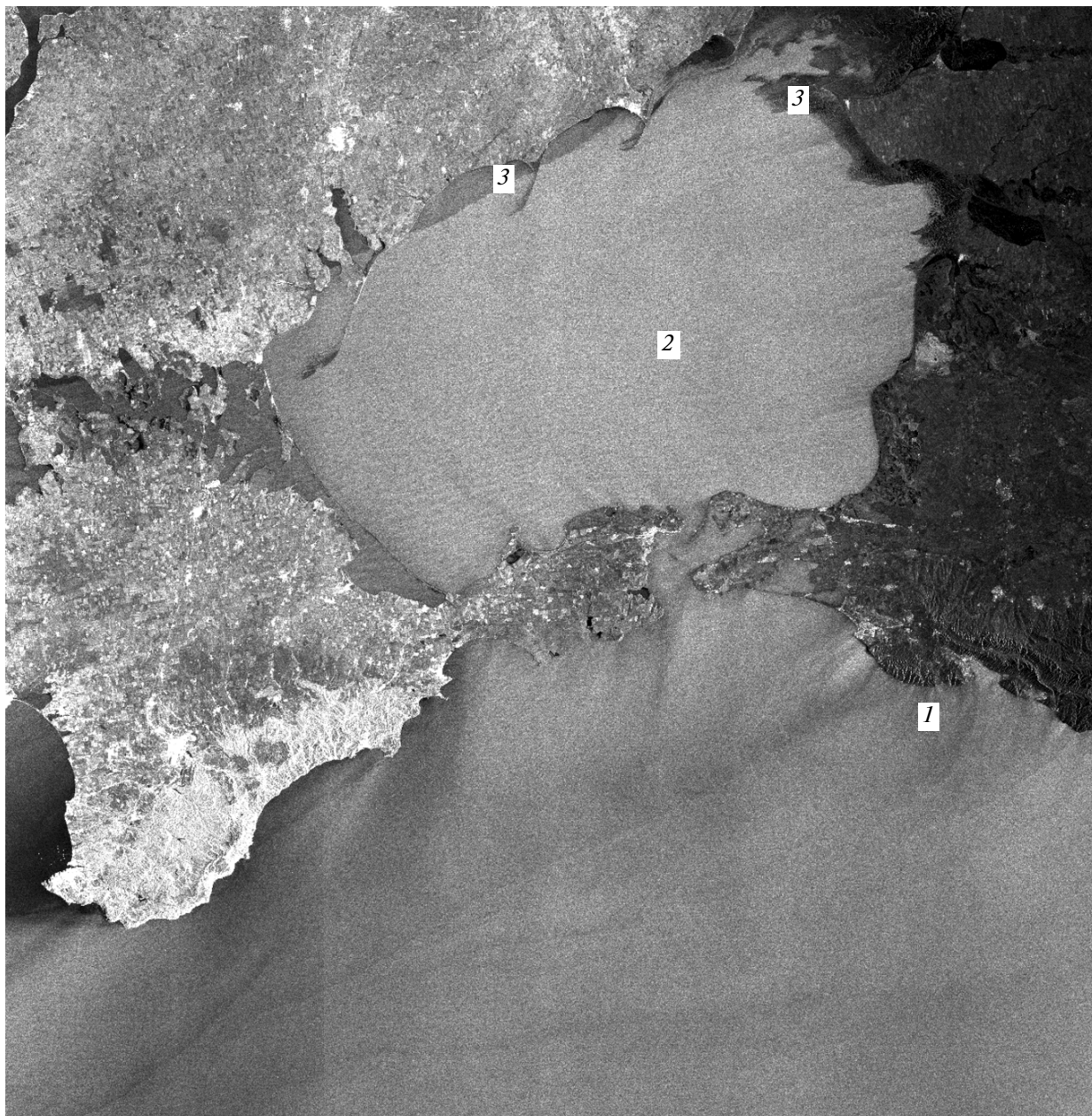
По данным ГМЦ РФ, ветер на акватории Черного моря в р-не Новороссийска разогнался до ураганных значений – 25–30 м/с, 26–27 января – с порывами до 35–45 м/с; температура воздуха упала до –15°C (рис. 2). Во время боры наблюдалось резкое падение атмосферного давления (до 1012 гПа) с последующим его ростом. Сильный СВ ветер вызвал волнение с высотой волн до 3–5 м. В прибрежной зоне моря холодный штормовой ветер срывал брызги с гребней волн, что привело к обледенению судов, набережной и портовых сооружений.

Анализ полученной спутниковой информации показал следующее. На РЛИ Envisat от 25.01.2012 (рис. 3) зафиксировано начало боры; на нем виден ряд коротких искривленных полос-струй (1) в р-не Новороссийск–Анапа длиной 15–25 км. Во время съемки ветер был 15 м/с, порывы до 20 м/с.

Здесь заметим, что сильный холодный восточный ветер в виде достаточно однородного поля (2) наблюдался также и над Азовским морем (рис. 3). Низкие температуры воздуха привели к началу быстрого замерзания моря; лед первоначальных

форм (3) у восточного и северного берегов моря, а также в Таганрогском заливе, был обнаружен уже 25.01.2012. Все море покрылось льдом в период между 25 и 28 января.

