

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ФЁН В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ И ЕГО НАБЛЮДЕНИЕ ИЗ КОСМОСА С ПОМОЩЬЮ РСА

© 2012 г. А. Ю. Иванов

Учреждение Российской академии наук Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

E-mail: ivanoff@ocean.ru

Поступила в редакцию 24.02.2011 г.

Данные радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) спутника Envisat послужили основой для анализа ветровых ситуаций в юго-восточной части Черного моря, связанных с фёном в Колхидской низменности (Западная Грузия). Показано, что воздействие фёна на характеристики ветрового волнения приводит к формированию характерных сигнатур на поверхности моря, которые отображаются на радиолокационных изображениях (РЛИ) поверхности моря. Спутниковые РСА-изображения и данные позволяют определить ряд количественных характеристик явления и судить о его пространственных масштабах. Фён, в зависимости от синоптической ситуации, может охватывать обширную акваторию в юго-восточной части Черного моря. Использование данных космической радиолокации для исследования и мониторинга фёна позволяет существенно расширить знания об этом явлении в атмосфере.

Ключевые слова: юго-восточная часть Черного моря, фён, поле ветра, космическая радиолокация, радиолокационные изображения

ВВЕДЕНИЕ

В общем случае фёном (нем. *Föhn*, лат. *favonius* – теплый западный ветер) называют сухой и теплый ветер, дующий с гор в долины, часто сильный и порывистый (Бурман, 1969; Прох, 1983). Фёны – нисходящие (катабатические) ветры. Они наблюдаются в ряде горных стран, возникая при перетекании воздушного потока через гребни высоких хребтов (Бурман, 1969). Опускание по подветренному склону сопровождается сухоадиабатическим повышением температуры (при опускании на каждые 100 м воздух нагревается примерно на 1°C) и понижением относительной влажности (Бурман, 1969). Скорости фёнового ветра бывают значительными и достигают 20–25 м/с и более. Фён обычно длится менее суток, нередко до пяти, а изредка и более, причем изменения температуры и относительной влажности воздуха могут быть значительными. При этом усиливается таяние снега, возрастает возможность схода лавин, резко повышается испарение с почвенно-растительного покрова, перераспределяются атмосферные загрязнения (Gunia et al., 2008). Фёны часто наблюдаются в горах Кавказа, Урала, Средней Азии, Алтая, в Хибинах, Альпах, Скалистых горах и других горных районах (Бурман, 1969; Прох, 1983; Demin, Зуков, 2005).

На территории бывшего СССР одним из наиболее известных является фён в долине р. Риони (Колхидская низменность, Западная Грузия) (Бурман, 1969). Долина реки представляет собой своеобразный амфитеатр, окаймленный хребтами Большого и Малого Кавказа, перемычкой между которыми является Лихийский (Сурамский) хребет (рис. 1). Направление воздушных потоков здесь определяется широтной ориентацией долины. Разность давлений над Черным морем и Кавказом, особенно в осенне-зимний период, способствует перетеканию воздуха через Лихийский хребет (высоты 950–2000 м) (Бурман, 1969). Наиболее часто фёны здесь образуются в условиях северо-восточного муссона, при частом прохождении циклонов над Черным морем, а также при вторжениях холодного воздуха с востока (Бурман, 1969). Здесь фён – теплый восточный ветер, дующий с гор Лихийского хребта в долину и затем на море, и продолжающийся от одних суток до недели. Отмечается, что фёновый ветер может распространяться от места генерации на 500–600 км (Бурман, 1969). С подветренной стороны хребта нередко образуется фёновый циклон (Дашко, 2005).

В Колхидской низменности выделяются несколько районов с повышенными скоростями ветра (15 м/с и более): это – Кутаиси (до 114 дней

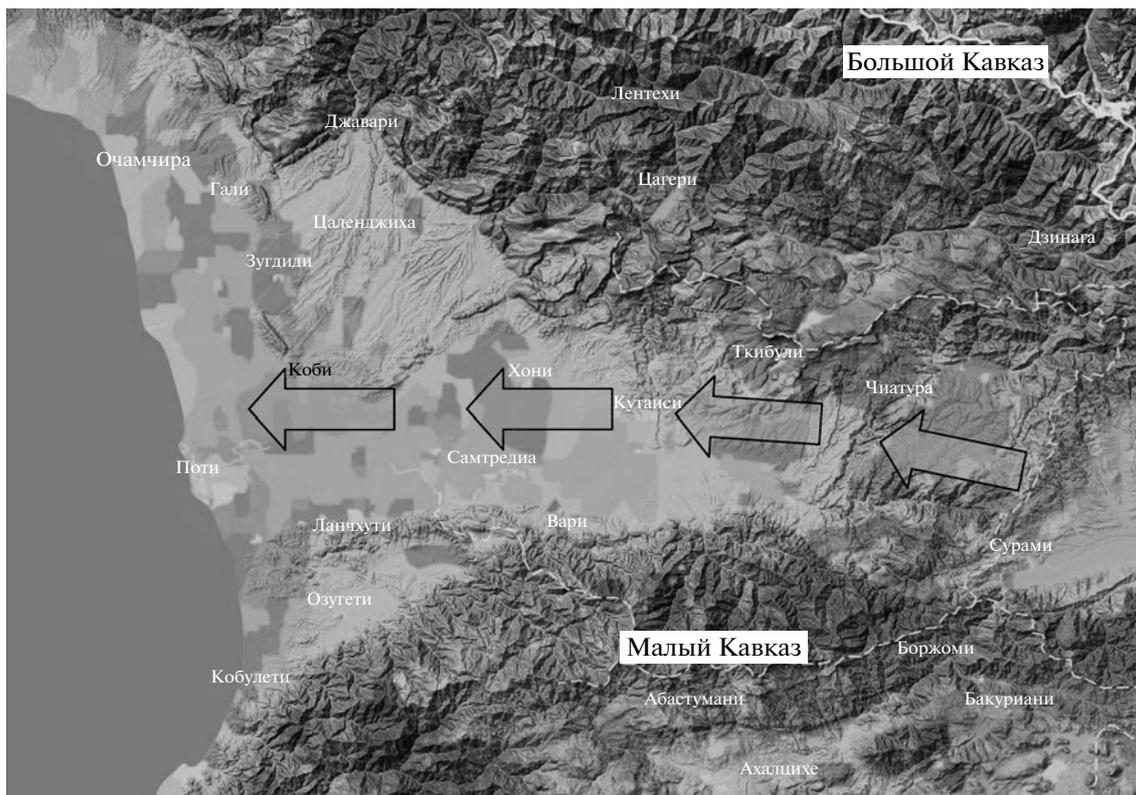


Рис. 1. Карта Западной Грузии с положением хребтов и речных долин, способствующих развитию фёна, и его генеральное направление (фоновая карта © Google-Ландшафт).

в году), Потти, Кахаберская равнина и др. места (Прох, 1983). Так, в Кутаиси во время фёна температура может подняться до 30–35°C при относительной влажности воздуха 10–20% (Бурман, 1969). В районе г. Потти, на участке побережья от устья р. Супса до устья р. Ингури, часто наблюдается очень сильный фёновый ветер, иногда достигающий ураганной силы 30–40 м/с и продолжительности в несколько суток (Прох, 1983). Почти одновременно с развитием фёна наблюдается заметное усиление ветра восточных румбов в Батуми, Кобулети, Сухуми и других прибрежных городах региона (Бурман, 1969).

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) регистрируют пространственные вариации мелкомасштабных ветровых волн, связанные с аэрогидродинамическими возмущениями, в виде картин пространственного распределения величины удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР). Радиолокационный (РЛ) сигнал проникает через атмосферу практически без помех и поэтому явления, происходящие в нижней атмосфере или в верхнем слое моря, могут отобразиться на радиолокационных изображениях (РЛИ) только как неоднородности в поле мелкомас-

штабного волнения морской поверхности. Процессы в атмосфере, связанные с большими скоростями ветра, создают усиленную интенсивность волн ряби на морской поверхности, которая отображается на РЛИ как яркие зоны “замороженного” ветра. В связи с этим изображения РЛ-спутников часто привлекаются для исследования процессов и явлений в атмосфере, таких, например, как фронты и фронтальные зоны (Ivanov et al., 2004) и местные ветры: кататические в Средиземноморье (Alpers et al., 1998), бора на Адриатическом (Signell et al., 2010; Alpers et al., 2007) и Черном морях (Ivanov et al., 2007; Иванов, 2008; Alpers et al., 2009; Alpers et al., 2010). В этих работах показано, что анализ РЛИ позволяет получить уникальную информацию о явлениях в атмосфере, создающих на морской поверхности соответствующие проявления.

