

Крупномасштабные особенности новороссийской бора

© 2017 В. В. Ефимов*, О. И. Комаровская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: vefim38@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.04.2017 г.

На основе данных реанализа с высоким пространственным разрешением и временным покрытием 36 лет сделаны оценки пространственной структуры полей скорости ветра и температуры в Черноморском регионе для случаев бора в зимние месяцы. Показано, что развитие бора сопровождается образованием крупномасштабной циклонической циркуляции в юго-восточной части Черного моря. Обтекание потоком воздуха северо-западного края высоких Кавказских гор приводит к циклонической завихренности скорости ветра над морем, а высокие Анатолийские горы ограничивают распространение потоков воздуха на юг и совместно с Кавказскими горами формируют замкнутую крупномасштабную ячейку циркуляции. Исследованы регрессионные зависимости между скоростью ветра и температурой в Новороссийском регионе, которые показывают, что в зимний период сильные ветра северо-восточного направления соответствуют случаям бора фронтального типа, при которых ее развитие сопровождается понижением температуры воздуха. При этом выявлена важная особенность поля температуры: при боре в прибрежной области моря она выше, чем в предгорной части региона на суше.

Ключевые слова: Новороссийский регион, бора, модель атмосферной циркуляции *WRF-ARW*, циклоническая завихренность.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-4-26-35

Введение. Бора традиционно определяется как сильный, холодный и порывистый ветер, дующий с прибрежных горных хребтов на море. В Черноморском бассейне такой ветер часто бывает в районе Крымских гор, а также в окрестностях Новороссийска, где за год наблюдается в среднем 46 дней с борой. Как правило, сильная бора сопровождается значительным понижением температуры, иногда до -25°C . Совместно со скоростями ветра, достигающими до 30 – 35 м/с и более, это вызывает многочисленные разрушения [1].

Отличительной особенностью ветра типа бора является значительная пространственно-временная изменчивость, связанная как с локальными неоднородностями орографии и береговой черты, так и с особенностями обтекания гор воздушным потоком [2, 3]. Основные достижения в изучении возмущений, вносимых орографией в термодинамические процессы развития бора, связаны с применением численных моделей. Отметим обзор [4], в котором приводятся результаты исследования бора, развивающейся на северо-восточном берегу Адриатического моря. В работе [5], в которой численно была воспроизведена бора в Новороссийске в начале февраля 2010 г., показано, что одной из причин временной изменчивости в ходе ее развития явилась смена гидродинамического режима обтекания гор потоком воздуха, что привело к изменению структуры самого струйного течения – бора. Некоторые результаты численного моделирования новороссийской бора даны в работах [6, 7].

В то же время новороссийская бора не является только локальным явлением, охватывающим район Новороссийска – Геленджика. Она лишь часть более общего процесса – вторжения через северо-восточную границу моря холодного воздуха, оказывающего сильное воздействие на всю его восточную часть. Такие вторжения в этом районе моря могут рассматриваться, например, как одна из причин формирования вод холодного промежуточного слоя (ХПС) [8]. В зимний период поток холодного воздуха может привести к конвективному охлаждению верхнего 30 – 40-метрового слоя в центральной восточной части моря, последующее растекание которого может являться одним из источников ХПС.

До настоящего времени наиболее полный обзор синоптических условий образования и аэрологической структуры новороссийской боры представлен в работе [1]. В ней на основе анализа исторической базы данных предложена классификация боры по четырем режимам с учетом гидрометеорологических особенностей общей циркуляции атмосферы, на фоне которой развивается бора. Различают четыре типа боры: стоковая, внутримассовая, муссонная и фронтальная. Наиболее сильной в зимний период является фронтальная бора, связанная с прохождением холодного фронта на юго-восточной периферии центрально-европейского антициклона. Зимой катастрофическая фронтальная бора со скоростями ветра более 30 м/с имеет повторяемость ~75%. Ее продолжительность составляет не более 2 – 3 сут и сопровождается значительным понижением температуры. Кроме того, фронтальная бора не локализуется только в районе Новороссийска, штормовые северо-восточные ветры охватывают большую территорию: Крым, Азовское море, юг Украины, Северный Кавказ.