На РЛИ от 28.01.2012 (рис. 4) бора отобразилась в стадии, близкой к завершению; во время съемки ветер был около 15 м/с, порывы 20–25 м/с. Тем не менее, на этом РЛИ в поле поверхностного волнения хорошо видны орографически-модулированные, продольные струи сильного ветра и поперечные полосы – волнообразные проявления, в общем случае визуализирующие порывистость ветра. Причиной порывистости ветра могут являться вихри с горизонтальной осью, атмосферные гравитационные волны и т.п. явления, возникающие ниже по потоку при взаимодействии ветра с неоднородностями прибрежной топографии (Alpers, 2008). Измерение расстояний между поперечными полосами и знание скорости ветра на момент съемки позволяет определить порывистость ветра (Иванов, 2008; Signell et al., 2010); в данном случае она составляет 3.5–7 мин. Это РЛИ также иллюстрирует то, что сильный порывистый ветер, характерный для боры и создающий характерные проявления на поверхности моря, отмечаются на участке побережья от Анапы до Туапсе вплоть до п. Лазаревское. В целом бора охватила обширную

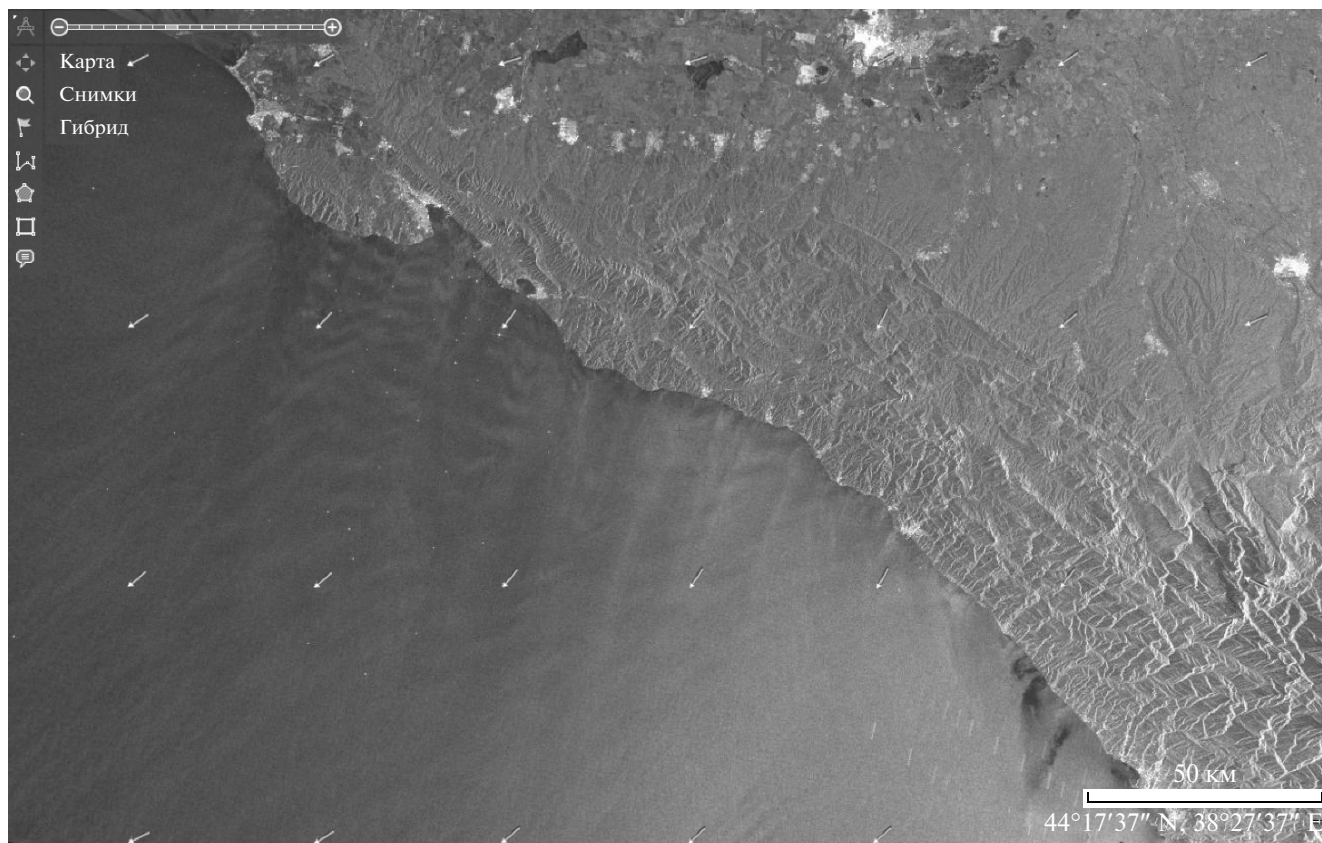


**Рис. 3.** Начало боры в г. Новороссийске на РЛИ Envisat от 25.01.2012, 07:53 UTC: 1 – начальные струи боры, 2 – ветровые полосы, 3 – начальные формы льда в Азовском море. © ESA.

акваторию СВ части Черного моря; в открытом море ветер достигал скоростей в 10–15 м/с.

На снимках спектрометра MERIS хорошо видно, что бора приводит к формированию характерных сигнатур и в поле облачности на снимках видимого диапазона. На начальной стадии развития боры наблюдается размытие облачности из-за нисходящих потоков воздуха (рис. 5а). В то время, как на заключительной стадии в районе моря, охваченном борой, воздушные потоки часто визуализируются полосами облаков кучевообраз-

ных форм, образуются так называемые “облачные дорожки” (рис. 5б). Пространственно-упорядоченные гряды облаков, как правило, формируются в нижнем слое атмосферы в массах холодного воздуха, движущегося над теплой поверхностью моря, при двухмерной конвекции. Это происходит в сравнительно тонких неустойчиво стратифицированных слоях, и поэтому сам факт их существования свидетельствует о неустойчивой стратификации нижнего слоя атмосферы (Радиолокация ..., 1982).



**Рис. 4.** Орографически-модулированные, продольные струи сильного ветра и поперечные полосы – волнообразные проявления, определяющие порывистость ветра, в поле поверхностного волнения во время боры на РЛИ Envisat от 28.01.2012, 07:44 UTC. Стрелками показано прогнозное поле ветра на 07:00 UTC. © ESA, ИТЦ “СКАНЭКС”.