Кроме того, РЛ-данные могут быть использованы для определения скорости ветра над морем путем преобразования яркости пикселей изображения в УЭПР (или интенсивность рассеяния), которая связана с полем приповерхностного ветра через скаттерометрическую модель SMOD4 (Stoffelen, Anderson, 1997). Для этого разработан

Параметры съемок с ИСЗ Envisat

Дата съемки	Время, UTC	Режим	Ветер во время съемки (направление/скорость, м/с)	Примечание
9.09.2009	07:29	Image Mode	B/20	
12.09.2009	07:34	То же	B/10	
7.12.2009	07:31	Wide Swath	B/10	Циклонический вихрь
11.01.2010	07:31	Image Mode	B/11	
13.09.2010	07:31	Wide Swath	B/16	Циклонический вихрь

ряд алгоритмов (Horstmann et al., 2000; Monaldo et al., 2003; Horstmann, Koch, 2005). В частности, данный подход активно использовался для восстановления поля ветра в (Ivanov et al., 2004; Иванов, 2008; Alpers et al., 2009; Alpers et al., 2010; Иванов, 2010).

В настоящей статье проанализирован ряд РЛИ спутника Envisat, полученных в 2009–2010 гг., чтобы показать, какая информация о черноморском фёне может быть получена с помощью космической радиолокации. Основным методом исследования – совместный анализ сигнатур, видимых на РЛИ, данных моделирования и подспутниковых измерений.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

РЛ-данные на юго-восточную (ЮВ) часть Черного моря были получены из Европейского космического агентства (ESA) в рамках ряда исследовательских проектов. Параметры съемок приведены в таблице.

РЛИ спутника Envisat были доступны в виде стандартных продуктов ASA_IMP и ASA_WSM, с размером стандартного кадра 100×100 и 400×400 км, с оригинальным пространственным разрешением 25 и 150 м и вертикальной поляризацией сигнала. Для оценки гидрометеорологических условий во время съемок были собраны доступные сведения о ветре (данные метеостанции в г. Кутаиси). Эти метеоданные, а также карты приземного анализа (с www.wetterzentrale.de), были основным материалом для анализа РЛИ. Как видно из таблицы, во время съемок наблюдался сильный восточный ветер, превышающий 10 м/с.

Для анализа РЛ-данных и исследования отпечатков сильного ветра на поверхности моря использовалась методика, применявшаяся в ряде публикаций (Иванов, 2008; Alpers et al., 2009; Al-

pers et al., 2010). Обработка РЛИ проводилась по стандартной схеме и включала геометрическую коррекцию по орбитальным данным, радиометрическую коррекцию, калибровку, сглаживание путем фильтрации и географическую привязку изображений.

Для восстановления поля ветра над морем из РЛИ широко применяется подход, предложенный Хорстманом – подробно см. (Horstmann et al., 1998; Horstmann et al., 2000; Monaldo et al., 2001; Horstmann, Koch, 2005). В общем случае методология расчета поля ветра подразумевает два этапа. Это связано с тем, что процедура восстановления параметров ветра с помощью модели SMOD в случае PCA и его данных – РЛИ в отличие от скаттерометра существенно усложняется. На первом этапе определяется реальное направление ветра или по метеоданным, или по ориентации ветровых полос на РЛИ (Horstmann et al., 1998), или, в случае отсутствия того или другого, на основе счета моделей атмосферы, таких, как европейская модель ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast), американские NCEP (National Centers for Environmental Prediction) и NCAR (National Center of Atmospheric Research) с разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. На втором этапе при известном направлении поле скорости ветра с достаточно высоким разрешением (250–500 м) можно восстановить с помощью скаттерометрической модели SMOD путем преобразования значений интенсивности РЛИ (яркости пикселей) калиброванного PCA-изображения в значения скорости ветра (Stoffelen, Anderson, 1997).

Воспользовавшись синоптическими картами и метеоданными, а также описанным выше подходом, проанализируем ряд РЛИ, которые были получены со спутника Envisat в 2009–2010 гг.

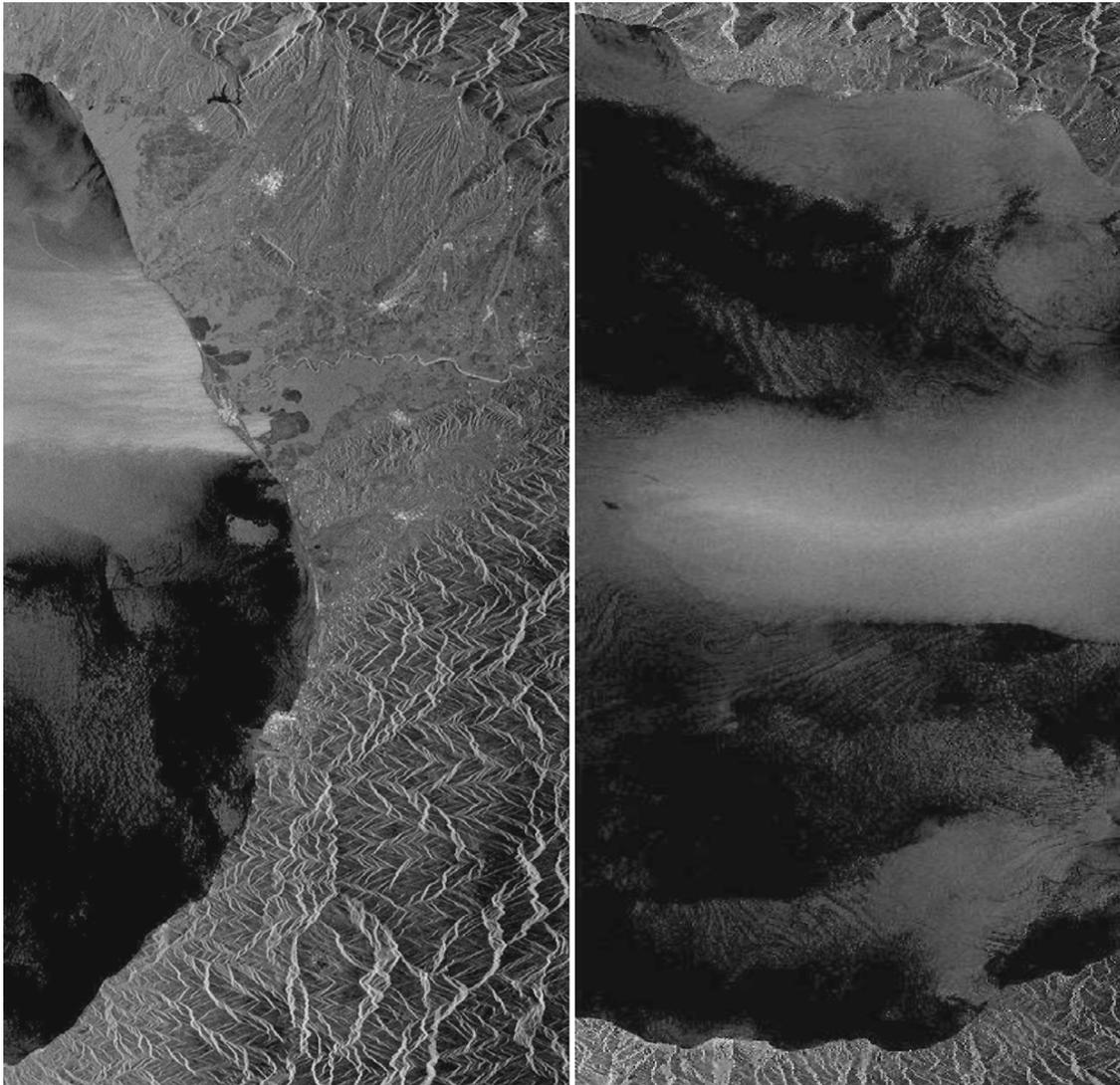
a

Рис. 2. *a* – Выход фёна на море на РЛИ спутника Envisat от 9 и 12.09.2009 в 07:29 и 07:34 UTC соответственно (© ESA); *б* – температура воздуха (вверху), скорость ветра и его порывы (в середине) и относительная влажность (внизу), измеренные на метеостанции в г. Кутаиси с 05:00, 7.09.2009 по 23:00, 13.09.2009 местн. вр. Вертикальные линии показывают время съемки 9.09 и 12.09.2009 по Гринвичу; *в* – поле ветра 9.09.2009 на 06:00 UTC, восстановленное с помощью моделей NCEP и CMOD4 (См. продолжение).