Отметим, что определение боры [1] как ветра в районе Новороссийска со скоростями более 15 м/с значительно расширяет типизацию этого явления и включает в себя весенне-летне-осенние случаи сильного ветра, не сопровождающиеся значительным понижением температуры и катастрофическими последствиями. Обычно борой считаются случаи сильного ветра и значительных понижений температуры в зимний период. В связи с этим условием в дальнейшем будем рассматривать особенности развития зимней боры.

Данные. Работа основана на данных регионального реанализа атмосферной циркуляции с повышенным разрешением с использованием численной модели *RegCM4* и входных данных реанализа *ERA-Interim* [9]. В модели заданы 18 вертикальных σ -уровней, пространственное разрешение модели 25×25 км, выходные данные для поверхности заданы с шагом по времени 1 ч, для σ -уровней – 6 ч. Расчеты были выполнены за период 1979 – 2014 гг. В настоящей работе для статистических оценок использованы выходные данные модели с временным интервалом 1 сут.

Необходимо отметить, однако, что региональный реанализ имеет все же недостаточное разрешение для адекватного воспроизведения особенностей боры, поскольку учитываются только крупномасштабные особенности оро-

графии, что приводит к сглаживанию рельефа и занижению высот гор. Поэтому региональные особенности, связанные с моделированием атмосферной циркуляции в районе Новороссийска, могут рассматриваться лишь как качественные оценки. Более детальные оценки могут быть получены лишь при численном реанализе атмосферной циркуляции с высоким пространственным разрешением. Для статистических оценок требуется численное моделирование на больших временных масштабах, что представляется задачей будущего. Поэтому в настоящей работе моделирование боры с использованием региональной численной модели атмосферной циркуляции с высоким разрешением *WRF-ARW* [10] будет применяться лишь для физической интерпретации некоторых мезомасштабных особенностей этого явления.

Пространственная структура поля ветра и температуры при боре.

Рассмотрим осредненную по зимним месяцам пространственную структуру полей скорости ветра и температуры в Черноморском регионе для случая боры. В качестве критерия ее развития выберем превышение величиной северо-восточной компоненты скорости ветра заданного уровня. Северо-восточная компонента скорости $U_n = -0,7(U + V)$, где U и V – меридиональная и зональная компоненты скорости ветра на высоте 10 м в ближайшей к Новороссийску точке в массиве данных реанализа, приблизительно соответствует скорости, нормальной к горному хребту Варада в окрестности Новороссийска. На рис. 1, *а* показаны пространственные композиты полей скорости ветра и температуры при боре (т. е. осредненные поля при северо-восточной компоненте скорости U_n , превосходящей выбранный нами условный критерий боры 10 м/с), на рис. 1, *б* – при противоположном, юго-западном ветре.

Как видно, в северо-восточной части моря осредненные значения скорости ветра превышают 15 м/с по сравнению с отсчетной скоростью 10 м/с в районе Новороссийска. Характерной крупномасштабной особенностью поля скорости ветра при боре является циклоническая циркуляция, охватывающая всю юго-восточную часть Черного моря. Эта особенность является следствием двух причин: циклоническая завихренность формируется при обтекании северо-восточным бароклинным потоком северо-западного края высоких Кавказских гор [11]; кроме этого, достаточно высокие (до 2 – 3 км) Понтийские горы Малой Азии служат барьером на пути распространения на юг воздуха в атмосферном пограничном слое. Особенностью поля температуры приповерхностного воздуха являются большие градиенты в прибрежной северо-восточной области (в районе развития самой боры).

