

Формирование Новоземельской боры

© 2017 В.В. Ефимов, О.И. Комаровская

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: vefim38@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.10.2016 г.

С использованием численной модели атмосферной циркуляции *WRF-ARW* с высоким пространственным разрешением воспроизведена и рассмотрена структура атмосферных полей для нескольких случаев сильных юго-восточных и западных ветров. Приведено типичное распределение полей скорости ветра и температуры для этих случаев. Показано, что основным условием развития боры является устойчивая стратификация в нижнем слое атмосферы над Карским морем при ветрах восточного и юго-восточного направления. Результатом блокирования воздушного потока на наветренном восточном склоне гор является развитие на западном склоне и в прибрежной области Баренцева моря сильного приповерхностного ветра – боры. В результате температура воздуха над Баренцевым морем при боре значительно выше, чем на тех же высотах над Карским морем. Слабоустойчивый атмосферный пограничный слой над Баренцевым морем при ветрах западного направления не может обеспечить значительного блокирования горами набегающего потока, являющегося одним из основных условий развития боры. В результате для западного ветра архипелаг Новая Земля не является барьером, разделяющим зимой нижние слои атмосферы между Карским и Баренцевым морями.

Ключевые слова: архипелаг Новая Земля, бора, модель атмосферной циркуляции *WRF-ARW*, бароклинный поток, частота устойчивости.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-2-3-11

Введение. Архипелаг Новая Земля, расположенный между Баренцевым и Карским морями, влияет на систему циркуляции вод в Арктическом бассейне. Через Баренцево море проходит около половины поступающей в бассейн воды Атлантического океана. Мелководная часть моря, примыкающая к западному побережью арх. Новая Земля, является одним из центров формирования в зимний период холодных глубинных вод в результате теплопотерь через поверхность за счет потоков явного и скрытого тепла. В этом же районе зимой происходит образование ледяного покрова, что способствует увеличению солености и также увеличивает скорость формирования холодных вод [1 – 4]. Режим Карского моря, расположенного к востоку от арх. Новая Земля, значительно отличается от режима Баренцева моря: зимой оно практически полностью покрывается льдом, а приповерхностная температура воздуха ниже на 5 – 15°C. Одна из причин таких различий – расположение между этими морями вытянутого на север арх. Новая Земля, который является естественной преградой для потока сравнительно теплых атлантических вод, не поступающих в результате в Карское море. Однако важное значение имеет также и различный температурный режим атмосферы над этими двумя морями, который в значительной степени возникает из-за наличия гористого архипелага Новая Земля. Характерной особенностью атмосферной циркуляции в этом районе является возникновение в зимний период вблизи западного побережья арх. Новая Земля сильных прибрежных ветров, определяемых как бора.

Возникновение сильных ветров на склонах прибрежных гор хорошо известно (например Новороссийская бора [5 – 8]). Среди немногочисленных упоминаний о Новоземельской боре можно выделить лишь работу [9], в которой впервые дан общий анализ статистики сильных ветров в Баренцевом море и, в частности, отмечены увеличенные теплотери моря через поверхность в окрестности западного побережья Новой Земли, связанные с борой. В этой работе рассмотрены также некоторые особенности гидродинамического режима формирования боры. Отметим, что работа была основана на данных 11-летнего реанализа *ASRI (Interim Arctic System Reanalysis)* с пространственным разрешением 30 км. Этого, вообще говоря, недостаточно для более детального изучения пространственно-временной структуры Новоземельской боры.

Выполненные в настоящей работе численные расчеты с использованием модели *WRF-ARW* с высоким пространственным разрешением 1 км позволили выделить мелкомасштабную структуру боры, дать оценку особенностям взаимодействия воздушного потока с горным хребтом арх. Новая Земля и возмущений, вносимых борой в температурное поле атмосферы над восточной краевой частью Баренцева моря.

Численная модель. Использовалась известная численная модель атмосферной циркуляции *WRF-ARW* [10], параметры которой были выбраны для проведения расчетов с пространственным разрешением во вложенных доменах 1×1 км, 3×3 км, 9×9 км (рис. 1). По вертикали заданы 28 неравномерно расположенных по высоте σ -уровней с увеличенным разрешением в планетарном пограничном слое. Использовались следующие схемы параметризации физических процессов: *RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)* и *Dudhia* – для расчета радиационного баланса коротковолновой и длинноволновой радиации соответственно, *Kain-Fritsch* – для расчета кучевой облачности. Для описания фазовых переходов в атмосфере (микрофизических процессов) применялась схема *Single-Moment 3-class*.