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Совместный анализ синоптических и метеорологических данных и РЛИ выявил две ситуации фёнообразования. Первая из них связана с переваливанием воздушных масс через Лихийский хребет (фён “переваливания” (Бурман, 1969)) и выходом фёна на море в виде локализованной струи, в то время как вторая – с так называемым циклоническим фёном, или фёном “всасывания” (Бурман, 1969), который возникает при циклонической активности в ЮВ части Черного моря. (По Бурману такой фён возникает при прохождении

близки горного хребта глубокого или интенсивного развивающегося циклона и характеризуется сильным стоком воздуха со склонов гор. Этот стокковый поток направляется к центру циклона, компенсируя убыль воздуха вследствие восходящих движений в нем). В качестве признака фёна принимались жесткие критерии к относительной влажности и скорости ветра, измеренными инструментально, – по крайней мере, в течение нескольких сроков она должна быть ниже 40%, а скорость восточного ветра более 10 м/с.

События 9 и 12.09.2009. На рис. 2*a* показаны два последовательных РЛИ Envisat (100 × 200 км),

б

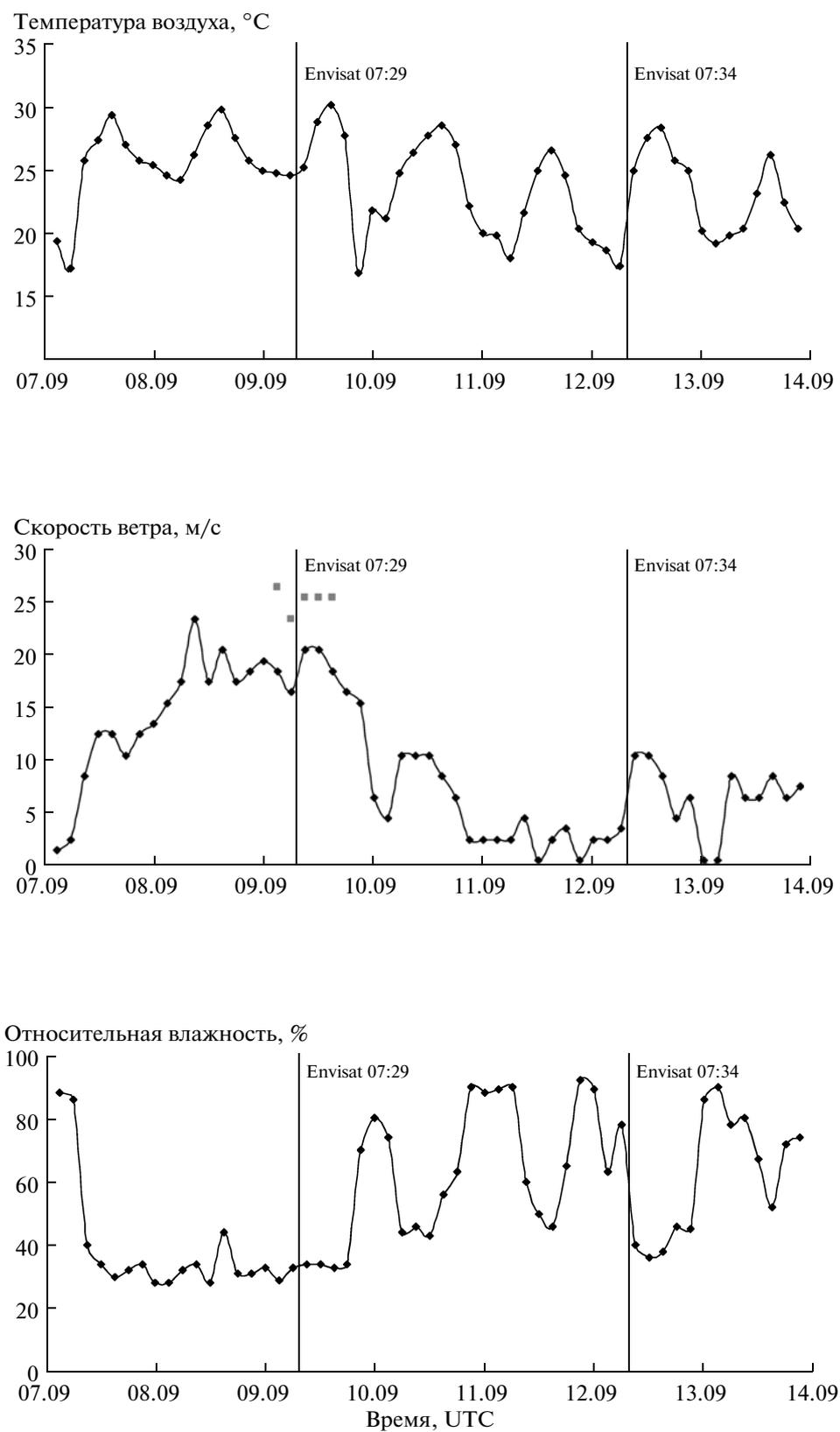


Рис. 2. Продолжение (См. окончание).

которые были получены в режиме Image Mode с разницей по времени 3 сут, т.е. 9 и 12 сентября 2009 г. в 07:29 и 07:34 UTC соответственно над ЮВ частью Черного моря. Они охватывают побережье Черного моря в районе г. Потти и акваторию мористее. Синоптическая ситуация характеризовалась циклонической активностью над ЮЗ частью Черного моря. В момент первой съемки и за несколько часов до нее были зарегистрированы резкое усиление восточного ветра до 20 м/с (порывы до 25 м/с) и падение относительной влажности до 30%; температура воздуха в дневное время достигла 30°C (рис. 2б). Как хорошо известно, такой ход метеорологических параметров характерен для развития фёна (Бурман, 1969). В момент второй съемки были зарегистрированы восточный ветер 10–12 м/с и относительная влажность 40%. Согласно метеоданным (рис. 2б), фён, начавший 9 сентября, продолжался около 2 сут, затем стих, но с 11 на 12 сентября опять наблюдалось кратковременное усиление восточного ветра, очевидно, также носившее характер фёна.

Характерной особенностью РЛИ является наличие широких полос-струй повышенной шероховатости, которые, очевидно, связаны с выходом фёна на море и пространственно привязаны к долине р. Риони. Как уже говорилось, долина реки представляет собой своеобразное пространство, окаймленное предгорьями Большого и Малого Кавказа, способствующее канализации потока и превращению его в струйное течение, в котором скорость ветра может достигать больших значений. Хорошо видно, что поперечный масштаб полос примерно соответствует ширине долины р. Риони.

Поле приводного ветра на 06:00 UTC было восстановлено с помощью моделей NCEP (направление ветра) и CMOD4 (скорость ветра). На рис. 2в показан результат этой процедуры только для 9.09.2009. (Заметим, что этот и последующие аналогичные рисунки представляют собой совмещенно-комбинированные карты: направление ветра показано стрелками — результат NCEP, а цветом — скорость ветра — результат CMOD4.) Видно, что ветер над морем имеет характер струйного потока, в котором скорости ветра достигают 14–16 м/с. Аналогичная ситуация привела к образованию на поверхности моря (РЛИ от 12.09.2009) протяженной струи-языка длиной более 100 км.