Отметим, что представленные композиты – результат осреднения полей за весь 36-летний зимний период. Кроме того, как указывалось ранее, реанализ не дает возможности количественно воспроизводить все эффекты взаимодействия потока воздуха с прибрежными горами. Поэтому интересно рассмотреть непосредственные поля температуры и скорости ветра для одного из недавних случаев сильной боры, рассчитанных с использованием численной модели с высоким пространственным разрешением.

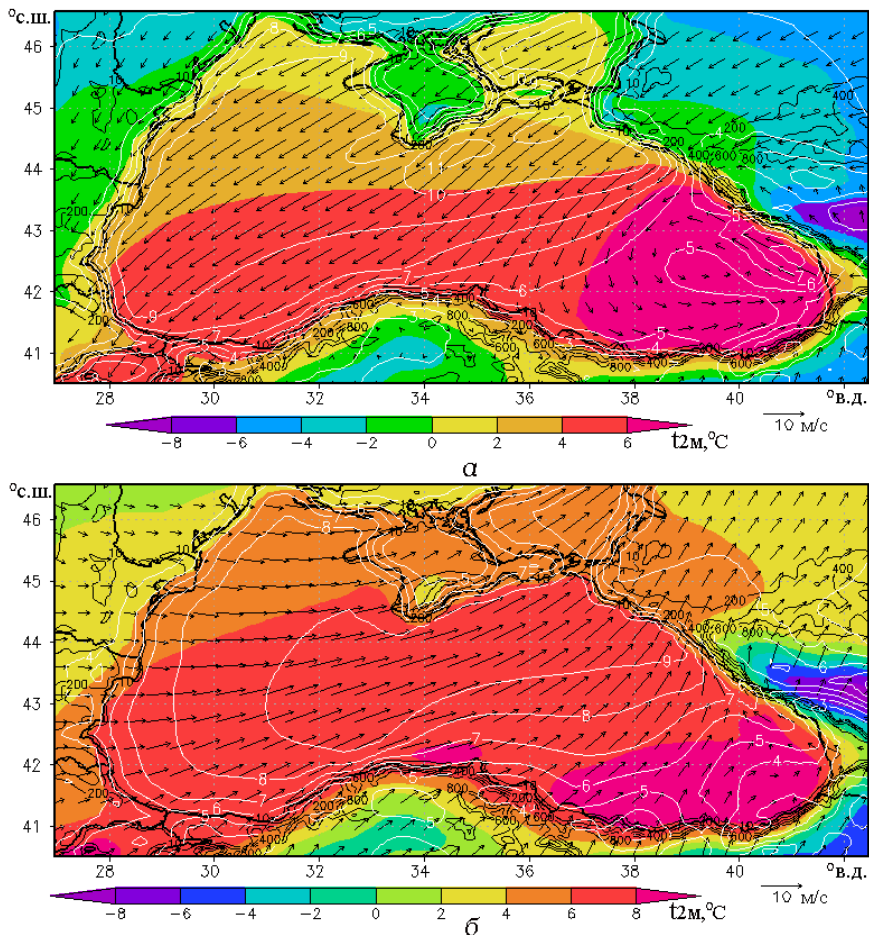


Рис. 1. Средние поля температуры на высоте 2 м (цвет), модуля скорости ветра на высоте 10 м (изолинии) и векторов скорости ветра на высоте 10 м (стрелки) при буре (а) и при противоположном, юго-западном ветре (б) в зимний период (январь – март 1979 – 2014 гг.) по данным реанализа, выполненного с использованием численной модели *RegCM4*

На рис. 2 показаны поля скорости ветра и температуры для боры 9 февраля 2017 г. Здесь более явно выделяются особенности полей, в «размазанном» виде отмечаемые на композитах. Хорошо выделена локальная область максимального ветра со скоростью более 27 м/с, приходящая непосредственно на Цемесскую бухту. По мере удаления от берега скорости ветра постепенно уменьшаются, причем видны протяженные мелкомасштабные неоднородности скорости, связанные с особенностями орографии и очертаний берега. Также в районе больших скоростей прибрежного ветра выделяются по нормали к берегу большие градиенты поверхностной температуры: в узкой прибрежной области, примыкающей к подветренному склону гор, температура изменяется на 5 – 7°C. Как будет показано далее, этот эффект непосредственно связан с особенностями развития боры.