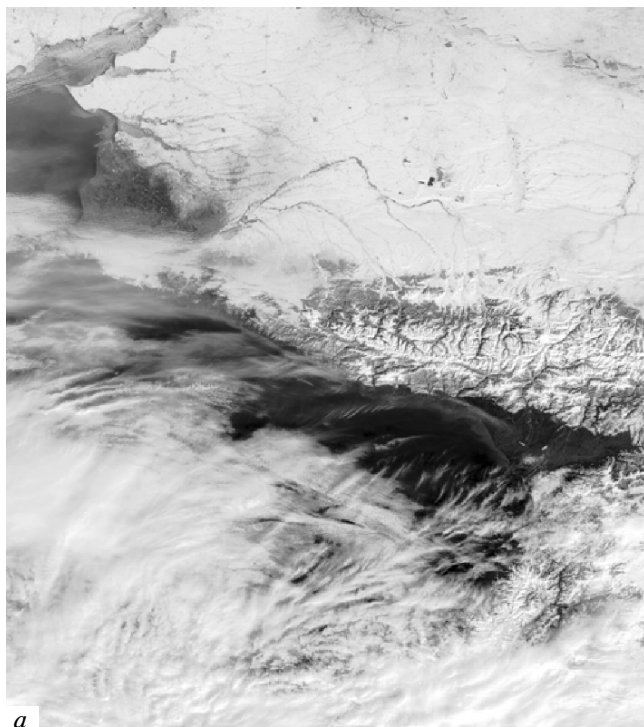
#### *Бора 6–9 февраля 2012 г.*

Во второй половине дня 6 февраля в Новороссийске вновь началась бора, причем аномально сильная. Ее причиной стало усиление антициклона (с очень холодным континентальным воздухом), расположенного над севером европейской территории России и Западной Сибирью (1054 гПа), и активизация циклонической деятельности над Средиземным морем. Над Средиземноморьем образовался глубокий циклон (984 гПа), что привело к большим контрастам температуры и давления в узкой градиентной зоне, протянувшейся в широтном направлении вдоль северного побережья Черного моря. Кроме того, возникновению аномальной боры способствовало сильное выхолаживание воздуха над Краснодарской равниной, Нижним Поволжьем и замерзшим Азовским морем.

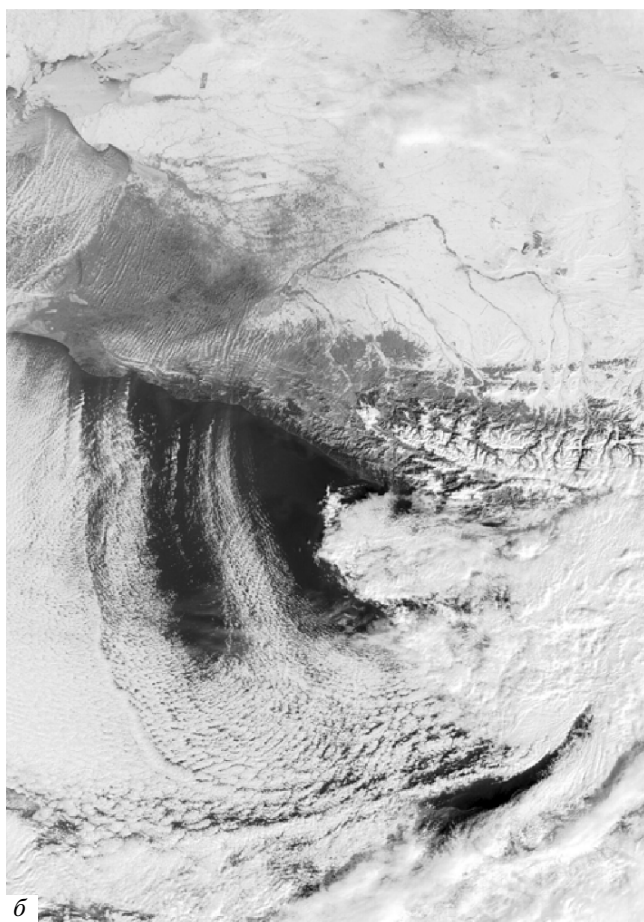
Из-за аномально сильной боры большая часть Черноморского побережья Краснодарского края повторно подверглась удару стихии; наибольший ущерб штормовой ветер причинил Новороссийску и Геленджикю, а также их пригородам. В регионе вновь действовало штормовое предупреждение.

Пик непогоды пришелся на 7–8 февраля, температура воздуха в ночное время в гг. Анапе и Новороссийске упала до  $-19^{\circ}\text{C}$ . Перед борой давление упало с 1031 до 1016 гПа, а затем стало расти. К утру 7 февраля ветер достиг ураганной силы 30–35 м/с, с порывами до 40–45 м/с; на Маркхотском перевале скорость ветра достигала 50 м/с. 8–9 февраля бора еще продолжалась, однако начала стихать; скорость ветра уменьшилась до 15–20 м/с. Анализ метеоданных (рис. 6) показал, что аномальные погодные условия сложились исключительно в Новороссийске и его окрестностях; ветер в Анапе и Геленджике не достиг таких аномальных значений, хотя его порывы в Анапе были 20–25 м/с, Геленджике – 30–40 м/с, Туапсе – 20–25 м/с. Бора наблюдалась на участке черноморского побережья от г. Анапы до п. Головинка.