Событие 11.01.2010. На рис. 3а показано РЛИ Envisat (100 × 200 км), которое было получено в режиме Image Mode 11 января 2010 г. в 07:31 UTC над ЮВ частью Черного моря. Оно также охватывает побережье Черного моря от г. Потти до Тур-

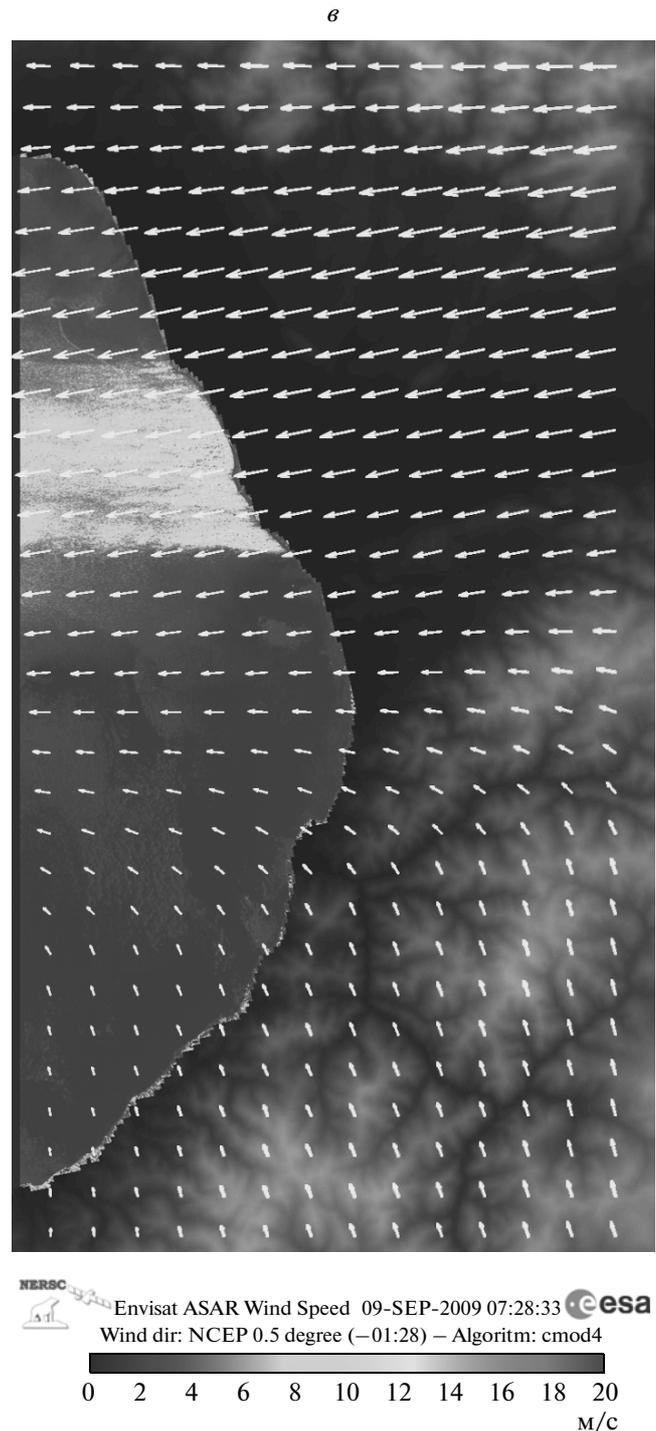


Рис. 2. Окончание.

ции. Синоптическая ситуация характеризовалась циклонической активностью над Балканским полуостровом. На РЛИ отобразилось большое веерообразное пятно повышенной шероховатости, которое связано с выходом фёна на море. Его характерной особенностью является наличие по-

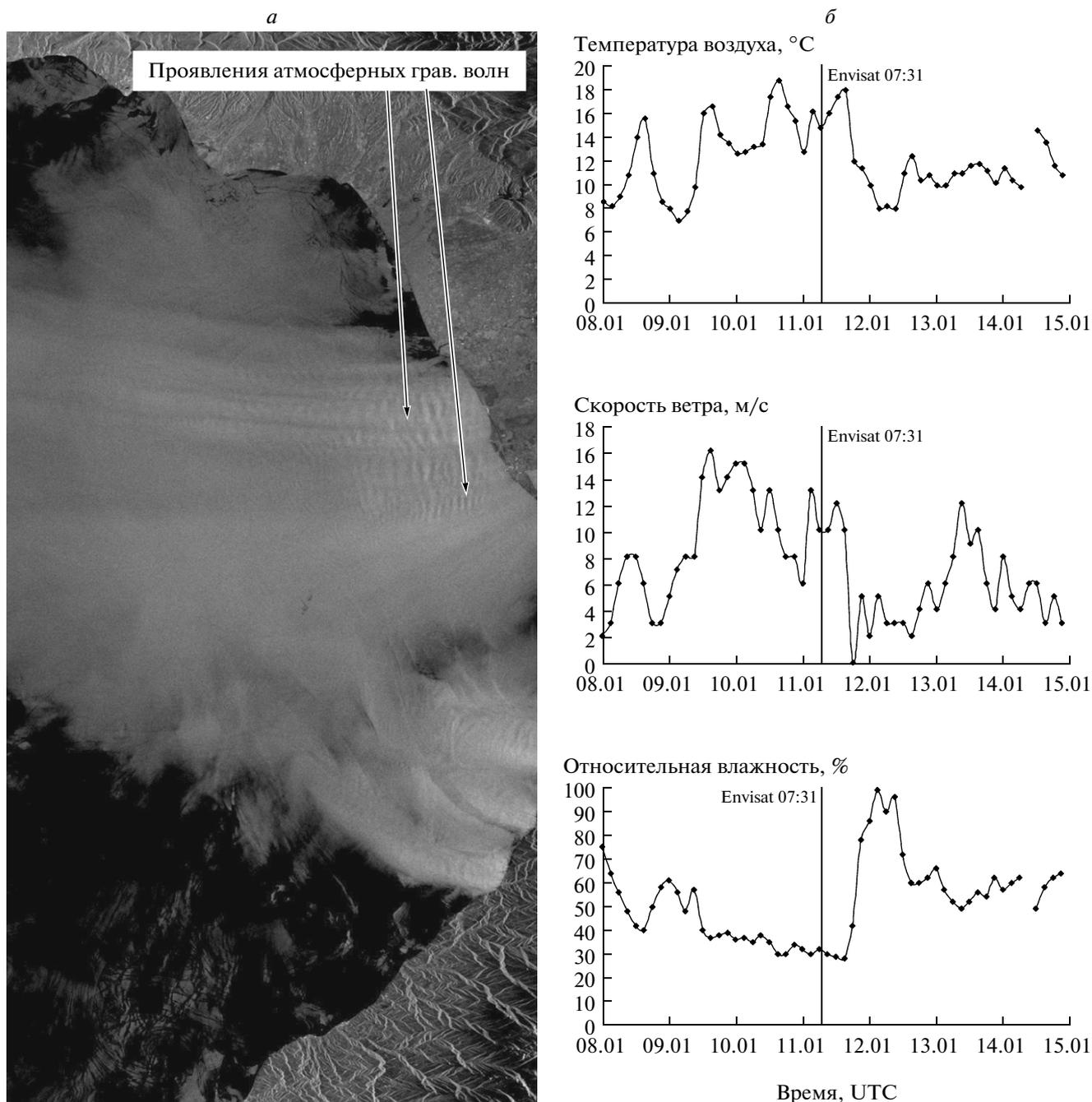


Рис. 3. *a* – Фён на РЛИ спутника Envisat от 11.01.2010 (07:31 UTC) в юго-восточной части Черного моря (© ESA); *б* – температура воздуха (вверху), скорость ветра (в середине) и относительная влажность (внизу), измеренные на метеостанции в г. Кутаиси с 01:00, 8.01.2010 по 22:00, 14.01.2010 местн. вр. Вертикальные линии показывают время съемки 11.01.2010 по Гринвичу; *в* – поле ветра 11.01.2010 на 09:00 UTC, восстановленное с помощью моделей NCEP и CMOD4 (См. окончание).

лос-струй нормальной береговой черте, а также проявлений атмосферных гравитационных волн (АГВ), квазипараллельных берегу. В момент съемки и несколько часов до нее было зарегистрировано усиление восточного ветра до 14–18 м/с (порывы до 20 м/с), падение относительной влажности

до 30–40%, и повышение температуры воздуха в дневное время до 18–19°C. Судя по метеоданным, фён продолжался около 2 сут (рис. 3б).

Одной из особенностей РЛИ является струйно-полосчатая структура, характерная для боры (Иванов, 2008), и наличие трех коротких струй у

выходов горных долин на участке турецкого побережья г. Хопа—г. Ризе. Отмечено, что такая струйно-полосчатая структура проявлений часто наблюдается на РЛИ с фёном в зимнее время (что также показал анализ других РЛИ), в том числе она указывает на наличие нисходящего потока воздуха и на кatabатический характер явления (Иванов, 2008). Проявления АГВ (рис. 3а) могут говорить о двухслойном строении нижнего слоя атмосферы, причем максимальные скорости ветра наблюдаются в слое, прилегающем к поверхности суши, рельеф которой и модулирует поток. Кроме того, их наличие говорит о порывистости ветра при фёне (Иванов, 2008). Струи у турецкого побережья можно проинтерпретировать как эффект усиления горно-долинной циркуляции, обусловленный общим восточным переносом. Это создает конвергенцию воздушных потоков, вырывающихся из Колхидской низменности и с южного побережья Турции.

