

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МЕСТНЫЕ КАТАБАТИЧЕСКИЕ ВЕТРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
И ИХ НАБЛЮДЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОЙ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

© 2019 г. А. Ю. Иванов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», Москва
E-mail: ivanoff@ocean.ru

Поступила в редакцию 27.06.2019 г.

Данные радиолокаторов с синтезированной апертурой предоставляют новые возможности для наблюдения и изучения местных кatabатических ветров (бора и фён) над морями в различных регионах Российской Федерации и прилегающих стран. Воздействие этих ветров на характеристики мелкомасштабного ветрового волнения приводит к формированию характерных проявлений на поверхности моря, которые в свою очередь отображаются на космических радиолокационных изображениях (РЛИ). Данные спутниковой радиолокации, в отличие от подспутниковых наблюдений, позволяют увидеть явление в прибрежных зонах морей и крупных озер, судить об их пространственных масштабах и определить ряд количественных характеристик. Анализ массива РЛИ показывает, что местные ветры — бороподобные и фёноподобные, имеют похожие характеристики и охватывают обширные акватории внутренних и окраинных морей РФ. Схожесть проявлений местных ветров однозначно говорит об одних и тех же физических и аэрогидродинамических механизмах их возникновения и отображения на РЛИ. Показано, что данные космической радиолокации, представляющие собой двумерные картины «замороженного ветра», крайне полезны для исследования и мониторинга местных ветров над морями РФ, и особенно там, где сеть метеостанций крайне редка.

Ключевые слова: местные ветры, бора, фён, космическая радиолокация, радиолокационные изображения, морская поверхность

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019515-35>

ВВЕДЕНИЕ

Местные ветры представляют собой весьма распространенное метеорологическое явление (Хромов, 1968). Они создают опасные условия для авиации, судоходства, сельского хозяйства, прочей хозяйственной и рекреационной деятельности человека, особые условия переноса аэрозолей и атмосферных загрязнений (Стеховский и др., 1971; Прох, 1983; Шелковников, 1985). Всестороннее изучение режима местных ветров России, кроме всего прочего, необходимо и в связи с освоением новых территорий, главным образом в Арктике.

Большинство исследователей (Хромов 1968; Бурман, 1969, и др.) определяют местный ветер, как ветер, образующийся в определенном пространственно ограниченном районе и обладающий характерными местными физико-географическими особенностями. Он может быть результатом: 1) взаимодействия общей циркуляции атмосферы с местной орографией (фён, бора, ветры горных перевалов), 2) проявления локальной циркуляции, независимой от общей

циркуляции (бризы, горно-долинные ветры), 3) осложнения общей циркуляции специфическими, особыми для данного района явлениями такими, как высокая температура воздуха или запыление (афганец, буран, сирокко, хамсин), и 4) проявления мощных конвективных явлений в атмосфере, иногда вихревого характера (вихри, пыльные бури).

Представление о характере местных ветров можно получить в результате анализа метеорологических, аэрологических, синоптических и физико-географических условий (Хромов, 1968; Шелковников, 1985). В настоящее время благодаря появлению высокоразрешающего моделирования появилась возможность оценить общие условия возникновения и развития многих местных ветров, что позволяет усовершенствовать методы их прогноза. Однако в последнее время, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в частности радиолокационные, позволяют не только увидеть местные ветры в поле шероховатости поверхности моря (МП) или т.н. замороженного ветра, но получить ряд их количественных характеристик.

Современные методы ДЗЗ позволяют не только наблюдать местные ветры в прибрежных районах моря, где они развиваются, но и получить ряд их характеристик, даже при отсутствии непосредственных подспутниковых наблюдений в данной точке.

Местные кatabатические (нисходящие) ветры являются, с одной стороны, одними из наиболее опасных ветров, а с другой — наиболее изученными традиционными методами (Бурман, 1969). Они возникают при переваливании потоками воздуха горных препятствий, где на подветренных склонах возникают нисходящие потоки воздуха, которые в одних случаях приносят резкое повышение температуры и уменьшение влажности (фёны), а в других — резкое похолодание (бора), и которые сопровождаются штормовой силой ветра. В табл. 1 дана краткая характеристика местных кatabатических ветров.

Бора и бороподобные ветры — местные ветры направленной циркуляции (иначе: кatabатические струйные ветры). Они встречается почти во всех горных районах, однако в силу различия физико-географических условий отличаются друг от друга местными особенностями. Боры развиваются на берегах и прибрежных зонах морей, отделенных от континента невысокими горными хребтами, и обычно сопровождаются резкими усилениями ветра, порывами, похолоданием (Бурман, 1969). В РФ наиболее известна новороссийская бора — крайне яркий пример местного ветра типа боры. Район Новороссийска и северо-восточное побережье Черного моря

по своим условиям наиболее благоприятно для ее развития.

Другой известный кatabатический ветер носит название фён (нем. Föhn, от лат. Favonius — теплый) — это сильный, порывистый, теплый и сухой местный ветер, дующий с высоких гор в долину. Фёны — вынужденные нисходящие движения (под влиянием орографии), развивающиеся за счет кинетической энергии основного воздушного течения над горами. Сравнительно высокая температура и малая влажность при фёнах обусловлена адиабатическим нагреванием воздуха при его движении вниз по горным склонам. Температура может достигать максимальных значений для данного времени года и района, а относительная влажность опускаться ниже 30%. В случае, если этот ветер вырывается из долины на море, то на его поверхности создаются характерные проявления (Иванов, 2012). Так, в западной Грузии расположено одно из известных мест образования фёнов — здесь образуется колхидский фён. В Крыму фён наблюдаются как на северных, так и южных склонах крымской яйлы.

Однако подобного рода явления наблюдаются в разных регионах РФ. Известны новоземельская бора, сарма и другие ветры типа боры (Бурман, 1969; Прох, 1983). Наиболее изученной является бора на Адриатическом море (Alpers et al., 2009), однако, благодаря климатическим и топографическим особенностям, она часто не сопровождается столь аномально сильным падением температуры и скоростью ветра как новороссийская

Таблица 1. Классификация местных кatabатических ветров (ветры направленной циркуляции) по Бурману (1969)

Ветер	Генетическая характеристика		Морфологическая характеристика		Общепринятое определение
	Особенность топографии	Особенность возмущения основной циркуляции	Пространственно-кинематическая	Временная	
Фён	Горные хребты	Механическое, непериодическое, при обтекании горного препятствия в вертикальной плоскости	Нисходящие потоки умеренной силы и значительной вертикальной мощности	Непериодический ветер	Теплый и сухой ветер, дующий со стороны гор
Бора	Невысокие горные хребты на берегах морей или озер	Механическое, непериодическое, при сужении воздушного потока в вертикальной плоскости и падении его по склону	Нисходящие потоки большой и очень большой силы и малой вертикальной мощности. Уменьшение скорости ветра с высотой	Непериодический ветер, иногда усиливающийся ночью	Холодный, очень сильный ветер, дующий с невысокого берега на море
Стоковый	Покрытые материковым льдом протяженные склоны				

или новоземельская бора. Кроме того, среди бороподобных ветров отметим бакинский норд, южаки на материковом побережье российской Арктики, улан — холодный западный ветер в Иссык-Кульской котловине и др. (Бурман, 1969; Прох, 1983). Достаточно хорошо известны и описаны ветры оз. Байкал. Горная и ее частный случай, сарма — местные ветры типа боры, которые наблюдаются при северо-западном переносе воздушного потока, когда холодный воздух, переваливая через прибрежные хребты, сваливается в котловину оз. Байкал.

Поверхностные проявления, которые создают бора и фён на радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности, исследовались в работах (Иванов, 2008, 2012, 2016; Ivanov, 2012; Иванов и Антонюк, 2013; Гавриков и Иванов, 2015; Иванов и Терлева, 2018, Alpers et al., 2009, 2010). Кроме того, в этих работах были заложены методологические основы анализа и интерпретации РЛИ и снимков из космоса, отображающих проявления сильных местных кatabатических ветров.

В результате было установлено, что механизм отображения сводится к тому, что эти ветры, создающие нисходящие потоки воздуха, активно взаимодействуют с МП, генерируя мелкомащтабное ветровое волнение, которое в свою очередь интенсивно рассеивает РЛ-сигнал в сторону антенны космических радиолокаторов — РСА. Кроме того, формы прибрежного рельефа, такие как ущелья, каньоны, долины горных рек и т.п. существенно видоизменяют этот поток, заставляя его разбиваться на ряд квазипараллельных струй. В итоге, это приводит к образованию характерных полосообразных сигнатур — полос-струй светлого тона на РЛИ.

В общем случае анализ спутниковых РЛ-данных дает качественную информацию, однако современные методы анализа РЛИ позволяют восстанавливать поле ветра над морем с помощью различных подходов и моделей. При известном направлении ветра — фактически по ориентации ветровых полос на РЛИ — скорость ветра легко может быть восстановлена по РЛ-данным с помощью скаттерометрических моделей типа СМОД (см. (Иванов, 2012)). Или независимо с помощью глобальных атмосферных моделей NCEP GFS (Global Forecast System) (Signell et al., 2010; Alpers et al., 2010, 2015; Иванов, 2012). Следует также упомянуть и мезомащтабные модели, такие как WRF и WRF-ARW (Weather Research and Forecasting), которые позволяют полностью восстановить картину явления и с точки зрения моделирования дают

наилучший результат (Ефимов, Барабанов, 2013; Торопов и др., 2013; Гавриков, Иванов, 2015). В итоге, благодаря этому в последнее время стало возможно наблюдение и мониторинг кatabатических ветров с помощью космической радиолокации, и в этом направлении получены интересные результаты (Askari et al., 2003; Иванов, 2008, 2012, 2016; Alpers et al., 2010; Signell et al., 2010).

Цель настоящей статьи — обобщение результатов наблюдения кatabатических местных ветров над морями РФ с помощью космической РЛ-съемки, демонстрация схожести их сигнатур и аэрогидродинамических процессов, приводящих к их образованию. Сильные кatabатические ветры, создающие характерные поверхностные проявления на МП, в настоящее время на Черном море и Адриатике изучены с помощью космической радиолокации достаточно хорошо. Однако подобным явлениям в других регионах РФ внимание уделялось мало или не уделялось вообще. Кроме того, в связи с постоянным развитием системы наблюдений, а также с освоением ранее необжитых территорий России все больше внимания уделяется местным ветрам как важному фактору, влияющему на условия погоды и производственную деятельность человека. Именно это побудило автора написать настоящий обзор. Автор, с одной стороны, стремился показать разнообразие местных ветров, возникающих над морями России, а с другой — то, что они создают похожие поверхностные проявления, что позволяет проводить их наблюдение и изучение с помощью данных ДЗЗ.

Наконец, следует заметить, что общие сведения и описание местных ветров взяты из работ Бурмана (1969), Проха (1983) и Российского гидрометеорологического энциклопедического словаря (2008–2009) и за редким исключением ссылками не отмечаются.