В данном случае основными материалами для анализа стали РЛИ Radarsat-1 и Radarsat-2, а также оптические снимки спектрометрических MODIS Terra и Aqua и MERIS Envisat. Анализ полученных РЛИ еще раз подтвердил, что воздействие боры на поверхность моря приводит к формированию характерных поверхностных сигнатур, которые



а



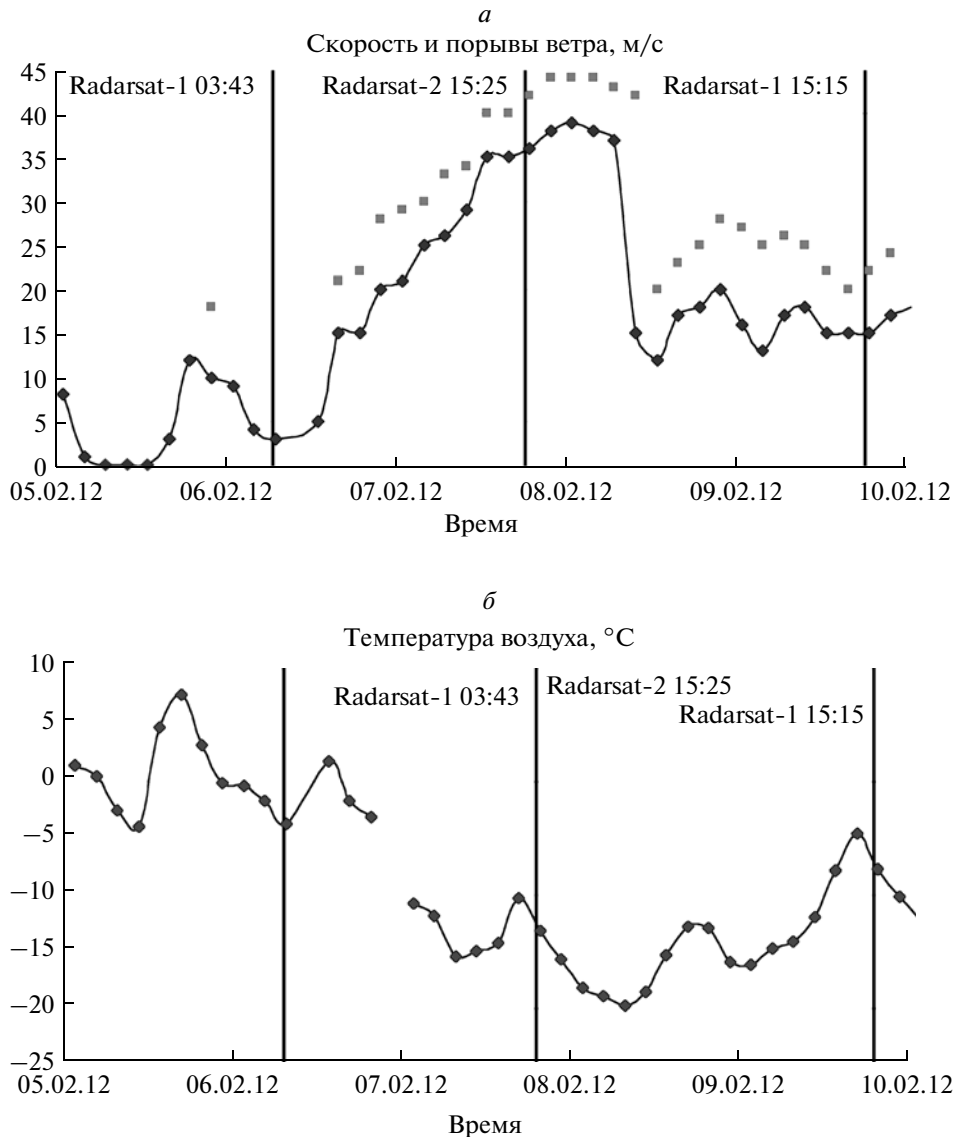
б

отображаются на РЛИ в виде длинных полос (рис. 7, 8), ортогональных берегу (Иванов, 2008). Так, на РЛИ Radarsat-1 от 06.02.2012 (рис. 7) фактически зарегистрировано начало боры – на нем отобразились: (1) – атмосферный фронт, разделяющий теплые и холодные воздушные массы; (2) – волнистый “квази-фронт боры”, расположенный квазипараллельно берегу на концах ветровых “конусов выноса” (3), исходящих из понижений прибрежного рельефа. Заметим, что структуры (3) аналогичны структурам, появляющимся на РЛИ из-за гравитационного стока холодного воздуха (горно-долинные ветры) в ночное время (Alpers et al., 1998)). На РЛИ Radarsat-2 от 07.02.2012 (скорость ветра у берега составляла 35 м/с, порывы до 40–45 м/с) видно, что полосы достигают длины в 350–370 км, причем наиболее длинные образуются на участке побережья Новороссийск–Геленджик; их ширина – 6–15 км (рис. 8). Ветер над открытым морем, охваченным борой, достигал 20–25 м/с, ослабевая до 15–20 м/с по мере движения к центральной части бассейна. Более того, контрастная граница на этом РЛИ, разделяющая светлую и темную области в районе пп. Лазаревское–Головинка, иллюстрирует орографический фактор: горы Главного Кавказского хребта, достигая после г. Туапсе высот 1000 м и более, препятствуют развитию боры. В таких ситуациях над юго-восточной частью Черного моря часто образуются орографические циклоны (Alpers et al., 2010б).

Следует заметить об одном интересном эффекте, отобразившемся на РЛИ от 07.02.2012 (рис. 8). На нем хорошо видны две серии полос: одни из них, уже упоминавшиеся, – аномально длинные (характерные для боры) и, как уже говорилось, практически ортогональные берегу, а другие – значительно более короткие (120–150 км), расположены под углом 35°–40° к первым. На первый взгляд представляется, что мы имеем дело с двумя системами поверхностных проявлений, обусловленных аномально сильной борой, однако для более обоснованных заключений необходим детальный анализ всей совокупности имеющихся данных, и, в частности, данных аэрологии.

На РЛИ Radarsat-1 от 09.02.2012 (рис. 9) также отобразились орографически-модулированные, относительно широкие ветровые полосы-струи (1) длиной 40–80 км (на море в районе действия боры ветер 7–10 м/с). Однако с запада они блокируются северным ветром, дующим с суши (проявления (2), характерные для облачных дорожек); причем, на этом РЛИ можно увидеть зону взаи-

Рис. 5. Этапы развития боры на оптических снимках MERIS Envisat: а – 25.01.2012, 07:55 UTC; б – 28.01.2012, 07:44 UTC. © ESA.