Поле приводного ветра, восстановленное на 09:00 UTC, показано на рис. 3в. Результаты восстановления поля ветра дают сильный восточный ветер, дующий с суши на море в виде потока, который сначала усиливается над морем до 12–14 м/с, а затем постепенно теряет свою силу. Из рисунка также видно, что фёновая струя немного отклоняется к северу под влиянием вторичных потоков, вырывающихся с южного побережья Турции; просматривается общая циклоническая завихренность потоков. Однако сравнение поля ветра, отобразившегося на РЛИ (реальная ситуация), и результатов моделирования с помощью NCEP показывает и то, что его результат недостаточно точно отображает реальное поле ветра на РЛИ.

Событие 7.12.2009. На рис. 4а показано РЛИ Envisat (400 × 400 км), полученное в режиме Wide Swath Mode 7 января 2010 г. в 07:31 UTC. Оно практически полностью охватывает восточную часть Черного моря, включая российский сектор, побережье Абхазии и Грузии, а также побережье Турции. На нем в поле шероховатости морской поверхности видно начало формирования циклонической циркуляции в ЮВ части Черного моря. Синоптическая обстановка за сутки до съемки характеризовалась отрогом антициклона (1030 гПа), расположенным над югом ЕТР, и циклоном (1005 гПа) над восточной частью Средиземного моря. Движение воздушных масс в такой синоптической ситуации привело к образованию горизонтальных потоков с нисходящей компонентой, вовлеченной в циклоническую циркуляцию. Примерно в это же время в долине р. Риони образовался фён со скоростями ветра 12–14 м/с (рис. 4б). Нисходящие движения воздуха вызвали

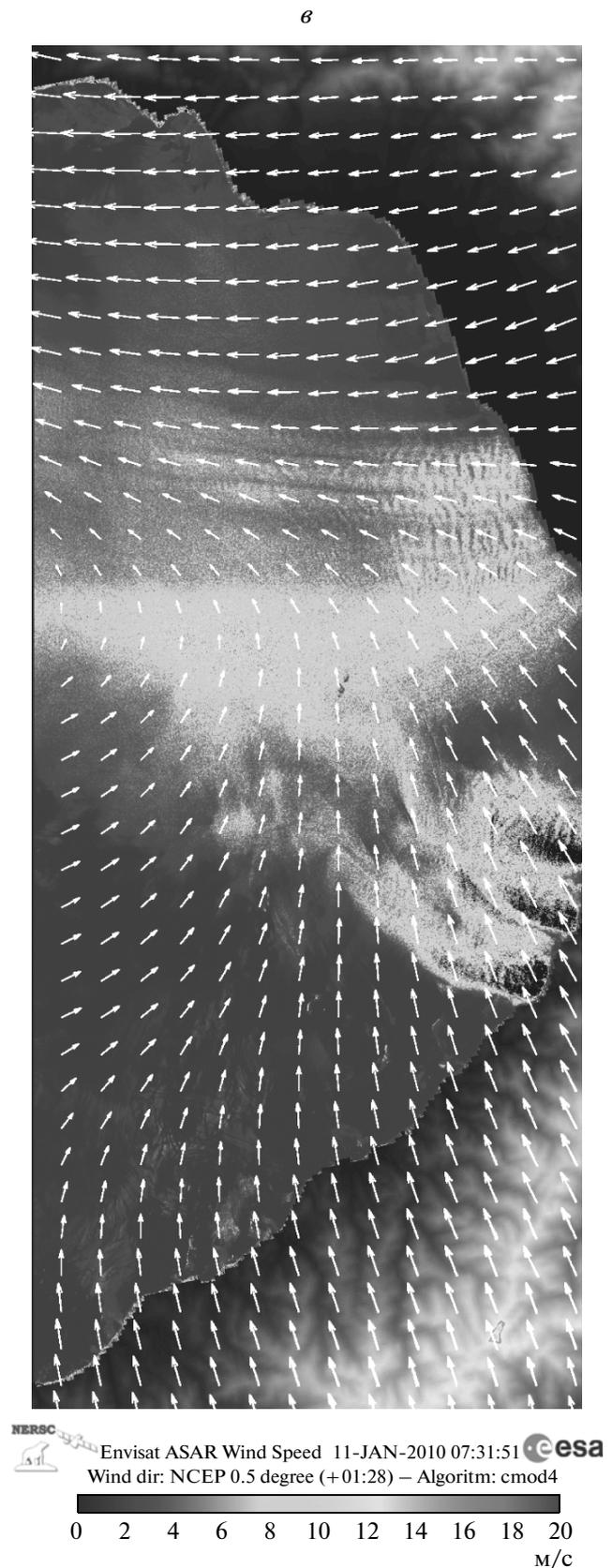


Рис. 3. Окончание.

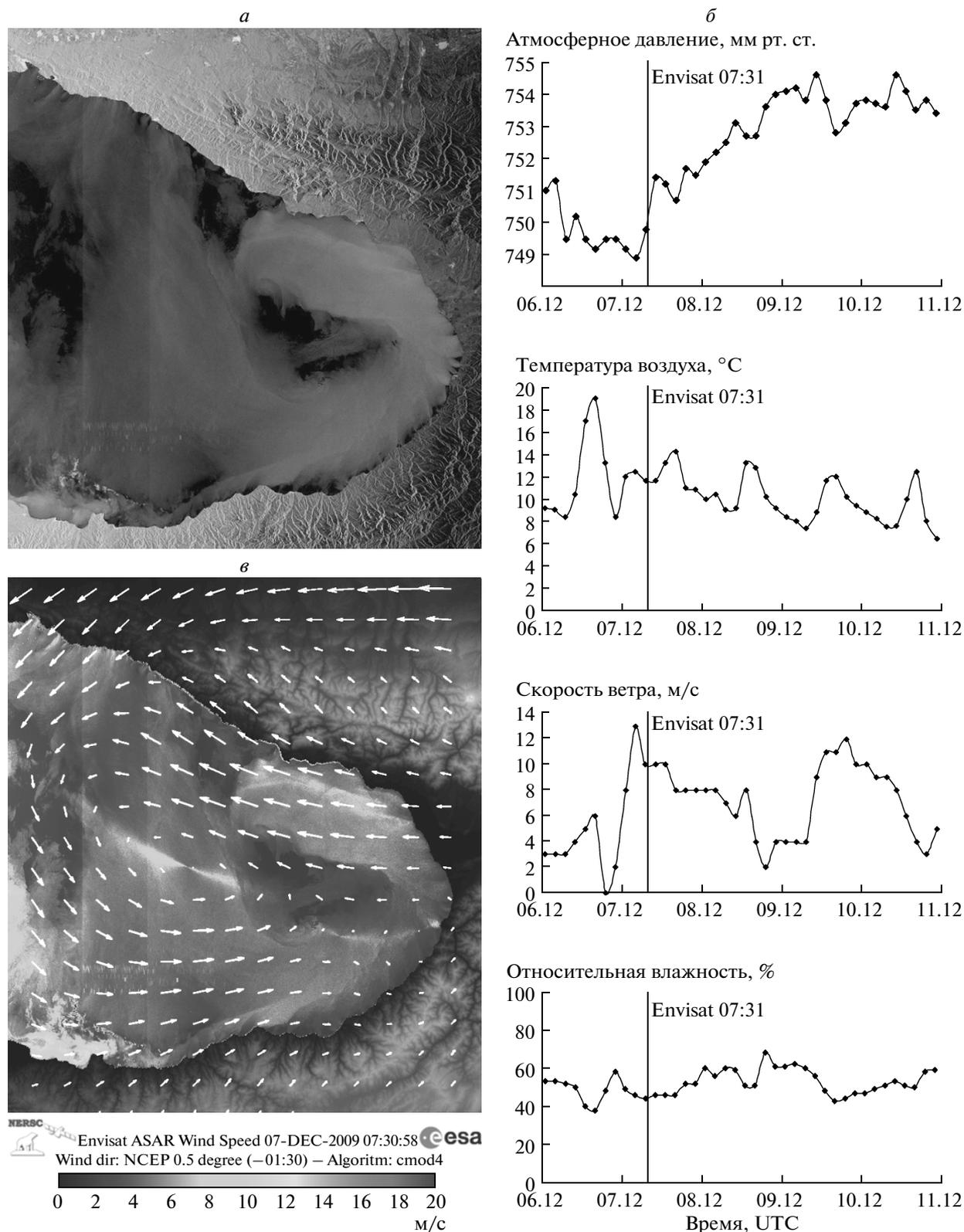


Рис. 4. а – Фён в системе циклонической циркуляции в ЮВ части Черного моря на радиолокационном изображении спутника Envisat от 7.12. 2009 (07:31 UTC) (© ESA); б – атмосферное давление (вверху), температура воздуха (в середине сверху), скорость ветра (в середине снизу) и относительная влажность (внизу), измеренные на метеостанции в г. Кутаиси с 01:00, 6.12.2009 по 23:00, 10.12.2009 местн.вр. Вертикальная линия показывает время съемки 7.12.2009 по Гринвичу; в – поле ветра 7.12.2009 на 06:00 UTC, восстановленное с помощью моделей NCEP и SMOD4.