НОВОРОССИЙСКАЯ БОРА И ЧЕРНОМОРСКИЙ ФЁН

Одно из наиболее известных в РФ экстремальных метеоявлений — новороссийская бора — наиболее яркий пример местного сильного кatabатического ветра. Район Новороссийска и северо-восточное побережье Черного моря по своим условиям наиболее благоприятно для развития боры. Здесь она нередко достигает скорости 30–40 м/с. Ее продолжительность составляет от 2 до 7–8 дней, она наблюдается по разным оценкам от 50 до 70 дней в году. Здесь не будем подробно останавливаться на описании и характеристиках

этого явления — отошлем читателя к многочисленным публикациям на эту тему, в которых исследовались различные аспекты новороссийской бора (Новороссийская бора, 1959; Бурман, 1969; Иванов, 2008, 2012, 2016; Ivanov, 2012; Иванов, Антонюк, 2012, 2013; Ефимов, Барабанов 2013; Гавриков, Иванов, 2015; Иванов, Терлеева, 2018).

Примерно раз в 5–10 лет в Новороссийске и окрестностях случается аномально сильная бора с ветром силой 30–50 м/с, что приводит к стихийным бедствиям. По данным Евсеевой (2013) катастрофические боры в регионе в XX в. случались в 1899, 1907, 1911, 1928, 1935, 1954, 1963, 1969, 1976, 1983, 1993, 1997 и 2002 гг. Последний случай аномально сильной боры произошел в конце января — начале февраля 2012 г., причем, скорость ветра в районе Новороссийска достигала 30–40 м/с с порывами до 40–50 м/с; температура воздуха упала с +10 ° до –19 °С (Иванов, Антонюк, 2013).

Интересен и тот факт, что с увеличением высоты горных хребтов (до 1000 м и более) к югу

от г. Туапсе повторяемость и сила боры быстро уменьшается; так, южнее Туапсе она уже значительно ослабевает, а, начиная с Лазаревского, на побережье Большого Сочи не наблюдается вообще (рис. 2).

Классический фён образуется над Колхидской низменностью при вторжении холодного воздуха с востока, когда развивается дивергенция воздушных потоков. Это теплый восточный ветер с гор (может поднять температуру воздуха до 30 °С, а относительную влажность воздуха опустить до 20% и ниже), продолжающийся от одних суток до недели, иногда достигает силы урагана.

В качестве иллюстрации на рис. 1 показан пример отображения на РЛИ мощного черноморского фёна, дующего из Колхидской низменности (долины р. Риони). На рис. 2 — пример отображения сильной новороссийской боры, случившейся в конце весны 2018 г. Хорошо видно, что на первом РЛИ длина полос струй достигает более 200 км, а бора охватывает значительную часть СВ части Черного моря.

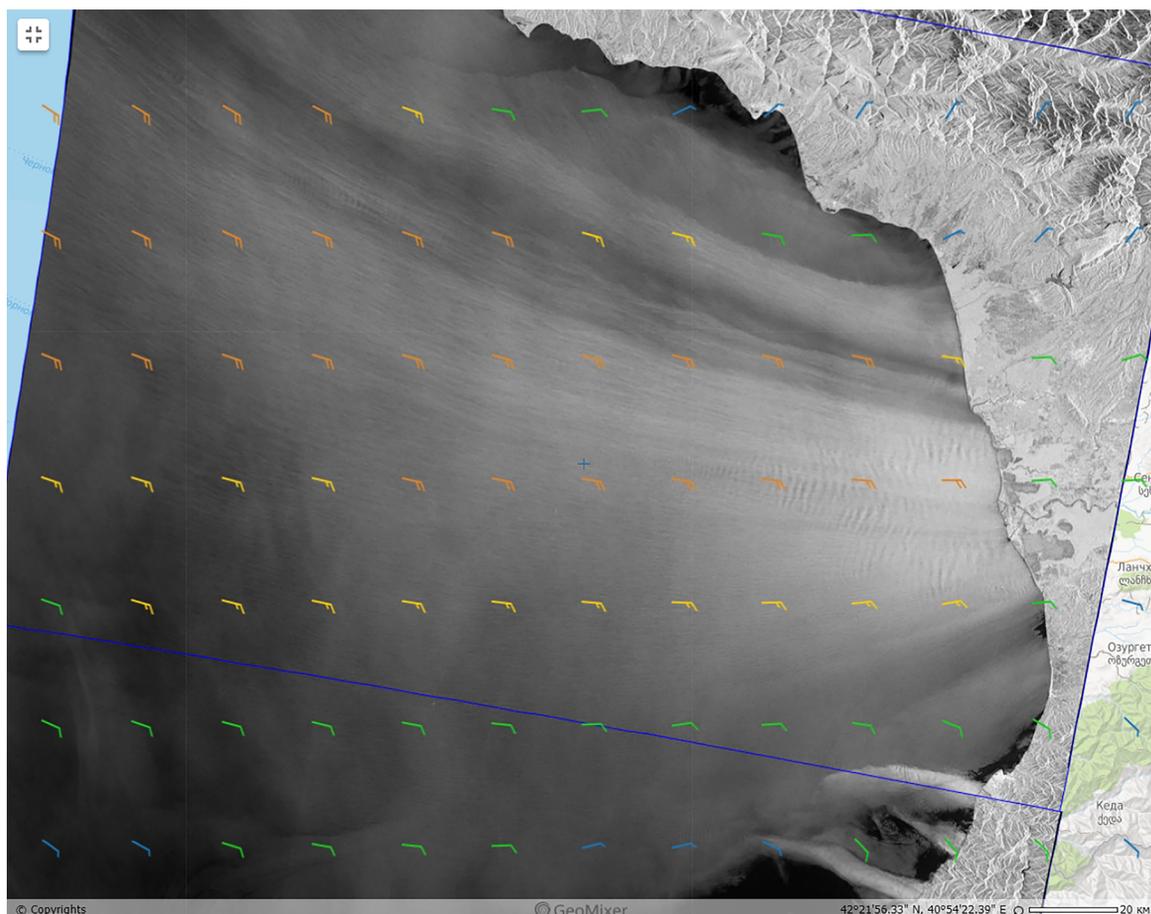


Рис. 1. Черноморский фён (из долины р. Риони, Грузия), отобразившийся на РЛИ спутника Sentinel-1A от 03.12.2017, 03:23 UTC (модельный ветер на 06:00 UTC; ветер над морем 8–10 м/с). © ESA

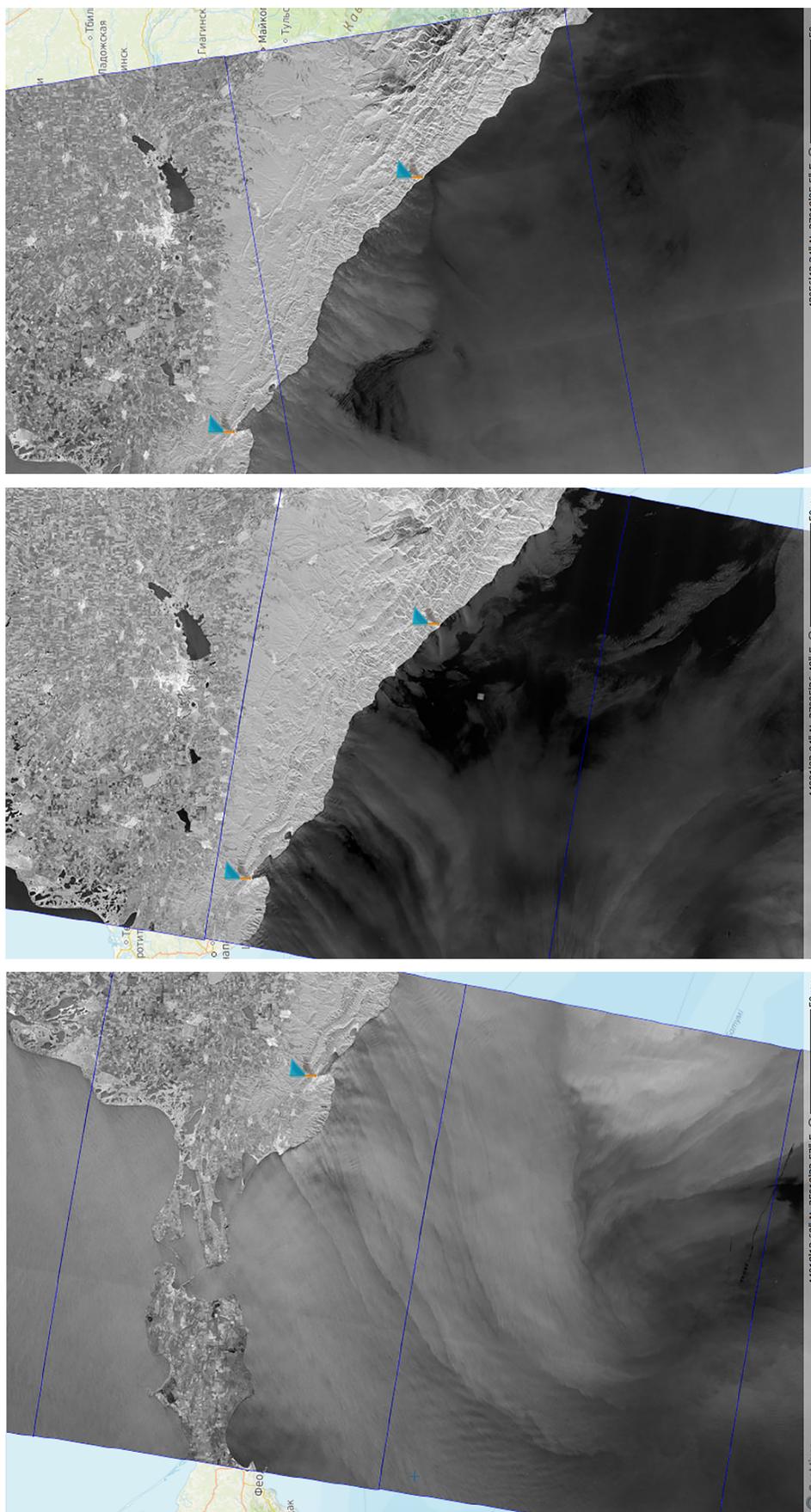


Рис. 2. Пример регистрации новороссийской боры на последовательных РЛИ спутников Sentinel-1B и Sentinel-1A от 30.05, 31.05 и 01.06.2018 (флажками отмечены г. Новороссийск и пос. Лазаревское, южнее которого бора фактически не развивается). © ESA