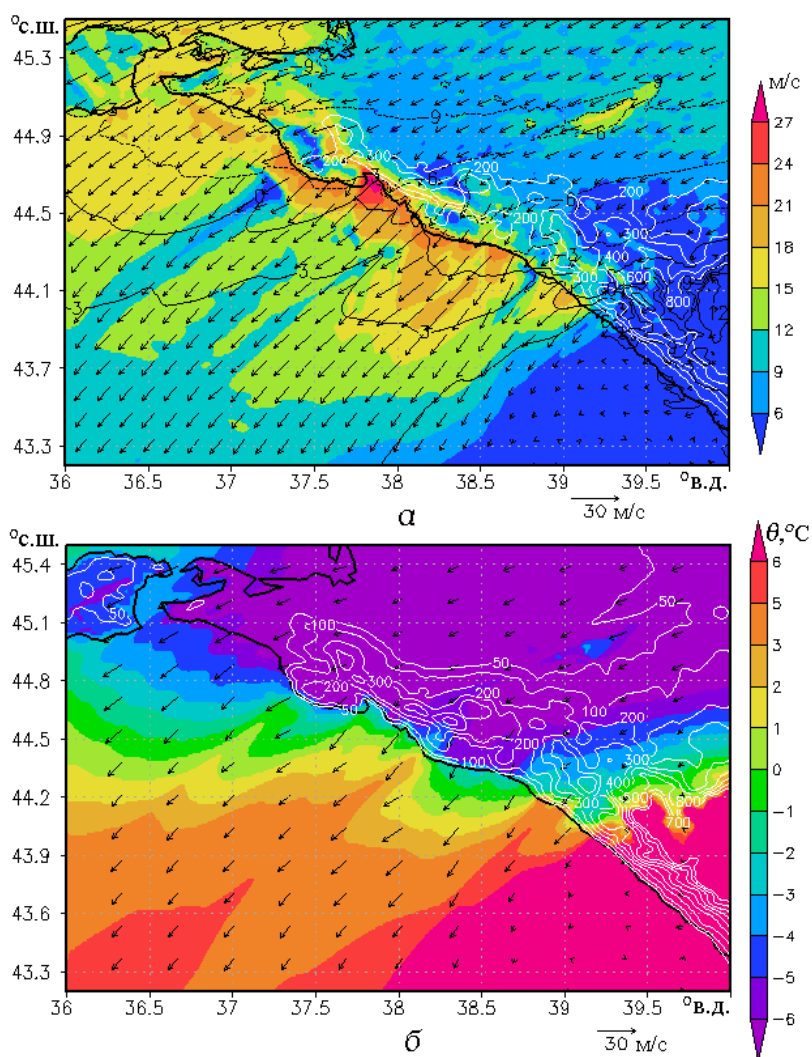


Рис. 2. Поля скорости ветра и температуры для боры в 00 ч 9 февраля 2017 г.: поле скорости ветра на высоте 10 м (стрелки) и модуль скорости ветра (цвет), поле потенциальной температуры на высоте 2 м (изолинии) – а; поле потенциальной температуры на высоте 2 м (цвет) и поле ветра (стрелки) – б

Изменение температуры в зоне перехода суша – море. Катастрофические случаи зимней боры сопровождаются сильным ветром и понижением температуры. Поэтому иногда принимается, что понижение температуры является прямым следствием термогидродинамических процессов при боре. Для одного из режимов боры – стокового типа по терминологии [1] – это действительно так. По сути стоковая бора представляет собой кататический ветер (поток приземного холодного воздуха, стекающего с вершины к подошве вдоль склона хребта), возникающий в результате ночного радиационного охлаждения [12]. Однако стоковая бора в зимний период относится к редким явлениям по сравнению с фронтальной борой и не может опреде-

лять свойства композитных полей температуры. Рассмотрим осредненные изменения температуры по данным реанализа.