падение относительной влажности до 38%. Даже несмотря на адвекцию морского воздуха вдоль побережья Турции, температура воздуха в дневные часы возросла до 19°C. Фёновая ситуация сохранялась около 2 сут (рис. 4б), что привело в результате к образованию локального циклона над ЮВ частью Черного моря с давлением в центре 1013 гПа.

Активен фёновый процесс и в боковых долинах. Одной из особенностей этого РЛИ является наличие коротких струй у выходов из горных долин на участке юго-восточного побережья г. Синоп—г. Батуми. Их можно проинтерпретировать как усиление горно-долинной циркуляции, обусловленное эффектом “всасывания” циклона. В местах горных сужений такие ветры могут приобретать штормовой характер. Кроме того, в российском секторе моря (участок побережья Новороссийск—Туапсе) образовалась слабая бора.

Поле приводного ветра, восстановленное на 06:00 UTC, показано на рис. 4в. Скорости ветра в фёновой струе над морем небольшие — 7–10 м/с. На этом рисунке хорошо видна зарождающаяся циклоническая циркуляция над ЮВ частью Черного моря. Анализ РЛИ и поля ветра показывает, что фён, отобразившийся на РЛИ от 7.12.2009, можно отнести к фёнам “всасывания”, который характеризуется стоком воздуха со склонов гор, отклонением потока к северу и встраиванием его в структуру образующегося циклона.

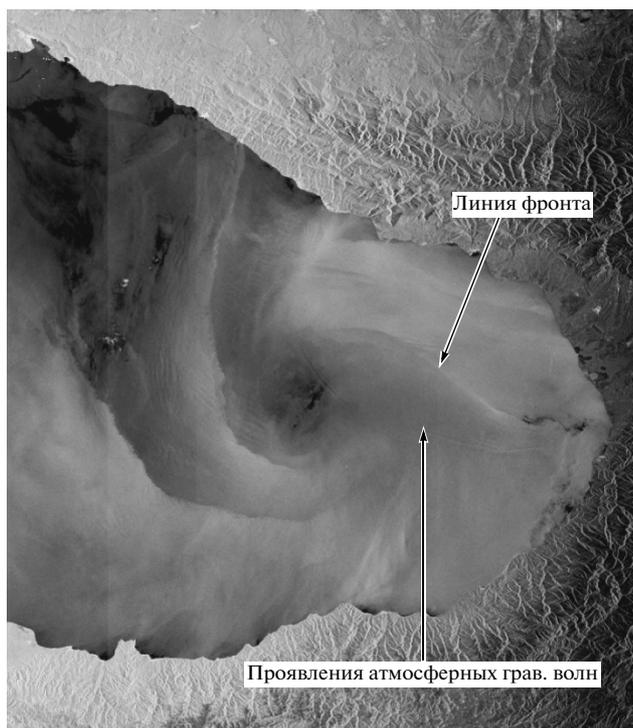
Событие 13.09.2010. На рис. 5а показано РЛИ Envisat (400 × 400 км), полученное в режиме Wide Swath Mode 13 сентября 2010 г. в 07:31 UTC. Оно также практически полностью охватывает восточную часть моря — от побережья российского сектора до южного побережья Турции. На нем в ЮВ части моря в поле шероховатости морской поверхности виден уже практически сформировавшийся циклон. Синоптическая обстановка за сутки до съемки характеризовалась локальным антициклоном (1025 гПа), расположенным над Краснодарской равниной, и циклоном (1002 гПа) над северным Ираком. Движение воздушных масс в такой синоптической ситуации привело к образованию восточного переноса с нисходящей компонентой, вовлекаемой в циклонической вихрь. В итоге в долине р. Риони образовался фён, причем он имел характер мощного воздушного течения, в котором скорости ветра достигали 20–25 м/с (порывы 27–32 м/с, рис. 5б). Нисходящие движения вызвали падение относительной влажности с 80% до 40%. Даже несмотря на адвекцию морского воздуха вдоль побережья Турции (на что указывают ряд струй западной ориентации), температура воздуха в дневные часы возрос-

ла до 28–29°C. Фёновая ситуация сохранялась более 2.5 суток (рис. 5б), что могло способствовать интенсификации локального циклона с давлением в центре 1006 гПа. Кроме всего прочего, усиление восточного ветра совпало с падением давления на ст. Кутаиси (рис. 5б).

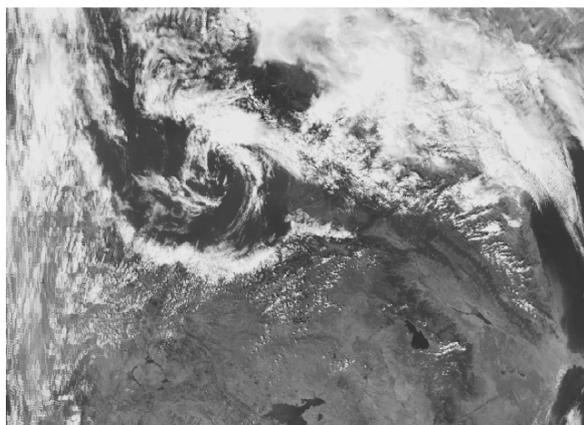
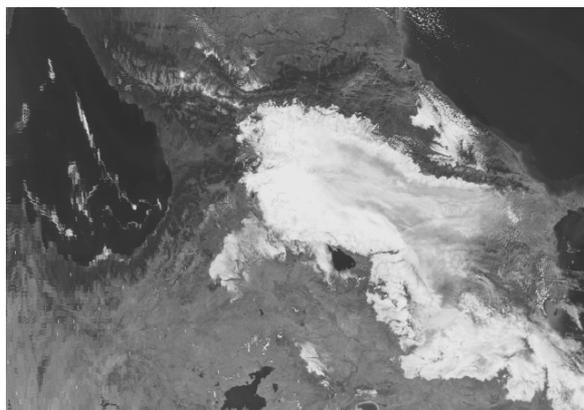
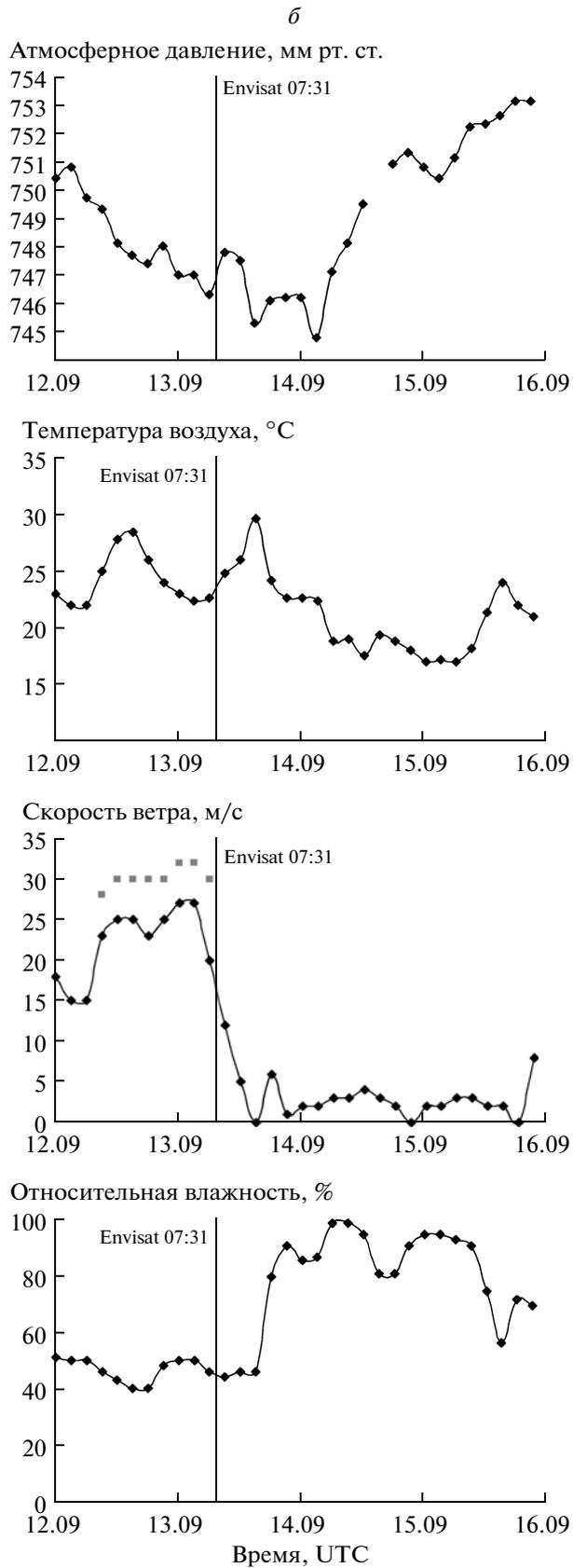
Особенностью этого РЛИ является наличие сформировавшегося локального циклона (рис. 5а), который, по-видимому, образовался в результате взаимодействия генеральных воздушных потоков с хребтами Большого Кавказа (Герман, 1985). Типичная фёновая ситуация (обширная облачность, скопившаяся на восточной стороне Лихийского хребта) и затем сам циклон достаточно хорошо выражены в поле облачности, видимой на снимках Terra и Aqua MODIS от 12 и 13.09.2010, в 07:45 и 10:00 UTC соответственно (рис. 5в). Фён, очевидно, был образован за счет интенсивного стока воздуха со склонов гор и его перемещения в системе циркуляции циклона. В результате этого воздушный поток, как хорошо видно на РЛИ, отклонился к северу. Наконец, циклоническая активность привела к усилению ЮВ ветра в городах абхазского побережья — Сухуми, Гудаута и др. Ось воздушного потока смещена относительно оси долины р. Риони к северу. Обращает внимание наличие фронтальной линии и проявлений АГВ (рис. 5а), что говорит об интенсивном взаимодействии воздушных потоков. На траверсе сухопутной абхазо-русской границы воздушный поток блокируется северо-восточным ветром, дующим с российского побережья, что может являться еще одним аргументом в пользу фёновой природы явления.