**Рис. 6.** Ход метеорологических параметров в Новороссийске во время февральской боры: *а* – скорость ветра и его порывы; *б* – температура воздуха. Вертикальными линиями показано время (UTC) съемок со спутников Radarsat-1 и Radarsat-2.

модействия двух потоков (или зону блокировки боры), а также проявления, связанные с неустойчивостью этого взаимодействия (3). Это означает, что синоптическая ситуация начала меняться коренным образом.

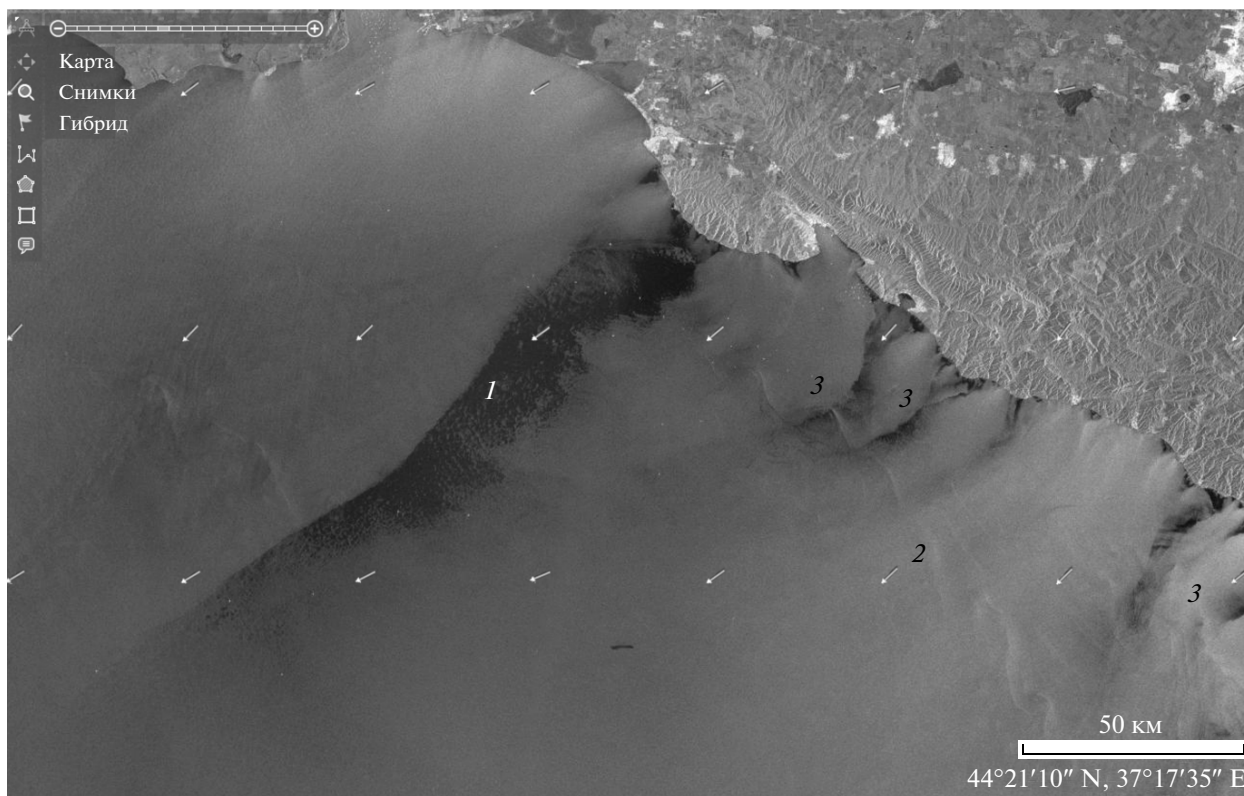
На снимках видимого диапазона (MODIS) бора сначала (07.02.2012) способствовала размытию облачности (рис. 10); однако на них в зоне прояснения отчетливо видны широкие слабоконтрастные полосы, вытянутые по ветру, скорее всего, визуализируемые низкими рваными облаками и парением.

Во второй половине 8 февраля бора в Новороссийске начала стихать, однако сильный СВ ветер (15 м/с, порывы до 20 м/с) продолжал дуть и

9 февраля (рис. 6). По мере ослабления боры вдоль струй холодного воздуха также начали образовываться гряды кучевых облаков (облачные дорожки), их маркирующие, что и отобразилось на оптических снимках MERIS и MODIS (рис. 11). Ориентация облачных полос позволяла судить о направлении ветра над морем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены и проанализированы космические снимки, на которых зарегистрированы две последовавшие друг за другом аномально сильных боры, случившиеся в конце января и начале февраля 2012 г. Аномалии и проявления, отобразившиеся на снимках из космоса, были