На рис. 3 показан регрессионный график зависимости температуры в ближайшей к Новороссийску морской точке с координатами $44,58^\circ$ с. ш., $37,74^\circ$ в. д. и нормальной к горному хребту скорости ветра U_n в этой же точке. Шкала показывает число точек на элемент $1^\circ \times 1$ м/с из общего числа 3248 (количество зимних дней за 36 лет, представленных в данных реанализа). Отметим, что точки в четвертой четверти графика соответствуют северо-восточному ветру, т. е. направлению ветра при боре, во второй четверти – ветру с моря на сушу. Как видно из рисунка, наблюдается явная отрицательная связь между изменениями температуры и величины скорости ветра. Коэффициент корреляции между ними составляет $-0,49$. Таким образом, подтверждается заключение [1] о преобладании в зимний период боры фронтального типа, связанной с вторжением холодного северо-восточного воздуха, вызывающего понижение температуры во всем рассматриваемом прибрежном районе Новороссийска.

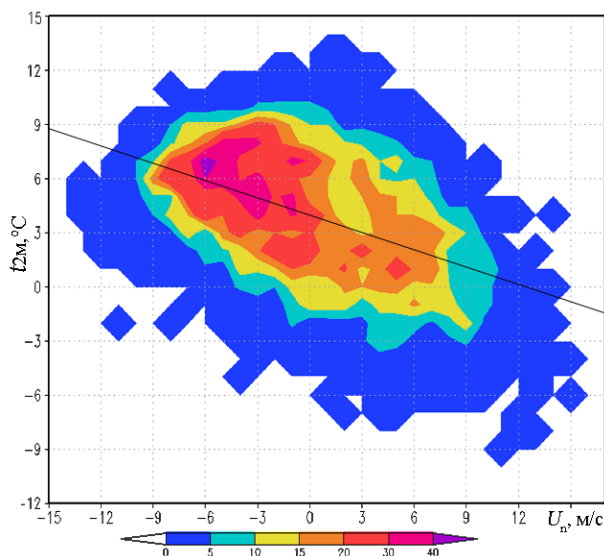


Рис. 3. Совместное распределение для зимнего периода (январь – март 1979 – 2014 гг.): юго-восточной компоненты скорости ветра U_n ($U_n = \{-0,7U_{10}, 0,7V_{10}\}$, где U_{10} – зональная, V_{10} – меридиональная компоненты скорости ветра на высоте 10 м) и температуры в ближайшей к Новороссийску морской точке с координатами $44,58^\circ$ с. ш.; $37,74^\circ$ в. д. по данным реанализа, выполненного с использованием численной модели *RegCM4*

Более интересен регрессионный график, представленный на рис. 4, где показаны величины разности температур Δt между прибрежной, близкой к Новороссийску, той же морской точкой и точкой на суше с координатами $45,02^\circ$ с. ш., $37,96^\circ$ в. д., находящейся сразу за пределами горной области региона, в зависимости от величины компоненты скорости ветра U_n в морской точке. Видна существенная асимметрия распределения по отношению к изменению знака Δt : преобладают точки в первой и второй четверти графика,

соответствующие большим температурам над морем по сравнению с сушей вне зависимости от направления ветра. Коэффициент корреляции между скоростью U_n и Δt равен 0,37.