Поле приводного ветра, восстановленное на 09:00 UTC, показано на рис. 5г. Так же, как и на РЛИ, в нем отобразилась циклоническая циркуляция с встраиванием в нее воздушного потока, распространяющегося из Колхидской низменности и из северо-восточной части Черного моря. Анализ восстановленного поля ветра показывает, что фён, отобразившийся на РЛИ от 13.09.2010 г., также можно отнести к фёнам “всасывания”. Скорости ветра над морем — от 8 до 14 м/с, причем на некотором расстоянии от берега в отклоняющейся струе наблюдается незначительное его усиление, скорее всего, связанное с влиянием образовавшегося циклона. Опять заметим, что модель NSCFP недостаточно точно восстанавливает поле ветра, отобразившееся на РЛИ, особенно в месте выхода струи на море. Это РЛИ, условия образования циклона и фёна подробно обсуждаются в (Alpers et al., 2011).

а



б



2

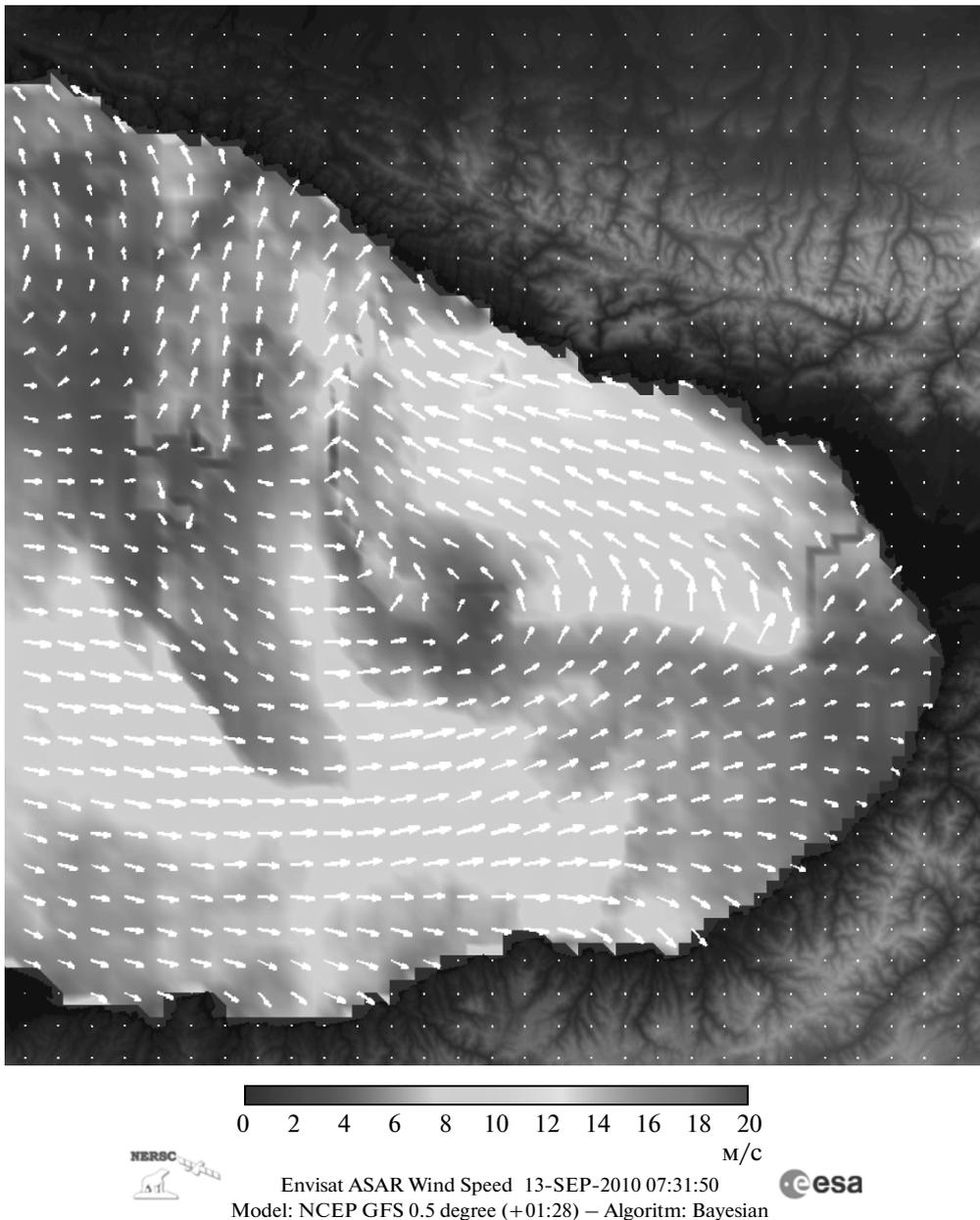


Рис. 5. *a* – Фён в системе циклонической циркуляции в ЮВ части Черного моря на радиолокационном изображении спутника Envisat от 13.09.2010 (07:31 UTC) (© ESA); *b* – атмосферное давление (вверху), температура воздуха (в середине сверху), скорость ветра (в середине снизу) и относительная влажность (внизу), измеренные на метеостанции в г. Кутаиси с 02:00, 12.09.2010 по 23:00, 15.09.2010 местн.вр. Вертикальная линия показывает время съемки 13.09.2010 по Гринвичу; *в* – снимки спектрорадиометра MODIS, на которых отобразилось развитие фёна: вверху – скопление облачности у Лихийского хребта на снимке ИСЗ Terra (12.09.2010, 07:45 UTC), внизу – циклонический вихрь в юго-западной части Черного моря в поле облачности на снимке ИСЗ Aqua (13.09.2010, 10:10 UTC). Оригинальное разрешение 500 м (© NASA GFSC); *г* – поле ветра 13.09.2010 на 09:00 UTC, восстановленное с помощью модели NCEP GFS и байесовского алгоритма.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе приведен и проанализирован ряд РЛИ, полученных из космоса, на которых отобразился выход на море сильного ветра из долины р. Риони. Показано, что отобразившиеся на РЛИ аномалии поверхности моря связаны с фёновым

ветром, дующим с берега на море. Это предположение подтвердил анализ РЛИ, который был подкреплен результатами моделирования, метеоданными, картами приземного анализа и сведениями литературных источников, что в результате позволило определить ряд параметров, характеризу-

ющих фёнов над морем, а в некоторых случаях получить информацию о его динамике.