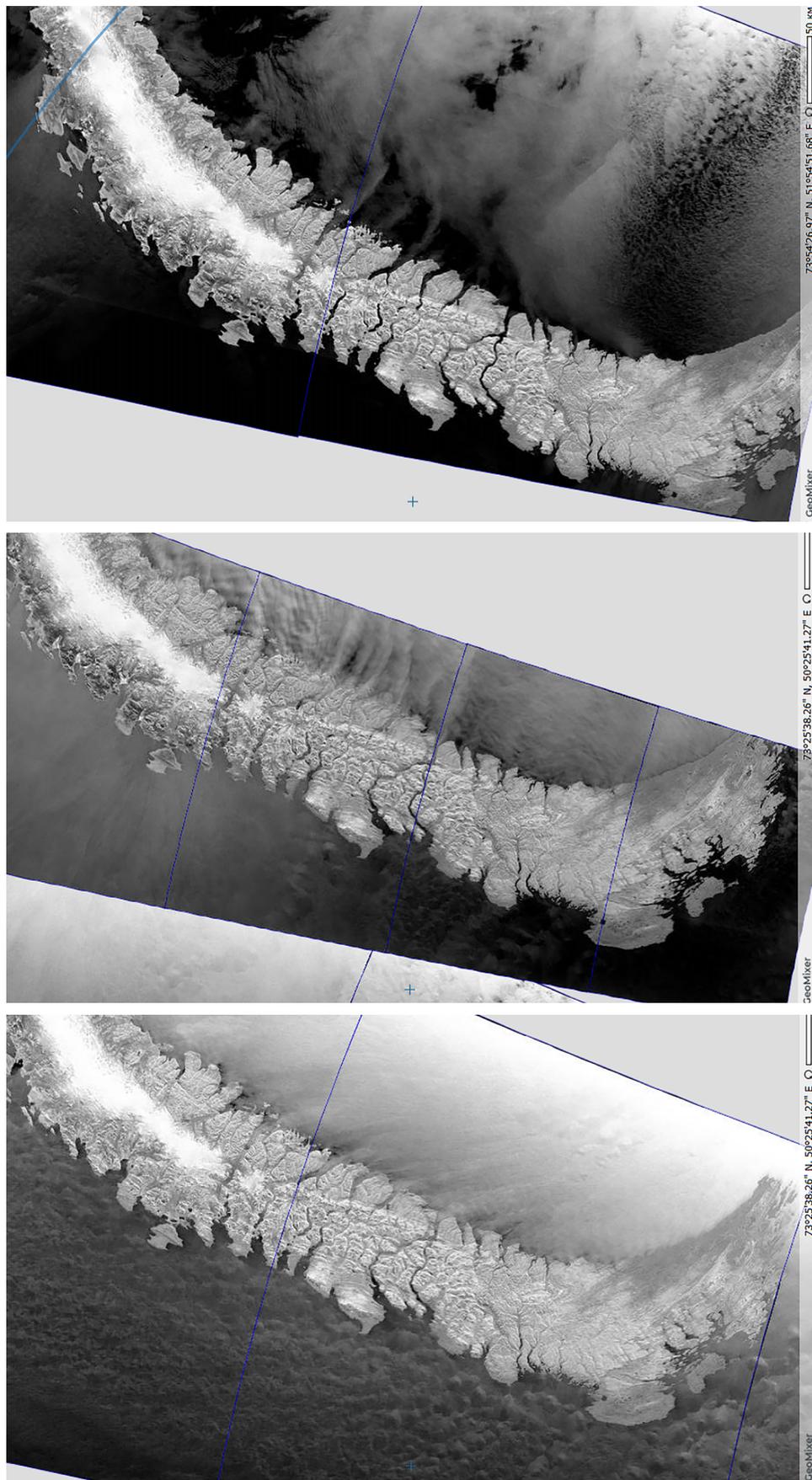


Рис. 3а. Западная новоземельская бора, отобразившаяся на последовательных РЛИ спутников Sentinel-1А и Sentinel-1В: 10.10.2017 (03:15 UTC), 11.10.2017 (03:06 UTC) и 12.10.2017 (02:59 UTC). © ESA

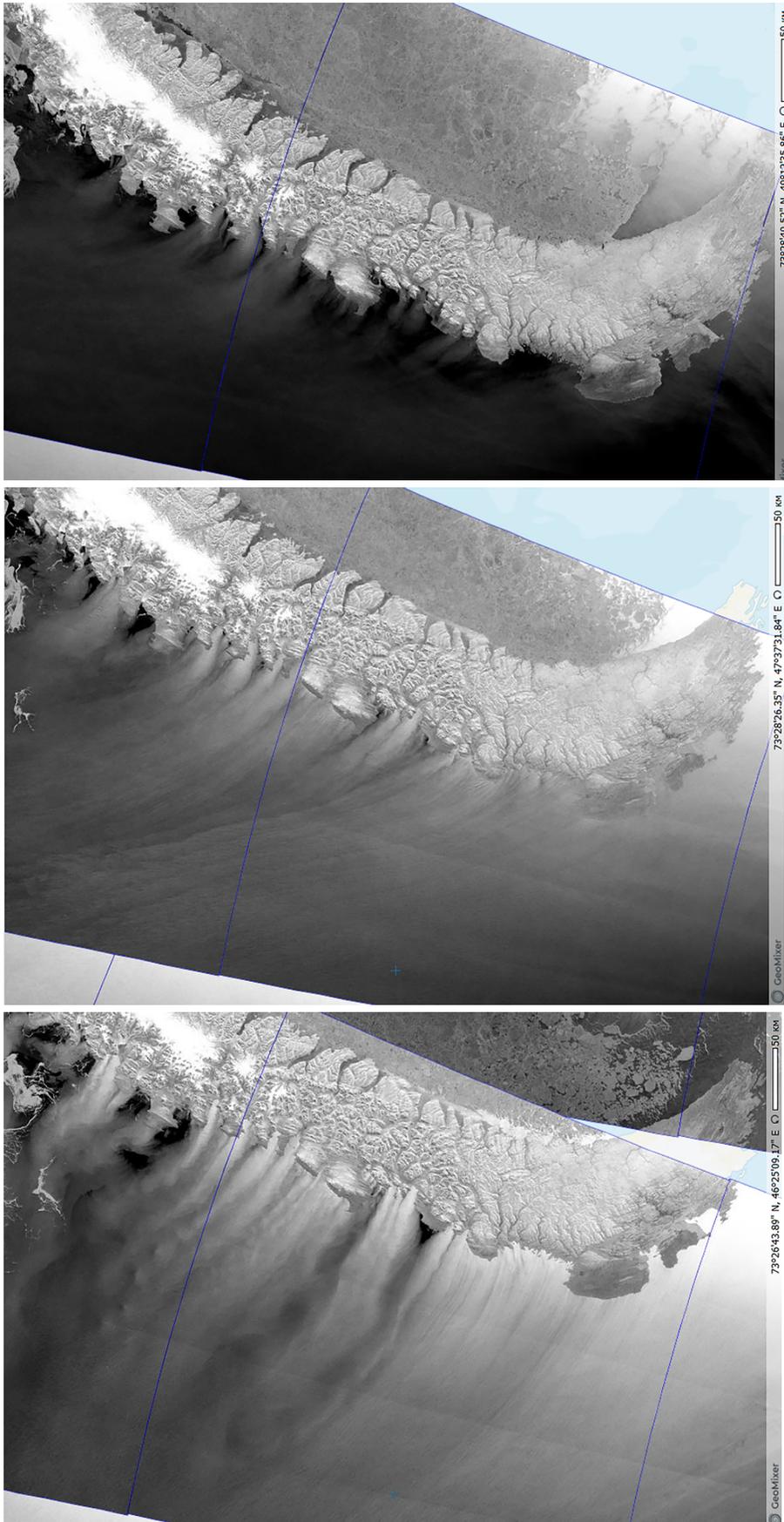


Рис. 36. Восточная новосибирская бора, отобразившаяся на серии последовательных РЛИ спутников Sentinel-1A/1B: 13.05.2019 (03:31 UTC), 14.05.2019 (03:24 UTC) и 15.05.2019 (03:15 UTC); ее продолжительность была 8 суток. © ESA

НОВОЗЕМЕЛЬСКАЯ БОРА

Исследованию новоземельской боры посвящено значительно меньшее количество работ (Иванов, 2017; Шестакова, 2017; Ефимов, Комаровская, 2017), хотя это явление известно давно и описано еще в начале прошлого века (Визе, 1925). Новоземельская бора — это местный восточный или западный, очень сильный и порывистый ветер, который возникает при переваливании воздухом широкого, но невысокого Новоземельского хребта (высоты 600–800 м), а фактически это — обвал к морю холодного воздуха с гор арх. Новая Земля. Большой частью бора дует с востока — со стороны Карского моря, но иногда может дуть и с запада, со стороны Баренцева моря. Некоторые исследователи относят ее к типу подветренных бурь, которые характеризуются крайне резким усилением ветра, падением температуры воздуха и давления на подветренной стороне (Шестакова, 2017). Кроме того, Новую Землю можно назвать одним из самых ветренных мест России, где ветер очень часто достигает ураганных значений. Однако новоземельская бора серьезного ущерба человеку и наземной инфраструктуре не приносит, так как архипелаг практически не населен.

По наблюдениям эта бора может задувать несколько суток, хотя регистрировались события длительностью до 8–10 дней, скорость ветра обычно достигает 20–30 м/с, но может быть и 40–50 м/с, достигая еще больших значений при порывах. Порывистость боры объясняется образованием на подветренной стороне гор вихрей с горизонтальной осью и последовательным пульсационным обвалом объемов холодного воздуха, переваливающего высокогорье. Считается, что сильная бора распространяется в море на 40–60 км и возникает при прохождении атмосферных фронтов, генерирующих потоки воздуха, перемещающиеся перпендикулярно горному хребту. Основным условием развития боры является устойчивая стратификация в нижнем слое атмосферы над Карским морем при ветрах восточного и юго-восточного направления. Кроме того, блокировка воздушного потока на наветренном восточном склоне гор способствует развитию сильного ветра на западном склоне и в прибрежной зоне Баренцева моря (Шестакова, 2017).

И западная, и восточная бора наблюдаются в холодное время года, так как зимой циклоны более глубокие, перепады давления большие, и потоки, перетекающие хребет, приобретают большую скорость, хотя отдельные эпизоды боры возможны поздней весной и даже летом.

На рис. 3а и 3б показаны РЛИ, отображающие как восточную, так и западную новоземельские боры. Отметим, что протяженность струй составляет до 200 км, что превышает предыдущие оценки в 3–4 раза.

ВЕТРЫ ПОЛУОСТРОВА КРЫМ

Неудивительно, но бора и бороподобные ветры время от времени возникают и на южных склонах п-ова Крым. Так, на основе анализа данных метеонаблюдений и численного моделирования были установлены и исследованы особенности южнобережной крымской боры, в результате которых показаны основные отличия ее от новороссийской боры (Ефимов, Комаровская 2015; Казаков и др., 2016). Эти боры возникают при северных и северо-восточных переносах, когда холодный воздух накапливается (блокируется) над равнинной частью Крыма, а затем под действием ряда причин сваливается с яйлы к относительно теплему морю. Очень часто возникают одновременно с новороссийской борой.

Так, согласно Казакову и др. (2016) крымская бора имеет меньшие значения скорости ветра (10–15 м/с) и продолжительность по сравнению с новороссийской борой. Однако она характеризуется большей изменчивостью во времени и пространстве, что определяется местными факторами южного побережья Крыма — характером прибрежного рельефа, его расчлененностью и уклонами, близостью к берегу главной гряды Крымских гор, пространственной ориентации хребтов и ущелий относительно побережья. Тем не менее, она может представлять опасность для человека, объектов береговой инфраструктуры и даже прибрежного судоходства (Доценко, Иванов, 2013).