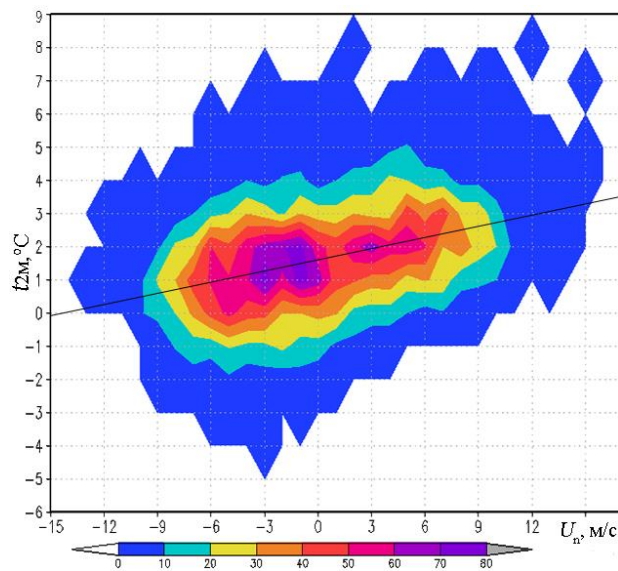


Рис. 4. Совместное распределение для зимнего периода (январь – март 1979 – 2014 гг.): юго-восточной компоненты скорости ветра U_n ($U_n = \{-0,7U_{10}, 0,7V_{10}\}$) в точке с координатами $44,58^\circ$ с. ш.; $37,74^\circ$ в. д. и разности приземных температур в этой же точке и в точке на побережье с координатами $45,02^\circ$ с. ш.; $37,96^\circ$ в. д. по данным реанализа, выполненного с использованием численной модели *RegCM4*

Если превышение температур над морем по сравнению с температурами над сушей при юго-западном ветре не вызывает вопросов (в зимний период адвекция более теплого приводного воздуха на сушу приводит к повышению температуры над ней, причем перепад температур уменьшается при возрастании скорости ветра), то положительная зависимость между скоростью северо-восточного ветра U_n , т. е. при боре, и перепадом температур Δt требует объяснения. По существу, это означает, что при боре температура в прибрежной области моря превышает температуру на суше в предгорной части региона. На первый взгляд это противоречит общему представлению о том, что бора сопровождается понижением температуры над подветренным склоном и подошвой горного хребта.

Физический механизм такого явления поясняет рис. 5, на котором показана вертикальная структура компоненты скорости ветра U_n и потенциальной температуры θ (для краткости определим $\theta = \theta (\text{K}^\circ) - 273,15$) на меридиональном нормальном к хребту разрезе, проходящем через Цемесскую бухту, т. е. через локальную область максимальной скорости боры, показанную на рис. 2. В общем, и скорость и температура имеют особенности, характерные для горных ветров, к которым и относится фронтальная бора [13 – 15]. Область обрушения внутренних гравитационных волн над подветренным склоном горы хорошо представлена вертикальными участками изолиний θ . Инди-

катором блокирования набегающего на гору воздушного потока является пересечение изолиниями θ наветренного склона. Струйное течение боры, прижатое к поверхности, со скоростями до 30 м/с также хорошо видно на рис. 5. Результатом образования хорошо перемешанной турбулентной области, связанной с обрушением внутренних волн, и является прижатое к поверхности течение боры, источник которого – теплый (в терминах потенциальной температуры) воздух из более высоких слоев атмосферы над наветренным склоном. Как видно, разность температур приземного воздуха в предгорной части хребта и в прибрежной зоне составляет $\sim 2 - 3^\circ\text{C}$.