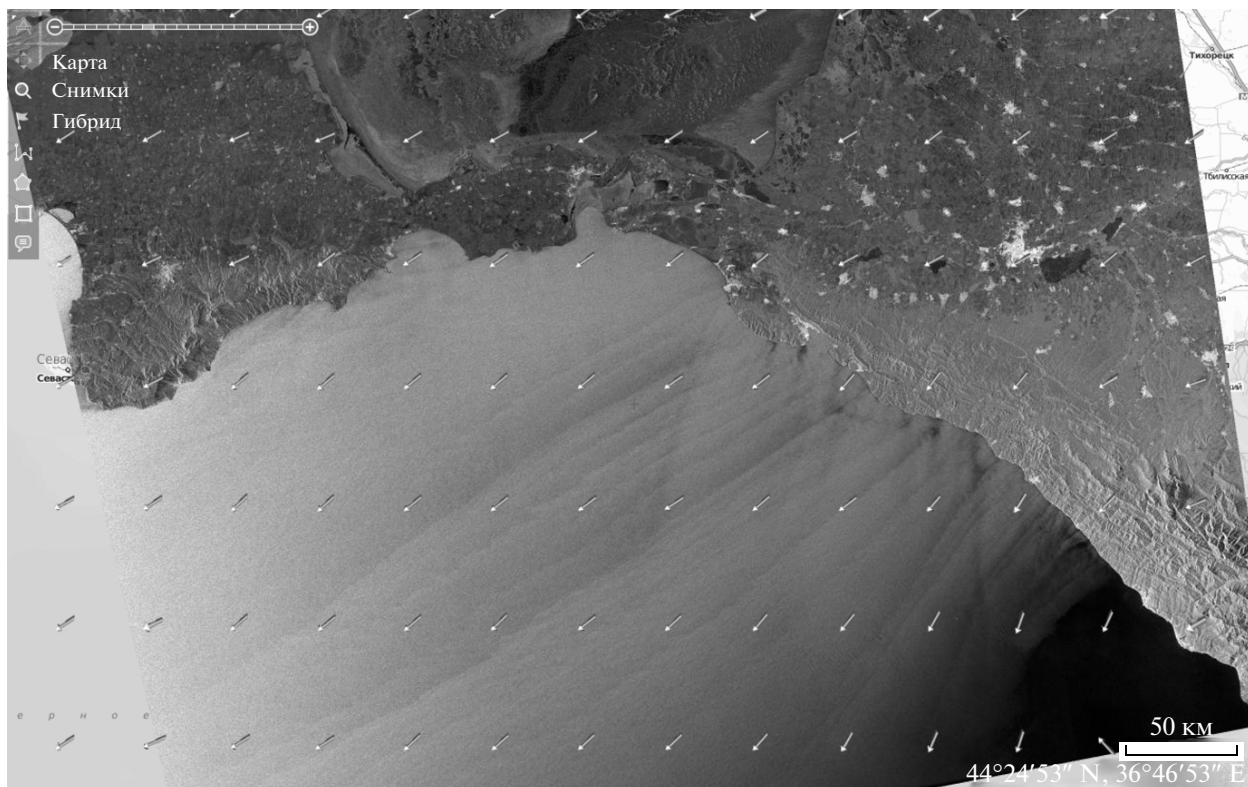
**Рис. 7.** Начало боры в Новороссийске и окрестностях на РЛИ Radarsat-1 от 06.02.2012, 03:43 UTC: 1 – атмосферный (ветровой) фронт; 2 – фронт боры; 3 – ветровые “конусы”. Стрелками показано прогнозное поле ветра на 03:00 UTC. © MDA, ИТЦ “СКАНЭКС”.

связаны с нисходящими потоками очень холодного воздуха и сильным северо-восточным ветром, дующим с берега на море. Это подтвердили метеоданные и карты приземного анализа, а также результаты моделирования. На основе разработанного подхода (Иванов, 2008, 2012; Alpers et al., 2009, 2011) был проведен оперативный спутниковый мониторинг этих событий, благодаря которому были получены сведения об их развитии и определен ряд их параметров.

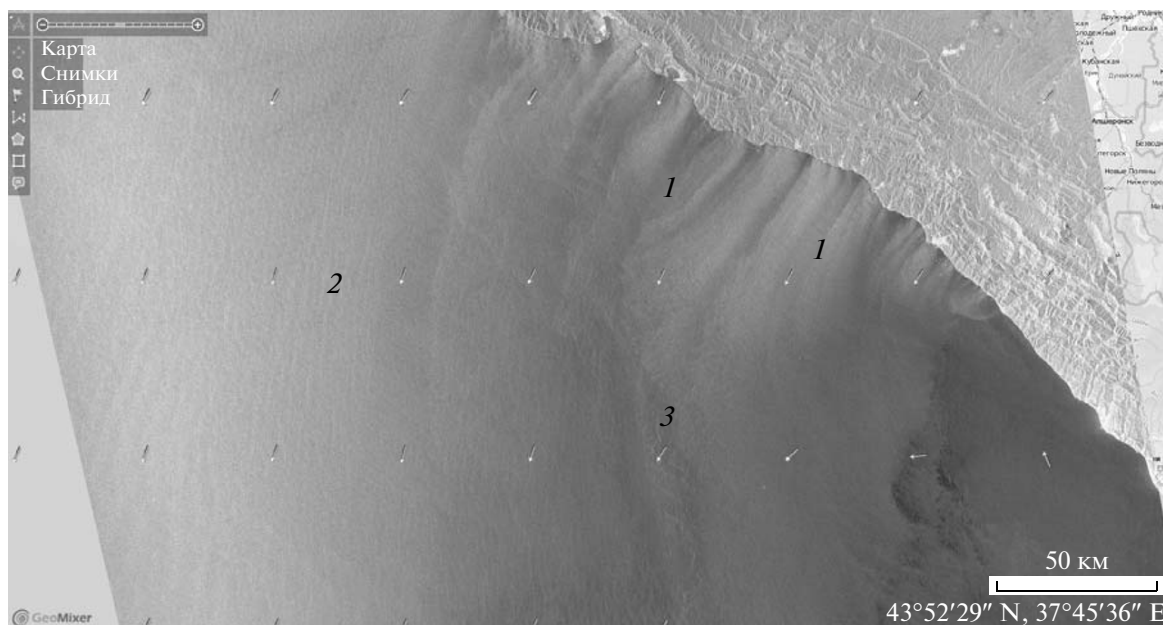
Анализ РЛИ показал, что воздействие сильной боры на поверхность моря приводит к формированию характерных поверхностных сигнатур, которые отображаются на РЛИ в виде сигнатур двух типов: на начальной стадии – в виде “конусов выноса”, характерных для кatabатических (стоковых) ветров (рис. 7), а на средней и заключительных стадиях – в виде длинных полос, ортогональных берегу (рис. 4, 8, 9). Часто они осложнены поперечными волнообразными полосами (возмущениями), что обусловлено порывистостью ветра (рис. 4).