Наблюдаются в Крыму и фёны. Например, в Симферополе это южные ветры, в Алуште — северо-западные, дующие по пологим юго-восточным склонам яйлы, обращенным к морю, и сопровождающиеся повышением температуры до 28–30 °С и одновременным понижением относительной влажности до 25–30%. В Севастополе фён дует с юго-востока, а в Феодосии это — южный ветер с моря, который приобретает характерные черты фёна, перетекая через невысокий хр. Тепе-Оба и затем опускаясь к морю.

На рис. 4а и 4б показаны примеры отображения крымской боры и фёна на РЛИ спутника Sentinel-1A.



Рис. 4а. Крымская бора, отобразившаяся на РЛИ спутника Sentinel-1A 26.09.2018, 03:49 UTC. © ESA

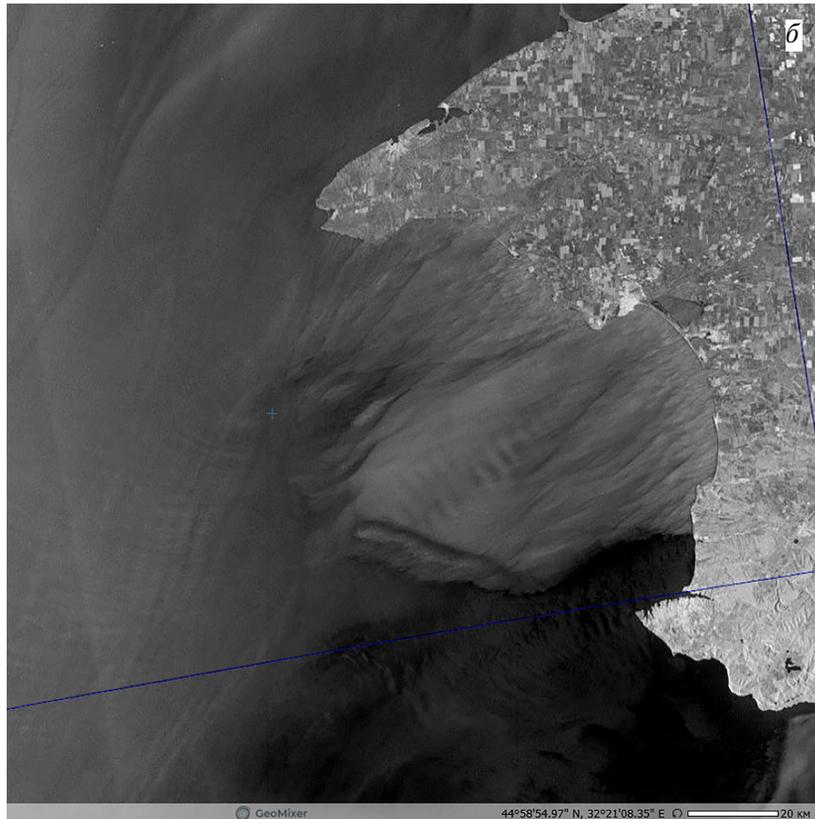


Рис. 4б. Крымский фён, отобразившийся на РЛИ спутника Sentinel-1A от 03.07.2017 в 15:44 UTC (метеоизмерения в Евпатории на 15:00 UTC дают восточный ветер 10 м/с и относительную влажность 40%). © ESA

БОРОПОДОБНЫЕ ВЕТРЫ ОЗ. БАЙКАЛ

Хорошо известно разнообразие и особенно-сти местных байкальских ветров, которых насчитывают до тридцати. Господствующие ветрами на озере (их скорость может достигать 20 м/с и более) являются: северо-западный ветер, часто называемый «горной» (и более локальная сарма), северо-восточный (верховик), юго-западный (култук) и юго-восточный (шелоник) (Калинцева, Тараканов, 1961; Атлас, 2005; Ivanov, 2012). Остальные ветры не столь сильные и известны, они имеют в основном термическое (бризы, зырянки, мысовики) или орографическое происхождение (в результате движения воздуха по падям, отражений от рельефа гористых побережий и завихрений за скалистыми мысами).

Однако самый свирепый ветер на Байкале — это горная, северо-западный ветер, вырывающийся из долин рек западного побережья, таких, как Сарма, Рытая, Солнцепадь, Молокан, Куркулы, Горемыка, Иликта, Глубокая Падь, Зундук и ряда др. Холодный арктический воздух, перевалив через Приморский и Балкальский хребты (высоты 500–700 м), устремляется в ущелья рек (которые фактически образуют природные аэродинамические трубы, расширяющиеся по направлению к устьям. В них массы холодного воздуха приобретают огромные скорости и разрушительную силу. Именно этот ветер наносит материальный ущерб жителям побережья, он особенно опасен для регионального судоходства (большинство катастроф на озере). Считается, что долина р. Сарма — самая эффективная «аэродинамическая труба», здесь скорость ветра в порывах, по оценкам, может достигать 50–60 м/с. Однако сарма, про которую в литературе написано столь много, на РЛИ поверхности озера отображается невыразительно, т.к. на пути струи воздуха находятся выступающий полуостров и о. Ольхон.

Другой известный местный бороподобный ветер, ставший известным благодаря русской народной песне — баргузин, дует из долины одноименной реки со скоростью 10–15 м/с. Он возникает за счет стока холодного воздуха из степей Даурии и верховьев р. Баргузин в период осенне-зимнего охлаждения и имеет характер боры. В устье реки усиливается до бури, но над озером ослабевает, становится устойчивым ветром при ясной погоде. Скорость обычно не превышает 20 м/с, длится менее суток, по наблюдениям может поднять волну высотой 3–4 м, опасен для малых судов.

На рис. 5а, б показаны примеры того, как байкальские местные ветры, в первую очередь те, которые дуют поперек озера, отображаются на РЛИ. На рис. 5а хорошо видно, что струи холодного воздуха (горной) «выскакивают» на озеро с запада/северо-запада и в зависимости от скорости ветра и общей синоптической ситуации могут выглядеть как в виде «язычков» или «конусов выноса», так и в виде многочисленных поперечных полос-струй, покрывающих все озеро. Баргузин «вылетает» из долины реки в виде длинной локальной струи, которая в зависимости от общего переноса или распространяется поперек озера, или подворачивает на север либо на юг. Иногда возникают ситуации, когда горная, дующая с северо-запада, встречается со струей баргузина в центре озера. Стоковые ветры, образующиеся в результате ночного выхолаживания, могут иметь противоположное направление (рис. 5б).

СЕВЕРНЫЕ (АРКТИЧЕСКИЕ) ЮЖАКИ

Южак — общее название южных ветров на севере РФ. На арктическом побережье страны они особенно сильны в осенне-зимнее время в связи с муссонным эффектом. Обычно это сильные ветры южных румбов, дующие с гористых плато и возвышенностей на побережье в районе о. Диксон, в бухте Тикси, над Чаунской губой (и в бухте Певек), на побережье Чукотки (устье р. Колыма). Скорость южачков обычно составляет 15–20 м/с, а максимальная — до 40 м/с.

Южачки наблюдаются и в ряде других районов РФ, расположенных к югу, причем Прох (1983) и др. исследователи среди всех прочих особо выделяет следующие:

1. Юго-восточный ветер на о. Диксон и прибрежной акватории Енисейского залива, усиливающийся под влиянием местной орографии. С увеличением его скорости увеличивается порывистость, особенно в тех случаях, когда он обусловлен южной частью циклонов (рис. 6а).

2. Сильный местный западный/юго-западный ветер в бухте Тикси и губе Буор-Хая. Его скорость может достигать больших значений (40 м/с и более). Порой он приобретает характер фёна. Усиление ветра, дующего с материка, обусловлено влиянием рельефа горных хребтов и долинами местных горных рек. При одних и тех же условиях скорость южачка в Тикси зимой гораздо больше, чем летом, в связи с усилением стока выхолаженного воздуха по склонам Хараулахского хребта и по долинам местных рек в сторону бухты (рис. 6б).

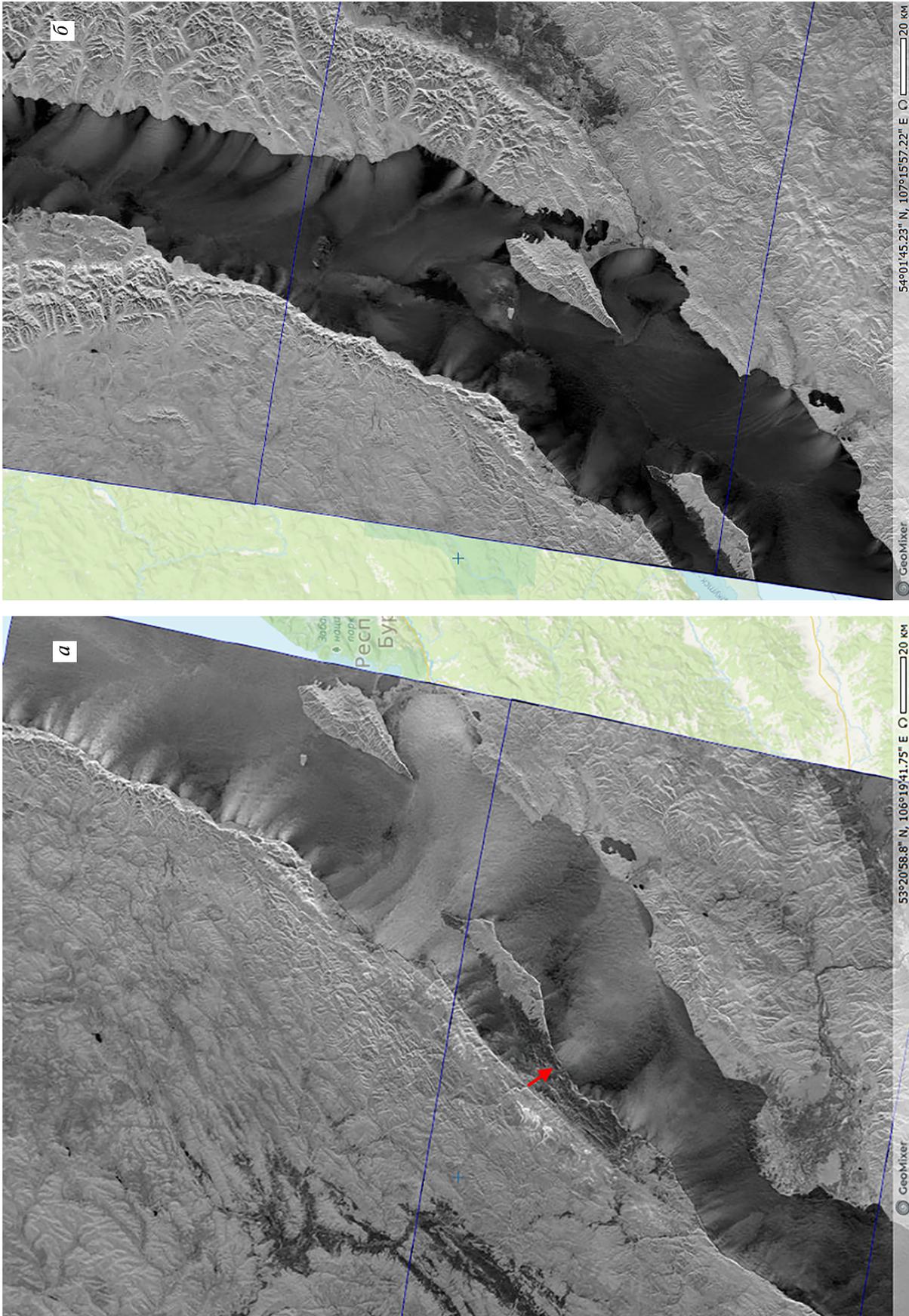


Рис. 5. а — горная (северо-западный ветер) и сарма (красная стрелка), образовавшиеся на РЛИ спутника Sentinel-1A от 3.10.2016 (23:06 UTC); б — разнора-
 правленный стоковый ветер (вследствие ночного выхолаживания) на Северном Байкале на РЛИ Sentinel-1A от 11.10.2017 (22:56 UTC). © ESA