Космическая радиолокация – один из наилучших методов ДЗЗ для наблюдения эффектов воздействия фёнового ветра на поверхность моря. На РЛИ отображаются специфические поверхностные проявления – широкие полосы повышенной яркости, ориентированные по ветру. Размеры и положение фёновых полос относительно берега определяется рядом причин, среди них отметим орографические особенности как долины р. Риони, так и всей Колхидской низменности с окаймляющими ее горными хребтами, а также циклоническую активность над восточной частью моря. Яркость этих полос тоже различна, что зависит, прежде всего, от силы ветра, который выходит на море, а также от общей синоптической ситуации. Анализ РЛИ также показал, что масштабы распространения фёнового ветра в море составляют 100–120 км, а подобные проявления, судя по продолжительности фёна, могут наблюдаться на поверхности моря в течение 3 сут. Количественные характеристики ветра над морем во время фёна могут быть получены путем обработки РЛИ с использованием модели CMOD4 (Signell et al., 2010; Иванов, 2010).

Следует заметить и то, что поверхностные проявления черноморского фёна на РЛИ морской поверхности несколько отличаются от поверхностных проявлений, создаваемых черноморской борой. На РЛИ бора имеет характерные поверхностные проявления в виде полос-струй, пространственно модулируемых прибрежным рельефом (Иванов, 2008). На РЛИ с фёном такая струйно-полосчатая структура, типичная для боры, присутствует на снимках, полученных в зимнее время, что также указывает на катабатический характер явления.

Обращает внимание наличие на РЛИ групп поперечных полос. Их появление можно объяснить воздействием на поверхность моря атмосферных гравитационных волн, развивающихся в нижнем слое атмосферы. Известно, что во время фёна наблюдаются резкие колебания температуры и влажности вследствие встречи теплого воздуха фёна с холодным воздухом, заполняющим долины (Бурман, 1969). Кроме того, при взаимодействии стратифицированного воздушного течения с локальными формами рельефа могут возникать волны в атмосфере, результатом чего могут быть характерные полосчатые поверхностные проявления, видимые на РЛИ (рис. 3а). Исследование этого явления позволяет оценить порыви-

стость ветра при фёне, впрочем, так же, как и при боре (Иванов, 2008; Signell et al., 2010).

На РЛИ удалось наблюдать интересное явление – фёны “всасывания”, обусловленные формированием локального циклона в ЮВ части Черного моря. Представляется, что РЛИ позволили получить ответ на главный вопрос – локальный циклон, образующийся над морем, провоцирует образование интенсивного фёна в долине р. Риони.

По-видимому, один из интересных и неисследованных эффектов фёна – это его влияние на динамику Основного черноморского течения (ОЧТ). Можно предположить, что фёновый ветер, дующий в течение нескольких суток над ЮВ частью Черного моря, так или иначе может приводить к интенсификации ОЧТ. Более того, совместный эффект фёна и боры (в СВ части моря), дующих попеременно, может создавать своеобразную “раскачку” ОЧТ. В связи с этим и другими научными проблемами, затронутыми выше, настоящие исследования, несомненно, должны быть продолжены.

Наконец, применение космической радиолокации для наблюдения и изучения местных ветров (боры, фёнов, бризов и т.п.) над морем по их поверхностным проявлениям с восстановлением ряда их параметров (что традиционными методами получить невозможно) представляется перспективным направлением ДЗЗ.

РЛ-данные спутника Envisat, использованные в работе, были получены в рамках проектов АО Envisat C1P.3424 и C1P.8116 из Европейского космического агентства. Автор благодарит проф. В. Альперса из Гамбургского университета за плодотворные дискуссии о предмете статьи; специальная обработка РЛИ была выполнена К.-Ф. Дагестадом (Центр им. Нансена, г. Берген), чей вклад в данное исследование отмечается с благодарностью. Метеорологические данные взяты на сайте “Расписание погоды” (<http://rp5.ua>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурман Э.А. Местные ветры. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 342 с.
- Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
- Дашко Н.А. Курс лекций по синоптической метеорологии. Владивосток: ДВГУ, 2005.
- 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.

- Прох Л.З. Словарь ветров. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 312 с.
- 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. 2010. № 5. С. 46–58.
- 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 Symposium 28 June–2 July 2010, Bergen, Norway (ESA SP-686).
- 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 Review. 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.
- Alpers W., Ivanov A., Horstmann J. Observations of bora events over the Adriatic Sea and Black Sea by spaceborne synthetic aperture radar // Monthly Weather Review. 2009. V. 137. P. 1150–1161.
- Alpers W., Pahl U., Gross G. Katabatic windfields in coastal areas studied by ERS-1 synthetic aperture radar imagery and numerical modeling // J. Geophys. Res. 1998. 103. P. 7875–7886.
- Demin V.I., Zykov E.V. The foehns in the Khibiny mountains // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXVIII Annual Seminar. Kola Science Center, Russian Academy of Science. Apatity, 2005. P. 199–202.
- Gunia G., Tskvitinidze Z., Kholmatjanov B., Fatkhullaeva Z. Influence of foehn phenomena on the processes of atmospheric air pollution // Bull. Georgian Nation. Acad. of Sci. 2008. № 2(3). P. 65–69.
- Horstmann J., Koch W. Comparison of SAR wind field retrieval algorithms to a numerical model utilizing Envisat ASAR Data // IEEE J. Ocean Eng. 2005. 30. P. 508–515.
- Horstmann J., Koch W., Lehner S., Rosenthal W. Ocean wind field and their variability derived from SAR // Earth Observ. Quart. 1998. 59. P. 8–12.
- Horstmann J., Lehner S., Koch W., Tonboe R. Computation of wind vectors over the ocean using spaceborne synthetic aperture radar // Johns Hopkins APL Tech. Dig. 2000. 21(1). P. 100–107.
- Ivanov A.Yu., Alpers W., Litovchenko K.Ts. et al. Atmospheric front over the East China Sea studied by multi-sensor satellite and in-situ data // J. Geophys. Res. 2004. V. 109(C12). C12001 doi:10.1029/2004JC002432.
- Ivanov A.Yu., Alpers W., Sumyatov A. Bora in the Adriatic Sea and Black Sea imaged by the Envisat synthetic aperture radar / Proc. Envisat Symposium-2007, 23–27 April 2007, Montreux, Switzerland (ESA SP-636).
- Monaldo F., Kerbaol V. and the SAR Wind Team. The SAR measurement of ocean surface winds: An overview / Proc. 2nd Workshop on Coastal and Marine Applications of SAR. 2003. Svalbard, Norway.
- Monaldo F.M., Thompson D.R., Beal R. et al. Comparison of SAR derived wind speed with model predictions and ocean buoy measurements // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2001. 39. P. 2587–2600.
- 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. 115. doi:10.1029/2009JC005524.
- Stoffelen A., Anderson D. Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4 // J. Geophys. Res. 1997. 102. P. 5767–5780.

Foehn in the South-Eastern Black Sea Imaged and Studied with SAR

A. Yu. Ivanov

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow

Synthetic aperture radar (SAR) images of the European Envisat satellite are used to investigate the strong easterly wind events associated with foehns blowing from the lowland of the Rioni River valley, Western Georgia, onto the sea. It is shown that effect of the foehn wind on the sea results in characteristic surface manifestations, which are clearly seen on the SAR images of the sea surface. SAR images allowed determining of a number on its characteristics and revealing details of the spatial extent of the foehn wind over the sea. In dependence of synoptic situations, the foehn can spread over large marine area in the south-eastern part of the Black Sea. Conclusion is done that application of SAR data and images for monitoring and study of foehn events allows getting useful information about this atmospheric phenomenon.

Keywords: South-Eastern Black Sea, foehn, wind field, synthetic aperture radar, SAR images