Спутниковые данные радаров с синтезированной апертурой (РСА) позволили определить ряд количественных характеристик явления и судить о его масштабах. Во-первых, на РЛИ (рис. 4, 8) хо-

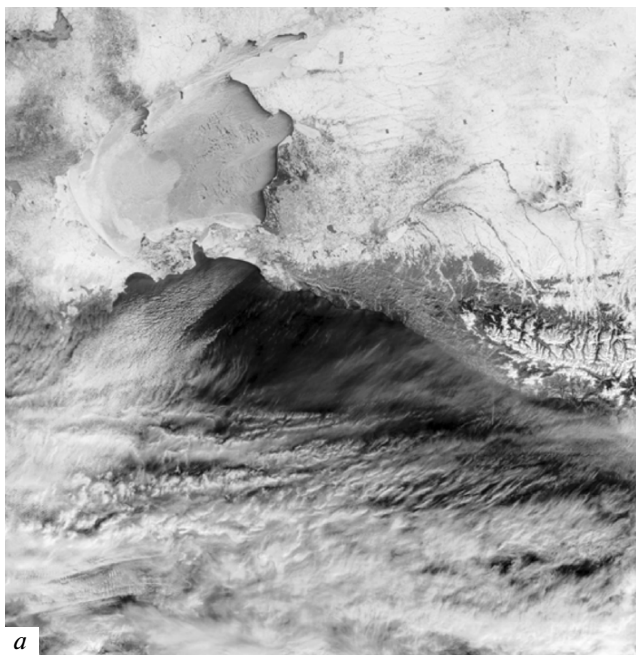
рошо видно, что сильный, порывистый ветер при боре всегда отмечается на участке побережья Анапа–Туапсе (наиболее сильный и порывистый – в Новороссийске и окрестностях). Во-вторых, бора, особенно аномальная, охватывает обширную акваторию СВ части Черного моря. Максимальная длина (протяженность) ветровых струй, отобразившихся на РЛИ, может достигать 350 км и более (рис. 8). Это, в частности, может говорить о том, что холодный воздух во время экстремальных бор, переваливая хребет, приобретает значительную нисходящую составляющую скорости не только из-за гравитационного эффекта, но и, главным образом, вследствие больших горизонтальных барических градиентов и перепадов температур. Их интенсификация происходит в благоприятных синоптических условиях: при прохождении холодных атмосферных фронтов или перетекании очень холодных воздушных масс (Бурман, 1969). Не исключено, что ветер дополнительно ускоряется из-за горизонтального градиента давления, вызванного разностью температур воздуха на одних и тех же высотах над холодной сушей и поверхностью моря. В-третьих, в открытом море ветер при боре может достигать 10–25 м/с. Взаимодействие ветра с прибрежной топографией



**Рис. 8.** Орографически-модулированные, продольные струи сильного ветра (на море 18–24 м/с) в поле поверхностного волнения во время боры на РЛИ Radarsat-2 от 07.02.2012, 15:25 UTC. Стрелками показано прогнозируемое поле ветра на 15:00 UTC. © MDA, ИТЦ “СКАНЭКС”.



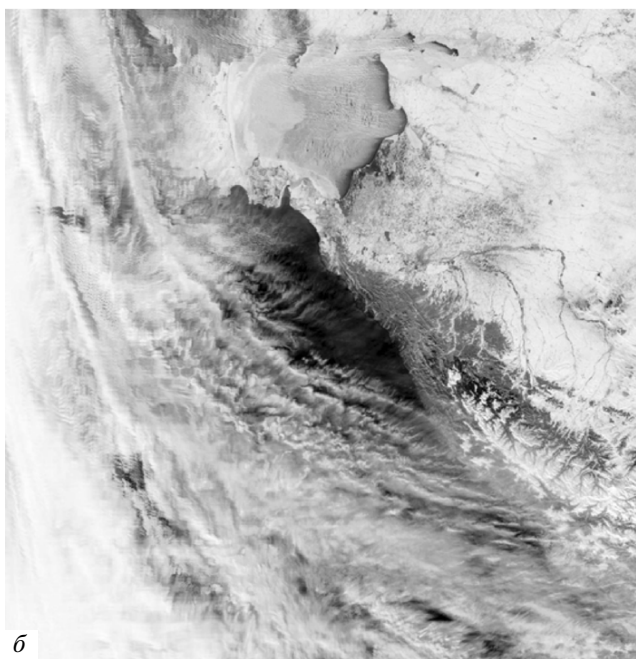
**Рис. 9.** Орографически-модулированные, продольные струи сильного ветра (7–10 м/с) в поле поверхностного волнения на РЛИ Radarsat-1 от 09.02.2012, 15:15 UTC: 1 – полосы-струи боры; 2 – полосы северного ветра; 3 – зона блокировки боры. Стрелками показано прогнозируемое поле ветра на 15:00 UTC. © MDA, ИТЦ “СКАНЭКС”.



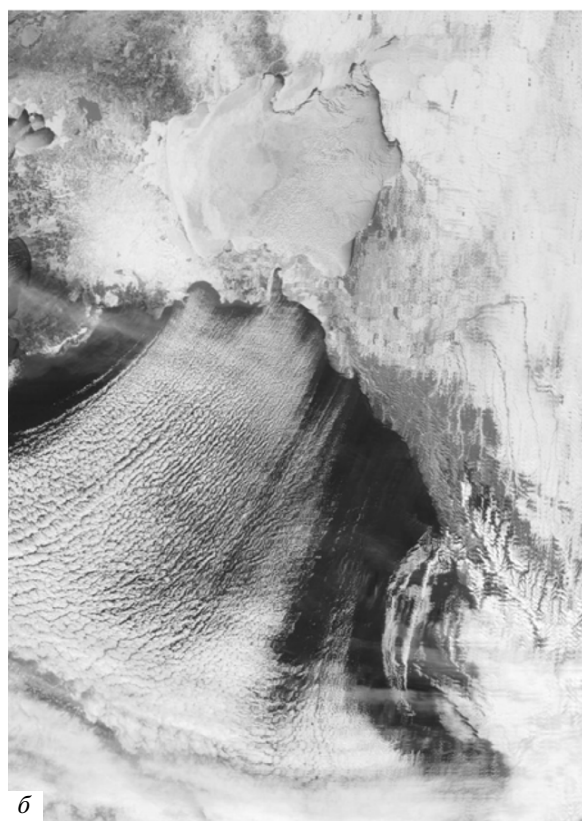
а



а



б



б

**Рис. 10.** Февральская бора в ее самой интенсивной стадии на оптических снимках: *a* – MODIS Terra от 07.02.2012, 08:30 UTC; *б* – MODIS Aqua 07.02.2012, 10:10 UTC. © NASA GSFC.