Рис. 6а, б. а — южак (юго-восточный местный ветер) в районе о. Диксон (пос. Диксон — флажок) и на прилегающей акватории Енисейского залива, отобразившийся на РЛИ Sentinel-1В от 12.10.2018 (01:28 UTC); б — южак (юго-западный местный ветер) в бухте Тикси и губе Буор-Хая (флажок — пос. Тикси), отобразившийся на РЛИ Sentinel-1В от 19.10.2018 (21:55 UTC). © ESA

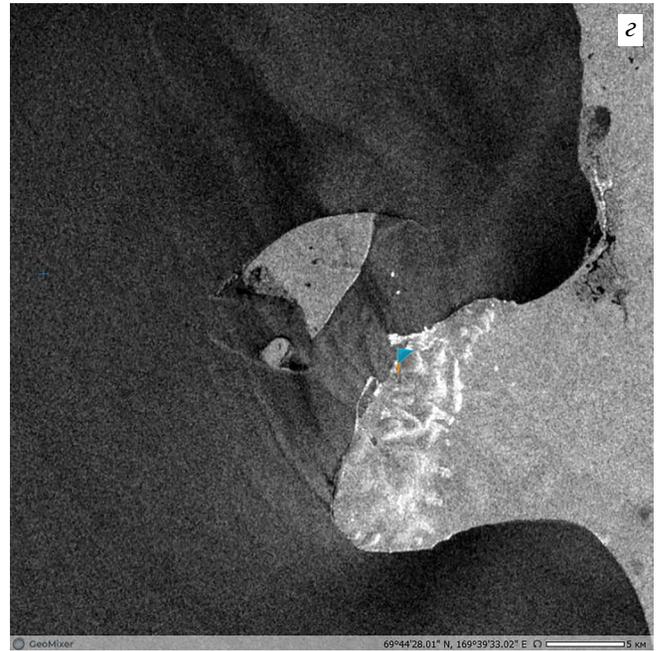
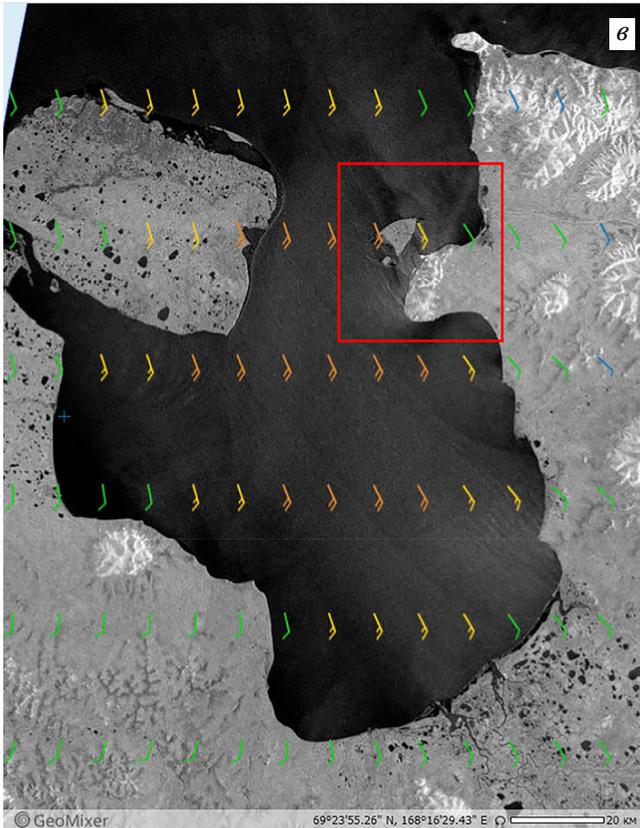


Рис. 6в, з. Южак (фёноподобный ветер) над Чаунской губой и акваторией около г. Певек, отобразившийся на РЛИ спутника Sentinel-1A от 02.09.2017, 19:10 UTC (модельный ветер на 18:00 UTC) и его фрагменте (з) в виде струеподобных поверхностных проявлений. © ESA

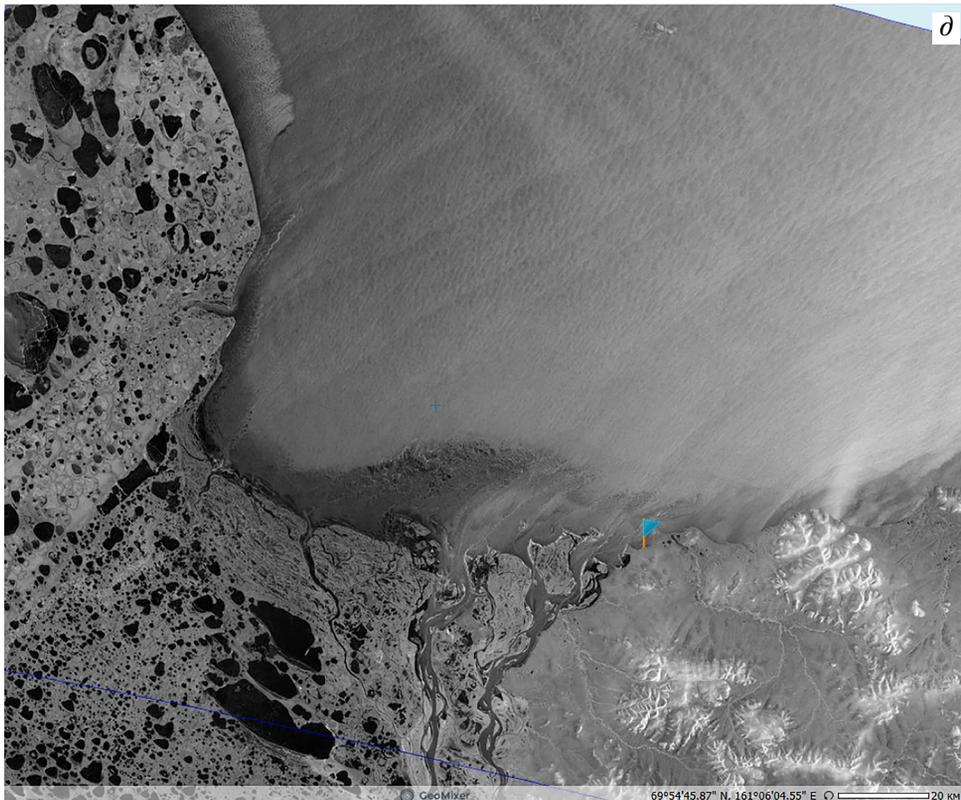


Рис. 6д. Южак (юго-западный местный ветер) над акваторией, примыкающей к устью р. Колыма, отобразившийся на РЛИ Sentinel-1B от 16.10.2018 (19:51 UTC) (флажок — с. Абмарчик). © ESA

3. Порывистый южный ветер типа фёна, обрушивающийся со скоростью более 15 м/с с прибрежных возвышенностей на побережье Чукотки, на Чаунскую губу и пролив Певек. Здесь южак возникает внезапно, сопровождается снежными вихрями и резким понижением атмосферного давления. Время от времени этот ветер может дуть со скоростью 40 м/с, а порывы достигать 60 м/с и более. Южак здесь обычно длится несколько суток, но иногда до недели и более. Часто южак сносит снежный покров и разрушает постройки, опасен для судов, стоящих на рейде, поэтому в пос. Певек есть постоянный штаб по борьбе с ним (рис. 6в, г).

4. Сгонный/нисходящий ветер южных румбов в устье р. Колыма (побережье Чукотки) и Колымским заливом; часто имеет большую силу и повторяемость, в результате чего происходит осушка отмелей и образование островов в дельте реки (рис. 6д).

КАТАБАТИЧЕСКИЕ ВЕТРЫ ДАЛЬНОГО ВОСТОКА

На Дальнем Востоке ветры типа боры формируются у побережий Охотского и Японского морей в условиях соответствующего рельефа. Это часто происходит при переваливании сибирского воздуха, образовавшегося над материком, через прибрежные горные хребты и свала его на море. Сильные и холодные западные ветры очень часто наблюдаются при выходе из долин рек и на побережье Японского и Охотского морей (рис. 7, 9). Выделяют также сахалинскую бору — восточный ветер, дующий с западных склонов Западного хребта о. Сахалин, в районе гг. Углегорск, Шахтерск, Александровск-Сахалинский; она обрушивается с невысоких горных перевалов.

При благоприятном распределении давления бороподобные ветры образуются на западном и восточном побережьях п-ова Камчатка (рис. 8). При прохождении циклонов восточнее Камчатки усиливаются ветры у выходов из долин на ее восточном берегу. Если же циклоны проходят западнее, то наибольшие скорости наблюдаются на западном побережье. Нередко усиление местных ветров на тихоокеанском побережье РФ и Камчатки происходит за счет кatabатического стока. Фёноподобный камчатский ветер — это восточный ветер на западных берегах полуострова, дующий с отрогов Срединного хребта. Известен фён и на Курильских о-вах — так, в Северо-Курильске он может дуть от нескольких часов до нескольких суток.