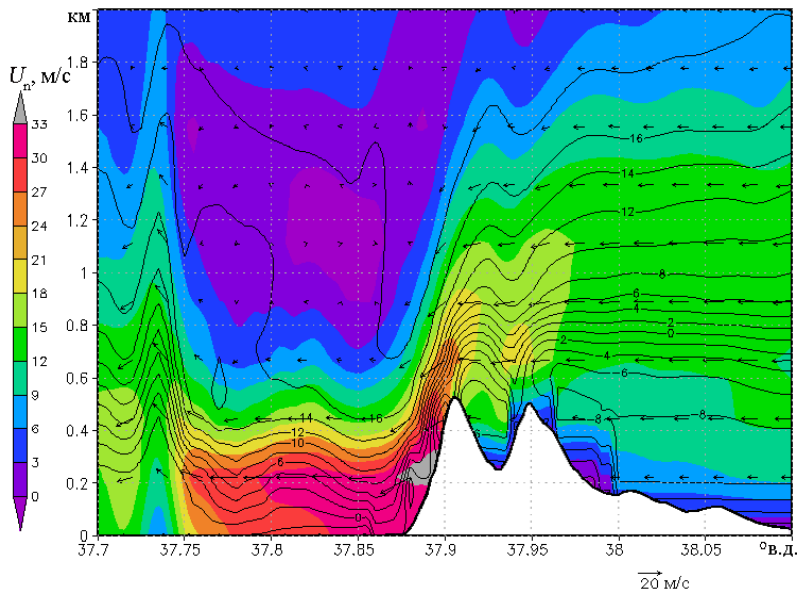


Рис. 5. Вертикальная структура юго-восточной компоненты скорости ветра U_n (цвет), потенциальной температуры θ (изолинии) и векторы скорости (стрелки) в вертикальной плоскости в координатах $\{u, 5 \times w\}$ (где u – зональная, w – вертикальная компонента скорости ветра) для перпендикулярного к горному хребту сечения $44,5^\circ - 44,9^\circ$ с. ш.; $37,7^\circ - 38,1^\circ$ в. д. в 00 ч 09.02.2017 г. по данным численного моделирования с использованием модели *WRF-ARW*

Таким образом, более теплый воздух над подветренным склоном хребта является результатом блокирования холодного приземного воздуха, поступающего из предгорной части суши, и замены его более теплым воздухом из вышележащих слоев атмосферы. На регрессионном графике (рис. 4) этот перепад температур представлен точками в первой четверти. Поскольку фронтальная бора связана с прохождением холодного фронта воздуха, температура которого в зимний период может понижаться до $-10 \dots -15^\circ\text{C}$, указанный выше ее термогидродинамический эффект приводит к повышению температуры в прибрежной зоне моря без изменения общего характера понижения температуры при прохождении холодного фронта [1]. Если представить мысленно эксперимент с исчезновением горного хребта Варада, то вторжение холодного воздуха через северо-восточную границу Черного моря вызывало бы более умеренные скорости ветра, но более низкие температуры воздуха.

Этот эффект блокирования в области невысокого хребта Варада был относительно невелик. Однако по мере продвижения вдоль побережья на юг и увеличения высоты Кавказских гор блокирование северо-восточного потока горами должно увеличиваться и указанный перепад температур также будет увеличиваться. На рис. 2 эта особенность выражается в быстром увеличении прибрежной температуры воздуха в области Туапсе.

Заключение. Данные климатического реанализа с повышенным пространственным разрешением (25×25 км) позволили построить композиты полей скорости ветра и температуры для зимнего периода, соответствующие случаям новороссийской боры. Развитию боры, как было показано, сопутствует образование крупномасштабной циклонической циркуляции в юго-восточной части Черного моря. В результате обтекания потоком воздуха северо-западного края высоких Кавказских гор возникает циклоническая завихренность скорости ветра над морем, а высокие Анатолийские горы ограничивают распространение потоков воздуха на юг и совместно с Кавказскими горами формируют замкнутую крупномасштабную ячейку циркуляции.

Регрессионные зависимости между скоростью ветра и температурой в Новороссийском регионе, построенные по 36-летним данным реанализа, показывают, что в зимний период сильные ветра северо-восточного направления соответствуют случаям боры фронтального типа, при которых ее развитие сопровождается понижением температуры воздуха. При этом выявляется важная особенность поля температуры: повышенные значения температуры приземного слоя воздуха в прибрежной части по сравнению с температурой в предгорных районах суши. Численное моделирование развития боры с высоким пространственным разрешением объясняет механизм этого явления, связанного с блокированием воздуха над наветренным склоном горного хребта и его замещением более теплым вышележащим воздухом на подветренном склоне.