часто является причиной возникновения порывистости ветра в прибрежной зоне моря; она наиболее интенсивна в районе Новороссийск–Геленджик и мористее (рис. 4).

**Рис. 11.** Февральская бора на завершающей стадии на оптических снимках: *a* – MERIS Envisat от 08.02.2012, 07:43 UTC; *б* – MODIS Aqua от 08.02.2012, 10:55 UTC. © ESA, NASA, ИТЦ “СКАНЭКС”.

Бора значительно видоизменяет локальное поле облачности. Снимки видимого диапазона позволяют увидеть динамику облачного покрова в районе моря, охваченном борой. В широкой полосе моря наблюдается ее отсутствие или малооблачность; на заключительных стадиях над морем образуются облачные полосы (“облачные дорожки”) там, где холодный воздух начинает прогреваться и возникают конвективные процессы (рис. 5б, 11а, 11б). Последнее является признаком ослабления и окончания боры.

Вполне очевидно, что в настоящее время, при наличии доступа к космической информации, за развитием боры, особенно аномальной, можно следить из космоса в оперативном режиме. Современные средства ДЗ позволяют получить информацию не только о синоптической обстановке во время боры, но и ряд ее параметров, что практически невозможно сделать традиционными методами. Анализ оперативных данных ДЗ в итоге позволит улучшить существующие методы прогноза боры и уменьшить возникающие в связи с ней риски. Наконец, данные ДЗ, в первую очередь радиолокационные, существенно расширяют представления об этом опасном явлении.

Данные Envisat (РЛИ и снимки MERIS), использованные в работе, были получены в рамках проектов ESA С1Р.3424 и С1Р.8116; РЛИ Radarsat-1 и Radarsat-2 любезно предоставлены ИТЦ “СКАНЭКС”. Источник метеорологических данных – <http://rp5.ua>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бурман Э.А. Местные ветры. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 342 с.

Иванов А.Ю. Новороссийская бора: взгляд из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 2. С. 68–83.

Иванов А.Ю. О восстановлении параметров морской среды по данным космических РСА // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 77–92.

Иванов А.Ю. Фён в юго-восточной части Черного моря и его наблюдение из космоса с помощью РСА // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 1. С. 40–53.

Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. С.В. Викторова, Л.М. Митника. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 300 с.

Alpers W. Investigation of atmospheric gravity waves and rotors in the marine boundary layer using spaceborne synthetic aperture radar images / Proc. IGARSS-2008. 6–11 July 2008. Boston, MA, USA. 2008. V. 4. P. 57–60.

Alpers W., Ivanov A. Yu., Dagestad K.-F. Observation of local wind fields and cyclonic atmospheric eddies over the Eastern Black Sea using Envisat ASAR images // Proc. ESA Living Planet Symp. 28 June–2 July 2010. Bergen, Norway, 2010a. ESA SP-686.

Alpers W., Ivanov A. Yu., Dagestad K.-F. Observation of local wind fields and cyclonic atmospheric eddies over the Eastern Black Sea using Envisat synthetic aperture radar images // Исслед. Земли из космоса. 2010б. № 5. С. 46–58.

Alpers W., Ivanov A. Yu., Dagestad K.-F. Encounter of foehn wind with an atmospheric eddy over the Black Sea as observed by the synthetic aperture radar onboard the Envisat satellite // Monthly Weather Rev. 2011. V. 139. № 12. P. 3992–4000.

Alpers W., Ivanov A. Yu., Horstmann J. Bora events in the Adriatic Sea and Black Sea studied by multi-sensor satellite imagery / Proc. IGARSS'2007. 23–27 July 2007. Barcelona, Spain, 2008. P. 1307–1313.

Alpers W., Ivanov A., Horstmann J. Observations of bora events over the Adriatic Sea and Black Sea by spaceborne synthetic aperture radar // Monthly Weather Rev. 2009. V. 137. P. 1150–1161.

Alpers W., Pahl U., Gross G. Katabatic wind fields in coastal areas studied by ERS-1 synthetic aperture radar imagery and numerical modeling // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 7875–7887.

Signell R.P., Chiggiato J., Horstmann J. et al. High-resolution mapping of bora winds in the northern Adriatic Sea using synthetic aperture radar // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. doi:10.1029/2009JC005524.

## Anomalously Strong Bora Events over the Black Sea Studied Using Satellite Imagery

A. Yu. Ivanov<sup>1</sup>, A. Yu. Antonyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup> Research and Development Center “SCANEX”, Moscow

Two very strong bora events (wind speed up to 40–45 m/s), occurred in the end of January and in the beginning of February, 2012 in Novorossiysk and over the North-Easterly Black Sea, have been studied by using synthetic aperture radar (SAR) and optical images acquired by remote sensing satellites. It is shown that strong winds during the boras influencing the sea surface roughness and cloud cover result in formation of characteristic signatures, which can be imaged by SAR and optical sensors and seen in their imagery. There is a possibility to track evolution and dynamics of a bora event step by step using multisatellite and multisensor imagery. Combined use of SAR and optical images for monitoring and study of bora events yields information and new knowledge on this dangerous atmospheric phenomenon.

**Keywords:** strong bora events, Novorossiysk, Black Sea, SAR and optical images