БАКИНСКИЙ НОРД

Следует остановиться еще на одном местном ветре, а именно на бакинском норде или хазри (*азерб.*) — сильным, холодным и сухом ветре, возникающим над Апшеронским полуостровом. Он возникает при вторжениях холодного воздуха, огибающего с востока горы Большого Кавказского хребта и переваливающего через полуостров, что вызывает локальное усиление ветра над ЮЗ частью Каспийского моря, в том числе в г. Баку. Наблюдается во все времена года (но чаще в летнее время), в среднем до 60 раз в год, имеет продолжительность 1–3 суток и более. Скорость норда невелика 10–15 м/с, но иногда (в 30% случаев) он достигает штормовой силы 20–40 м/с. Наряду с кatabатическим эффектом при переваливании, в данном случае происходит сжатие потока в горизонтальной плоскости, что часто наблюдается у полуостровов. Как бороподобный ветер, бакинский норд усиливается на побережье из-за муссонного эффекта, однако с удалением от берегов ослабевает. На рис. 10 показан пример того, как бакинский норд над ЮЗ частью Каспийского моря отображается на РЛИ спутника Sentinel-1A в 2017 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многими исследователями сильные местные ветры рассматриваются как климатообразующий фактор. В отличие от других местных ветров, которые в той или иной степени влияют на климатические условия, сильные кatabатические ветры представляют собой крайне опасное метеорологическое явление и в ряде мест РФ создают настолько трудные условия для жизнедеятельности человека, что он там просто избегает селиться. В связи с этим многие места, где наблюдаются сильные местные кatabатические ветры, не заселены, и сведения о таких ветрах невозможно получить из метеонаблюдений. С другой стороны, разнообразный характер морских побережий и условия циркуляции атмосферы порождают возникновение местных кatabатических ветров над прибрежными зонами российских морей. Поэтому одним из методов наблюдения за образованием и развитием таких ветров, могут стать данные ДЗЗ.

Современные методы космической радиолокации позволяют проводить исследования сильных местных кatabатических ветров, возникающих над морями и озерами РФ, с возможностью восстановления ряда их характеристик. Однако, следует заметить и то, что для полноценного анализа данных РЛ-зондирования в виде РЛИ морской

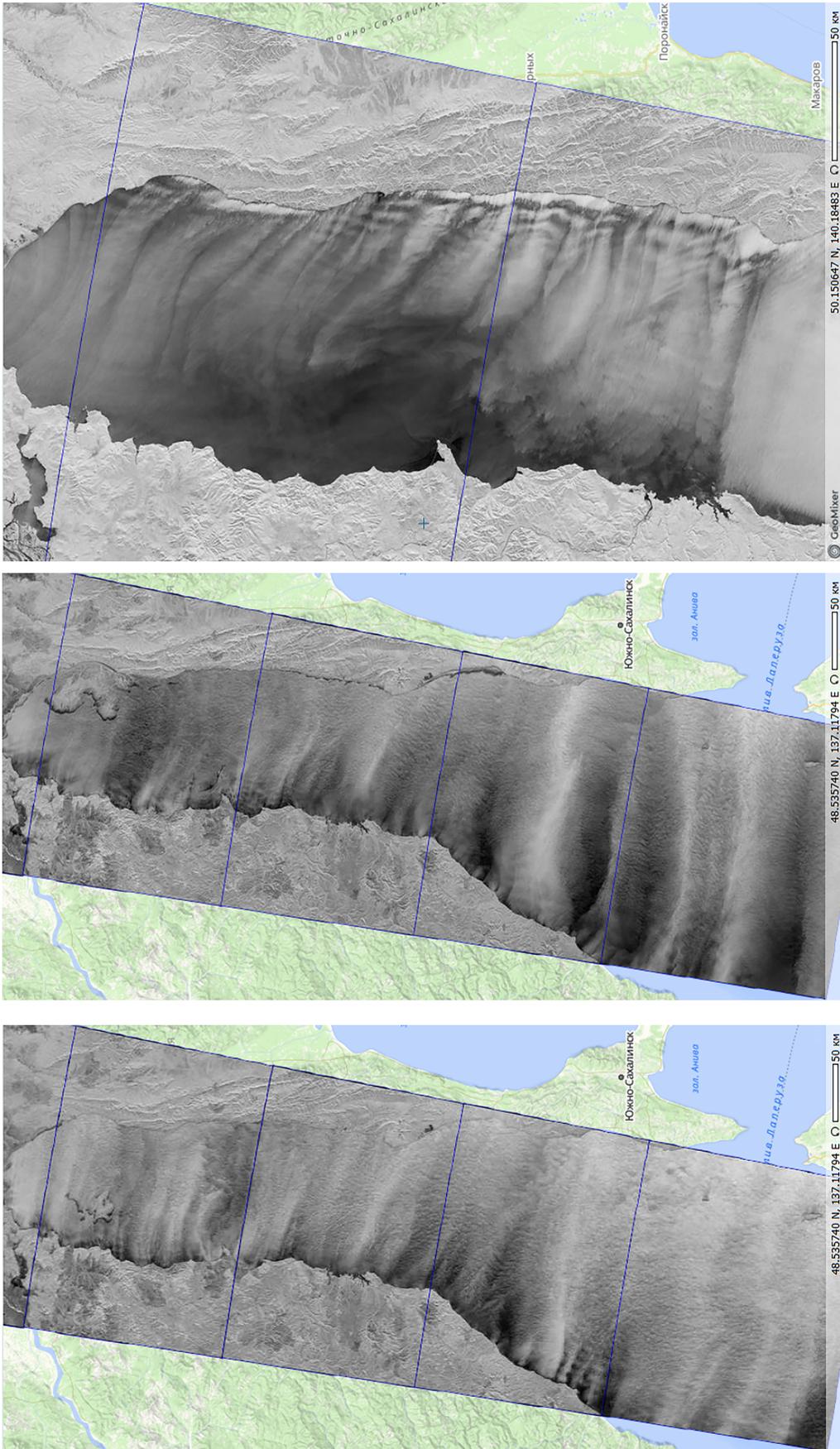


Рис. 7. Боролодобный (западный) ветер над акваторией Татарского залива, отобразившийся на РЛИ спутников Sentinel-1А: 20.11.2017 и 02.12.2017 (20:47 UTC) и сахалинская бора (восточный ветер) на РЛИ Sentinel-1В от 04.09.2018 (20:46 UTC). © ESA

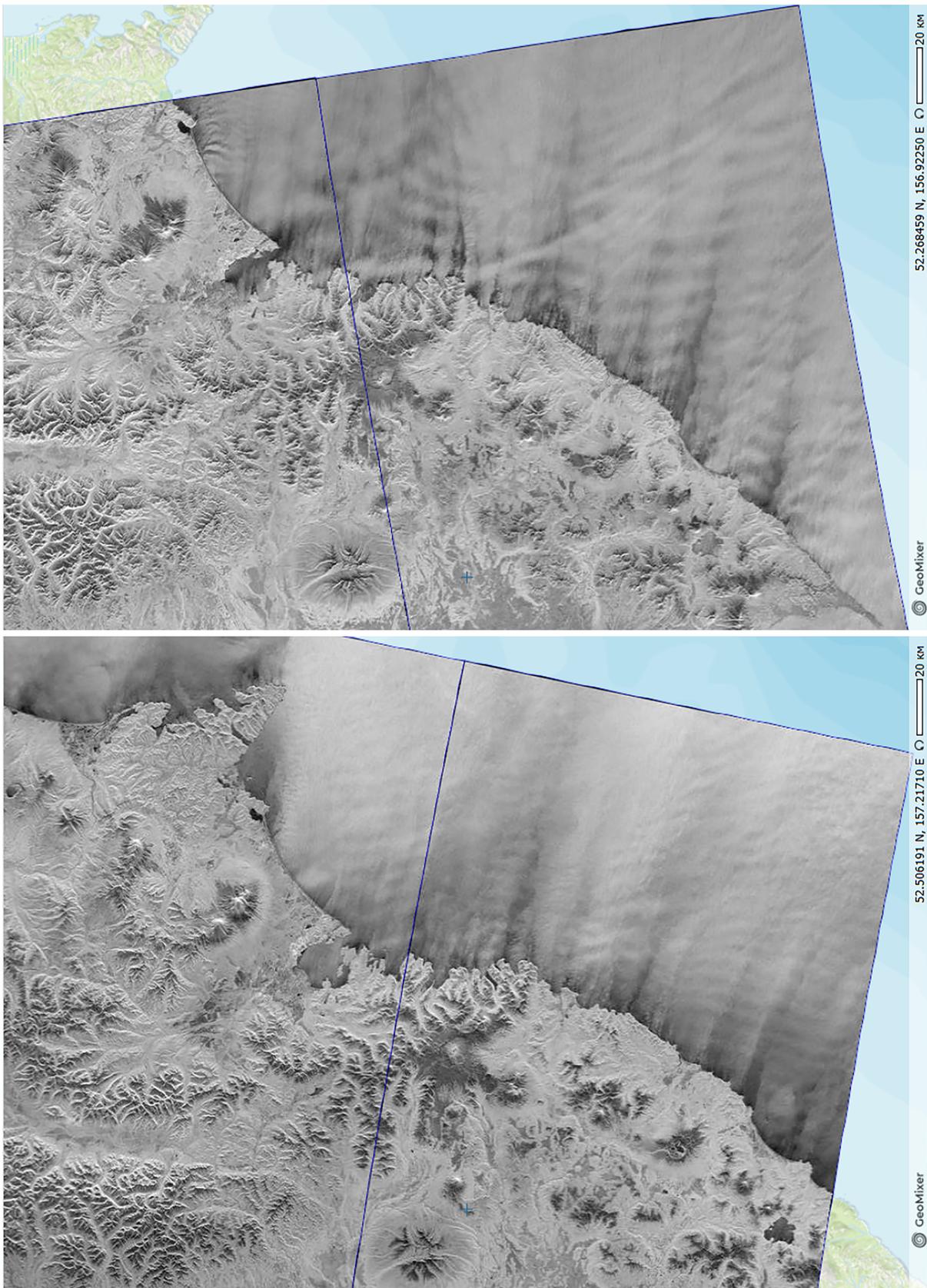


Рис. 8. Бороподобный (западный) ветер у восточного побережья Камчатки, ообразившийся на РЛИ спутников Sentinel-1A от: 10.11.2017 (19:41 UTC) и 14.11.2017 (07:15 UTC). © ESA