Расчеты проведены на вычислительном кластере Морского гидрофизического института РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827 – 2015 – 0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан – атмосфера – литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новороссийская бора* / Под ред. А.М. Гусева // Тр. Морского гидрофизического института АН СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – Т. 14. – 140 с.
2. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Моделирование новороссийской боры // *Метеорология и гидрология*. – 2013. – № 3. – С. 47 – 55.
3. *Smith R.B.* Hydrostatic airflow over mountains // *Adv. Geophys.* – 1989. – 31. – P. 1 – 41. – doi:10.1016/S0065-2687(08)60052-7

4. *Grisogono B., Belušić D.* A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe Bora wind // *Tellus*. – 2009. – 61, Iss. 1. – P. 1 – 16. – doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00369.x
5. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Порывистость новороссийской боры // *Метеорология и гидрология*. – 2013. – № 12. – С. 68 – 75.
6. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Моделирование черноморской боры // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2013. – 49, № 6. – С. 688 – 698. – doi:10.7868/S0002351513060060
7. *Гавриков А.В., Иванов А.Ю.* Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование // *Там же*. – 2015. – 51, № 5. – С. 615 – 626. – doi:10.7868/S0002351515050053
8. *Овчинников И.М., Попов Ю.И.* Формирование холодного промежуточного слоя в Черном море // *Океанология*. – 1987. – XXVII, вып. 5. – С. 739 – 746.
9. *Анисимов А.Е., Яровая Д.А., Барабанов В.С.* Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона // *Морской гидрофизический журнал*. – 2015. – № 4. – С. 14 – 28. – doi:10.22449/0233-7584-2015-4-14-28
10. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al.* A description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR/TN – 475+STR. NCAR technical note. – Boulder, Colorado, USA: Mesoscale and Microscale Meteorology Division National Center for Atmospheric Research, 2008. – 113 p. – doi:10.5065/D68S4MVH
11. *Epifano C.C., Rotunno R.* The Dynamic of Orographic Wake Formation in Flows with Upstream Blocking // *J. Atmos. Sci.* – 2005. – 62. – P. 3127 – 3150. – doi:10.1175/JAS3523.1
12. *Grisogono B.* Post-onset behaviour of the pure katabatic flow // *Bound.-Lay. Meteorol.* – 2003. – 107, Iss. 1. – P. 157 – 175. – doi:10.1023/A:1021511105871
13. *Гулл А.* Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 397 с.
14. *Lin Y.-L.* Mesoscale Dynamics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 630 p. – URL: <http://www.prometeus.nsc.ru/eng/exhibit/09/09-10-13/cont29f.ssi> (дата обращения: 20.03.2017).
15. *Smith R.B.* On Severe Downslope Winds // *J. Atmos. Sci.* – 1985. – 42, No. 23. – P. 2597 – 2603. – doi:10.1175/1520-0469(1985)042<2597:OSDW>2.0.CO;2

Large-scale features of the Novorossiysk bora

V. V. Efimov*, O. I. Komarovskaya

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: vefim38@mail.ru*

Spatial structure of the wind speed and temperature fields is assessed for the cases of bora activity in the Black Sea region in December – February based on the reanalysis data characterized by high spatial resolution and covering 36 years. It is shown that bora development is followed by formation of a large-scale cyclonic circulation in the southeast part of the Black Sea. The airflow of the northwest edge of high Caucasus Mountains leads to the wind speed cyclonic vorticity over the sea; high Anatolian mountains block propagation of the air flows to the south and, thus, they jointly form a large-scale closed circulation cell. Regression dependences between the wind speed and temperature in the Novorossiysk region are studied; they show that in winter strong northeast winds correspond to bora activity of a frontal type which is accompanied by the air temperature decrease. At that the important feature of the temperature field during bora is revealed: temperature in the sea coastal area exceeds the one in the mainland foothill part of the region.

Keywords: Novorossiysk region, bora, *WRF-ARW* model of atmospheric circulation, cyclonic vorticity.