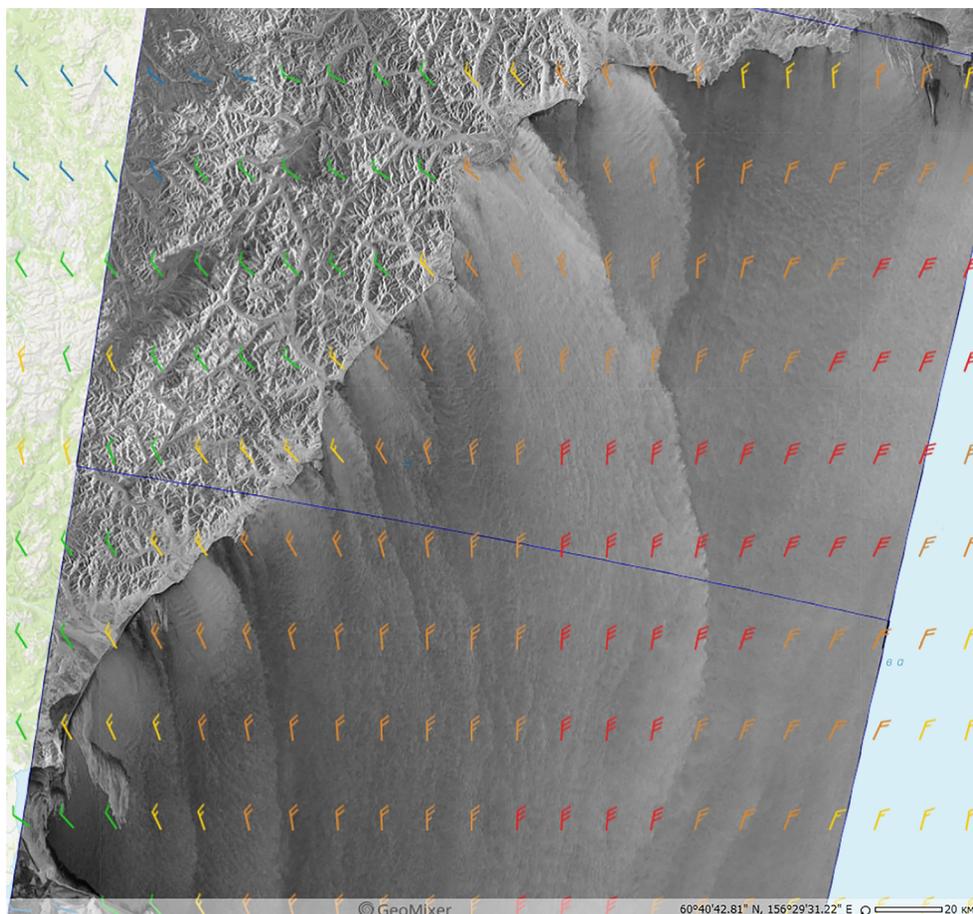


Рис. 9. Охотоморская бора над заливом Шелихова, отобразившаяся на РЛИ спутника Sentinel-1A от 02.12.2017, 19:54 UTC (модельный ветер на 18:00 UTC). © ESA

поверхности и верификации результатов необходимо привлекались прогнозные или модельные поля ветра.

Сформулируем в итоге те возможности, которые дает космическая радиолокация для исследования местных кatabатических ветров:

1. Исследования последних лет однозначно показали, что на РЛИ отображаются именно сильные кatabатические ветры (бора и фён), а не другие метеорологические явления. Для того чтобы показать это, привлекались данные наземных измерений, синоптические материалы и результаты моделирования. Об этом говорят характерные для них сильные, и даже ураганные значения скорости ветра в прибрежных зонах морей, которые приводят к образованию характерных сигнатур. Поле ветра над морем может быть восстановлено, как по РЛИ с помощью модели СМОД и данных о направлении ветра, так и независимо с помощью других оперативных атмосферных моделей.

2. Бора и бороподобные ветры на РЛИ визуализируются в виде узких полос-струй,

исключительно благодаря стоковой компоненте, горизонтального и вертикального сжатия потоков и взаимодействия их с неоднородностями прибрежного рельефа. Они возникают в прибрежной зоне моря, резко удлиняются и покрывают полностью не только прибрежную часть того или иного моря, но и значительную часть его акватории. По мере распространения ветра над морем происходит его постепенное ослабление, однако в открытом море скорость ветра в момент максимального развития бор может достигать 10–15 м/с. В случае фёна и фёноподобных ветров воздушный поток на море вырывается в виде одной очень широкой полосы, который впоследствии может быть модулирован прибрежным рельефом и разбиться на ряд вторичных струй. Поверхностные проявления боры или фёна часто осложнены проявлениями атмосферных гравитационных волн.

3. Анализ многочисленных РЛИ показал, что пространственный масштаб явлений существенно превышает те значения, которые приводятся в литературе, даже современной. Так, на Черном

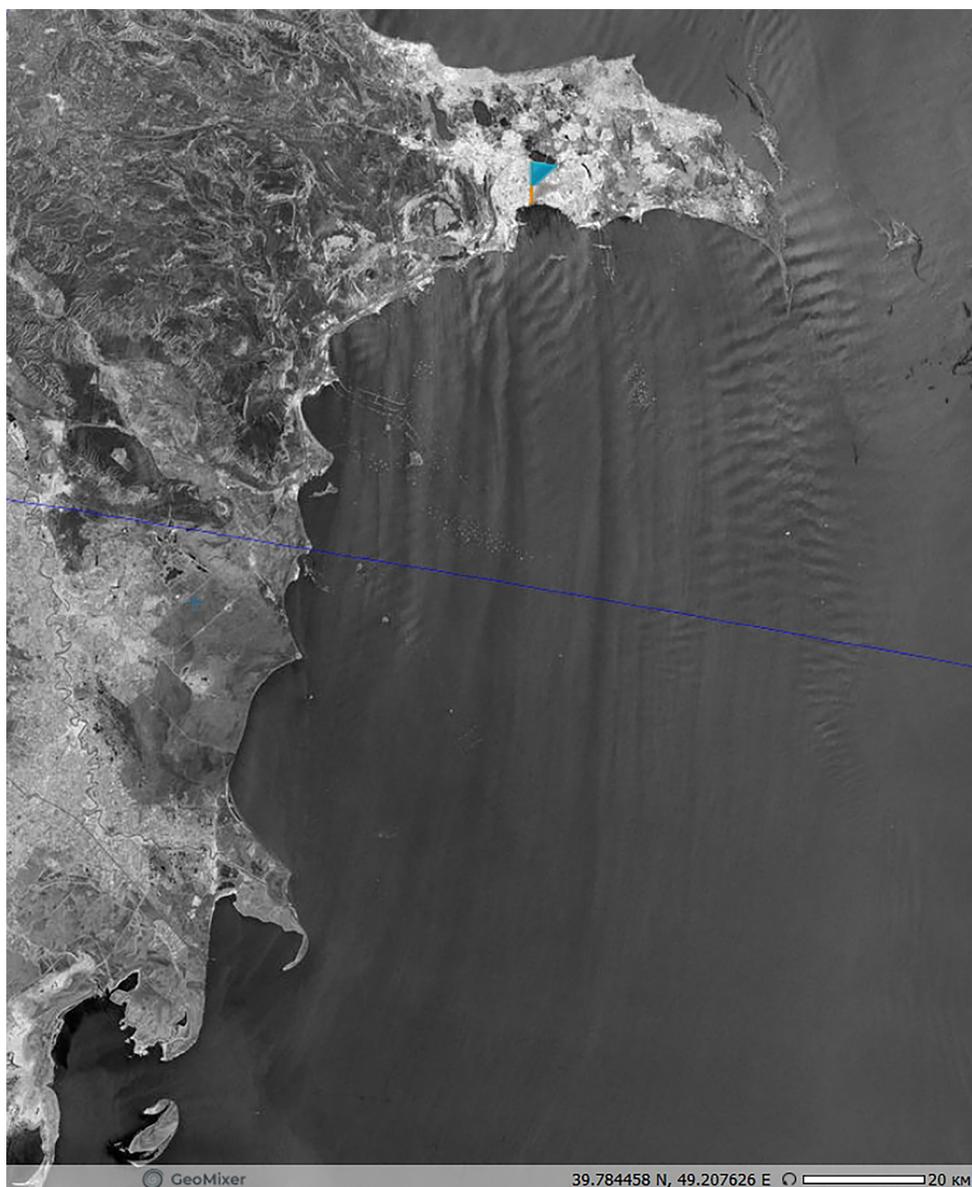


Рис. 10. Бакинский норд (бороподобный северный ветер) в юго-западной части Каспийского моря, отобразившийся на РЛИ спутника Sentinel-1A от 08.11.2017 в 14:37 UTC (флажком показан г. Баку). © ESA

и Баренцевом морях бора охватывает значительные части акваторий, ее полосы-струи прослеживаются на сотни километров от берега (в Черном море их длина достигает 200–240 км, в Баренцевом море — до 300 км) и наблюдаются на протяженной прибрежной полосе (200–250 км в Черном море и до 500–600 км в Баренцевом море). Фён в ЮВ части Черного моря нередко прослеживается на расстоянии до 200 км от берега.

4. Нередко местные ветры отображаются на снимках из космоса низкого и среднего разрешения, полученных в оптическом диапазоне спектра — по распределению облачного покрова (по его отсутствию — нисходящий ветер

приводит к размытию облачности), а в высоком разрешении — в поле прибрежного волнения (Иванов, Терлеева, 2018). Кроме того, оптические снимки и РЛИ высокого разрешения позволяют локализовать те места на побережье, где струи вырываются на море с наибольшими скоростями, что немаловажно для разработки мероприятий по защите этих мест от негативного ветрового воздействия.

5. Радиолокационные данные, включая дополняющие их оптические съемки из космоса, позволяют следить за развитием событий дистанционно в режиме реального времени, т.е. фактически проводить регулярный мониторинг, что особенно важно в удаленных полярных районах РФ,

которые в настоящее время покрываются космической съемкой и прогнозным моделированием каждые 6–12 ч.

В итоге с целью изучения, улучшения прогнозирования, а также разработки мероприятий по сокращению ущерба от сильных местных ветров, существующие методы наблюдения и прогноза необходимо дополнить оперативным сбором и анализом данных космической радиолокации. Это позволит получить ряд их дополнительных параметров над открытым морем, которые традиционными методами получить затруднительно. Кроме того, подобный подход может существенно расширить существующие представления об опасных местных ветрах и уменьшить возникающие в связи с ними риски.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Радиолокационные данные и материалы для анализа были предоставлены ГК «СКАНЭКС». Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования России (тема № 0149–2019–0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас «Озеро Байкал. Прошлое. Настоящее. Будущее». Иркутск: ФГУП Восточно-Сибирское аэрогеодезическое предприятие, 2005.
- Бурман Э.А.* Местные ветры. Л.: Гидрометеиздат, 1969.
- Визе В.Ю.* Новоземельская бора // Изв. Централ. Гидрометбюро. 1925. Т. 5.
- Гавриков А.В., Иванов А.Ю.* Аномально сильная бора 2012 г. на Черном море: численное моделирование и наблюдение из космоса // Изв. РАН. ФАО. 2015. Т. 51. № 5. С. 615–626.
- Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Катастрофические природные явления Азово-Черноморского региона. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013.
- Евсеева Д.Л.* Новороссийская бора (норд-ост). Век XX. // Исторические записки. Вып. 8. Новороссийск, 2013. С. 66–71.
- Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Моделирование новороссийской боры // Метеорология и гидрология. 2013. № 3. С. 47–55.
- Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Пространственно-временная структура ялтинской боры // Морской гидрофиз. журнал. 2015. № 3. С. 3–14.
- Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Формирование новоземельской боры // Морской гидрофиз. журнал. 2017. № 2. С. 3–11.
- Иванов А.Ю.* Новоземельская бора и полярные циклоны по данным космических радиолокационных и оптических съемок // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 9–22.
- Иванов А.Ю.* Новороссийская бора: взгляд из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 2. С. 68–83.
- 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.
- Иванов А.Ю., Антонюк А.Ю.* Аномально сильные боры в Черном море: Взгляд из космоса // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. 2012. № 14. С. 27–33.
- Иванов А.Ю., Антонюк А.Ю.* Аномально сильные боры в Черном море по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 32–43.
- Иванов А.Ю., Терлеева Н.В.* Экстремально продолжительная бора на Черном море // Земля из космоса. 2018. № 9. С. 22–26.
- Казаков С.И., Метик-Дионова В.В., Симонова Ю.В., Богуславский А.С.* Крымская южнобережная бора по наблюдениям в районе Качивели // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 5. С. 65–71.
- Калинцева В.К., Тараканов Г.Г.* Синоптические условия образования штормовых ветров на Байкале // Тр. ЛГМИ. 1961. Вып. 12.
- Новороссийская бора. Под ред. А.М. Гусева. Тр. МГИ АН СССР, 1959. Т. XIV.
- Прох Л.З.* Словарь ветров. Л.: Гидрометеиздат, 1983.
- Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь в 3 т. Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Гл. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова / Под ред. А.И. Бедрицкого. СПб: Летний сад, 2008–2009.
- Стехновский Д.И., Зубков А.Е., Петровский Ю.С.* Навигационная гидрометеорология. М.: Транспорт, 1971.
- Торопов П.А., Мысленков С.А., Самсонов Т.Е.* Численное моделирование новороссийской боры и связанного с ней ветрового волнения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2013. № 2. С. 38–46.
- Хромов С.П.* Метеорология и климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1968.
- Шелковников М.С.* Мезометеорологические процессы в горных районах и их влияние на полеты воздушных судов. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
- Шестакова А.А.* Подветренные бури при боре и фёне в различных регионах России. Дисс. ... уч. ст. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2017.
- Alpers W., Ivanov A., Horstmann J.* Observations of bora events over the Adriatic Sea and Black Sea by spaceborne synthetic aperture radar // Mon. Wea. Rev. 2009. V. 137. P. 1150–1161.
- 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., Mouche A., Horstmann J., Ivanov A. Yu., Barabanov V.S.* Application of a new algorithm using Doppler

information to retrieve complex wind fields over the Black Sea from Envisat SAR images // *Int. J. Remote Sens.* 2015. V. 36. № 3. P. 863–881.

Askari F., Singell R.P., Chiggiato J., Doyle J. Radarsat mapping of bora/sirocco winds in the Adriatic Sea // *Proc. Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS-2003)*. 21–25 July 2003. Toulouse, France, 2003. V. 1. P. 236–238.

Ivanov A. Yu. Unique phenomena in Lake Baikal, Russia imaged and studied with SAR and multi-sensor images // *Int. J. Remote Sens.* 2012. V. 33. № 23. P. 7579–7598.

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. C04020. doi:10.1029/2009JC005524.

Local Katabatic Winds of the Russian Federation and Their Observation from Space Using SAR Imagery

A. Yu. Ivanov

Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow

Data from the spaceborne synthetic aperture radars (SAR) provide new opportunities for observing and studying local katabatic winds (bora, foehn) in various marine regions of the Russian Federation and adjacent countries. The impact of these winds on the characteristics of small-scale wind waves leads to the formation of characteristic manifestations on the sea surface which are displayed on SAR images. Satellite SAR images, in contrast to sub-satellite observations, make it possible to see the phenomenon in the coastal zones of seas and large lakes, judge the spatial scale of the phenomenon and determine a number of its quantitative characteristics. Analysis of collected SAR images shows that local winds, bora-like and foehn-like, have similar characteristics and cover vast areas of the inland and marginal seas of the Russian Federation. The similarity of the surface manifestations of the local winds, clearly speaks about the same physical and aerohydrodynamic mechanisms of their display on SAR images. It is shown that spaceborne SAR data and images, which are two-dimensional spatial patterns of “frozen wind”, are extremely useful for research and monitoring local winds over the seas of the Russian Federation, especially where the network of weather stations is extremely rare.

Keywords: local winds, bora, foehn, synthetic aperture radar, SAR images, sea surface

REFERENCES

Atlas ‘Ozero Baikal. Proshloye. Nastoyashcheye. Budushcheye’ [Lake Baikal. Past. Present. Future] Irkutsk, Vostochno-Sibirskoye aerogeodezicheskoye predpriyatiye, 2005 (In Russian).

Burman E.A. Mestnyye vetry [Local winds] Leningrad, Gidrometeoizdat, 1969 (In Russian).

Vize V. Yu. Novozemelskaya bora [Novaya Zemlya bora] // *Izvestiya Tsentralnogo Gidrometbyuro.* 1925. Vol. 5 (In Russian).

Gavrikov A.V., Ivanov A. Yu. Anomalno silnaya bora 2012 na Chernom more: chislennoye modelirovaniye i nablyudeniye iz kosmosa [Anomalously strong bora over the Black Sea: Observations from space and numerical modeling] // *Izvestiya RAN. FAO.* 2015. V. 51. № 5. P. 615–626 (In Russian).

Dotsenko S.F., Ivanov V.A. Katastroficheskiye prirodnyye yavleniya Azovo-Chernomorskogo regiona [Catastrophic Natural Phenomena in the Azov-Black Sea Region]. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika, 2013 (In Russian).

Evseeva D.L. Novorossiyskaya bora (nord-ost). Vek XX [Novorossiysk bora (nordost). XX Century] // *Istoricheskiye Zapiski.* Vyp. 8. P. 66–71. Novorossiysk, 2013 (In Russian).

Efimov V.V., Barabanov V.S. Modelirovaniye novorossiyskoy bory [Modeling of Novorossiysk bora] // *Meteorologiya i gidrologiya.* 2013. № 3. P. 47–55 (In Russian).

Efimov V.V., Komarovskaya O.I. Prostranstvenno-vremennaya struktura yaltinskoy bory [Spatial-temporal structure of bora in Yalta] // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal.* 2015. № 3. P. 3–14 (In Russian).

Efimov V.V., Komarovskaya O.I. Formirovaniye novoze-mel'skoy bory [Formation of the Novaya Zemlya bora] // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal.* 2017. № 2. P. 3–11 (In Russian).

Ivanov A. Yu. Novozemelskaya bora i polyarnnyye tsiklony po dannym kosmicheskikh radiolokatsionnykh i opticheskikh s'emok [Novaya Zemlya bora and polar cyclones visible from space in radar and optical imagery] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2016. № 4. P. 9–22 (In Russian).

Ivanov A. Yu. Novorossiyskaya bora: vzglyad iz kosmosa [Bora in Novorossiysk: A look from space] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2008. № 2. P. 68–83 (In Russian).

Ivanov A. Yu. Fen v yugo-vostochnoy chasti Chernogo morya i yego nablyudeniye iz kosmosa s pomoshch'yu RSA [Foehn in the South Eastern Black Sea imaged and studied with SAR] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2012. № 1. P. 40–53 (In Russian).

Ivanov A. Yu., Antonyuk A. Yu. Anomalno silnyye bory v Chernom more: Vzglyad iz kosmosa [Anomalously strong boras in the Black Sea: A view from space] // *Zemlya iz kosmosa — Naiboleye effektivnyye resheniya.* 2012. № 14. P. 27–33 (In Russian).

Ivanov A. Yu., Antonyuk A. Yu. Anomalno silnyye bory v Chernom more po dannym sputnikovyykh nablyudateley

- [Anomalously strong bora events over the Black Sea studied using satellite imagery] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2013. № 1. P. 32–43 (In Russian).
- Ivanov A. Yu., Terleeva N.V.* Ekstremalno prodolzhitelnaya bora na Chernom more [Extremely long bora over the Black Sea] // *Zemlya iz Kosmosa*. 2018. № 9. P. 22–26 (In Russian).
- Kazakov S.I., Metik-Diyunova V.V., Simonova Yu.V., Boguslavskiy A.S.* Krymskaya yuzhnoberezhnaya bora po nablyudeniya v rayone Katsiveli [South coast Crimean bora wind by observations around Katsiveli] // *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*. 2016. № 5. P. 65–71 (In Russian).
- Kalintseva V.K., Tarakanov G.G.* Sinopticheskiye usloviya obrazovaniya shtormovykh vetrov na Baikale [Synoptic conditions for the formation of storm winds on Lake Baikal] // *Trudy LGMI*. 1961. Vyp. 12 (In Russian).
- Novorossiyskaya bora [Bora in Novorossiysk]. Ed. A.M. Gusev. *Trudy MGI AN USSR*, 1959. V. XIV (In Russian).
- Prokh L.Z.* Slovar vetrov [Dictionary of Winds]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983 (In Russian).
- Rossiyskiy gidrometeorologicheskiy entsiklopedicheskiy slovar [Russian Hydrometeorological Encyclopedic Dictionary]. In 3 vol. Federalnaya Sluzhba po Gidrometeorologii i Monitoringu Okruzhayushchey Sredy / Glavnaya Geofizicheskaya Observatoriya im. A.I. Voeikova / Ed. A.I. Bedritskii. St. Petersburg: Letniy Sad, 2008–2009 (In Russian).
- Stekhnovskii D.I., Zubkov A.E., Petrovskii Yu.S.* Navigatsionnaya gidrometeorologiya [Navigation Hydrometeorology]. Moscow, Transport, 1971 (In Russian).
- Toropov P.A., Myslenkov S.A., Samsonov T.E.* Chislennoye modelirovaniye novorossiyskikh borov i svyazannogo s ney vetrovogo volneniya [Numerical modeling of bora in Novorossiysk and associated wind waves] // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 5. Geogr.* 2013. № 2. P. 38–46 (In Russian).
- Khromov S.P.* Meteorologiya i klimatologiya [Meteorology and Climatology]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1968 (In Russian).
- Shelkovnikov M.S.* Mezometeorologicheskiye protsessy v gornyykh rayonakh i ikh vliyaniye na polety vozdushnykh sudov [Meso-meteorological processes in mountain areas and their impact on aircraft operations]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985 (In Russian).
- Shestakova A.A.* Podvetrennyye buri v raznykh regionakh Rossii [Leeward storms during bora and foehn in various regions of Russia]. Diss. soisk. uch. st. kand. geogr. nauk. Moscow, MGU, 2017 (In Russian).
- Alpers W., Ivanov A., Horstmann J.* Observations of bora events over the Adriatic Sea and Black Sea by spaceborne synthetic aperture radar // *Mon. Wea. Rev.* 2009. Vol. 137. P. 1150–1161.
- 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 // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2010. № 5. C. 46–58.
- Alpers W., Mouche A., Horstmann J., Ivanov A. Yu., Barabanov V.S.* Application of a new algorithm using Doppler information to retrieve complex wind fields over the Black Sea from Envisat SAR images // *Int. J. Remote Sens.* 2015. V. 36. № 3. P. 863–881.
- Askari F., Singell R.P., Chiggiano J., Doyle J.* Radarsat mapping of bora/sirocco winds in the Adriatic Sea // *Proc. Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS-2003)*. 21–25 July 2003. Toulouse, France, 2003. V. 1. P. 236–238.
- Ivanov A. Yu.* Unique phenomena in Lake Baikal, Russia imaged and studied with SAR and multi-sensor images // *Int. J. Remote Sens.* 2012. V. 33. № 23. P. 7579–7598.
- 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. C04020. doi:10.1029/2009JC005524.