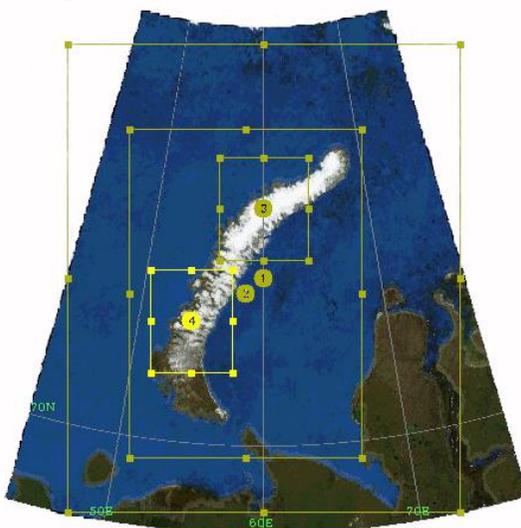


Рис. 1. Расположение доменов для расчета боры

Для параметризации приземного пограничного слоя использовалась схема *MM5 similarity*, атмосферный пограничный слой описывался схемой замыкания турбулентности *Mellor-Yamada* в первых двух доменах и схемой *YSU (Yon Sei University)* – в последнем. В нем задается линейно-параболический профиль коэффициента вертикальной турбулентной вязкости, а для учета неразрешаемых в модели подсеточных потоков импульса, тепла и влаги вводится параметризация противогradientных потоков, а также задается величина потока вовлечения.

Входными для внешнего домена являлись данные оперативного анализа *FNL (Global Final Analysis)* с разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$, которые обновлялись каждые 6 ч. После адаптации модели к заданным начальным условиям развитие атмосферных процессов во всех доменах определялось лишь периодически обновляющимися входными данными, устанавливающими граничные условия на внешнем домене.

Пространственная структура боры. Согласно работе [9], в Баренцевом море в зимний период сильные юго-восточные ветры со скоростями более 14 м/с имеют достаточно высокую повторяемость (~10%). Поэтому из массива данных оперативного реанализа *FNL* были выделены несколько случаев таких сильных ветров осенне-зимнего периода продолжительностью более суток. Ниже рассмотрим типичные расчетные поля скорости и температуры, относящиеся к боре, т. е. к сильному юго-восточному ветру на западном склоне гор. Кроме этого, рассмотрим еще случаи, когда в зимний период ветер дует с противоположного, западного или северо-западного направления.

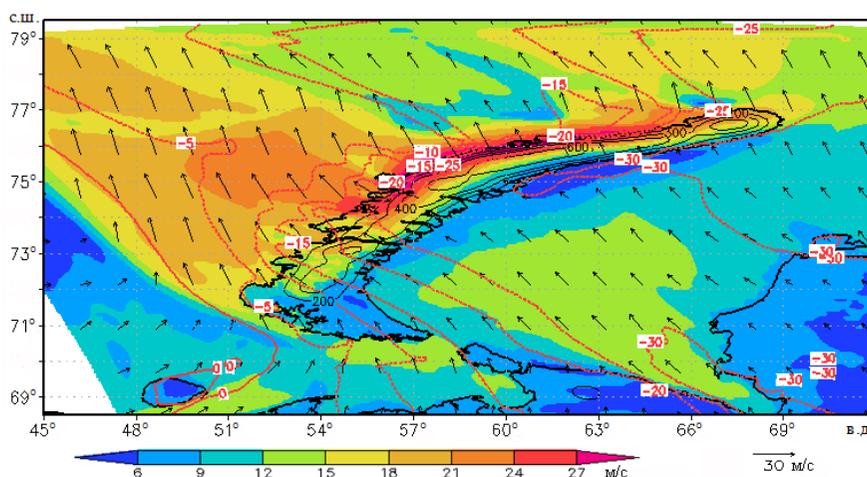


Рис. 2. Поля потенциальной температуры θ на высоте 2 м и скорости ветра на высоте 10 м на 14:00 6 декабря 2014 г. по данным расчета во втором домене (разрешение 3×3 км)

По результатам моделирования для боры за период 6 – 7 декабря 2014 г. на рис. 2 приведены рассчитанная потенциальная температура атмосферы (θ) на высоте 2 м (для краткости здесь и далее шкала потенциальной температуры сдвинута: $\theta = \theta(^{\circ}\text{K}) - 273,15$) и вектор скорости ветра (U_{10}) на высоте

10 м. Основная особенность распределения θ – низкие значения температуры над Карским морем и на восточных склонах гор. При этом над Баренцевым морем и над западными склонами гор значения температуры гораздо выше (на $7 - 11^\circ$). Эта особенность характерна для всех сроков расчета и, как будет отмечено далее, является принципиальной для Новоземельской боры. У западного склона гор и в прибрежной части Баренцева моря сформировалась область значительных скоростей приповерхностного ветра – свыше 24 м/с . Кроме этого, над восточным – наветренным склоном горного хребта и в прибрежной области моря скорости ветра невелики, и в целом над Карским морем они меньше, чем над Баренцевым. Рисунок 2 построен по данным внешнего, более крупномасштабного домена с разрешением 3 км , поэтому распределение и величины скорости не воспроизводят мелкомасштабную структуру поля скорости ветра над горами.

Распределение скорости ветра U_{10} и температуры θ по данным внутреннего домена с разрешением 1 км показано на рис. 3. Хорошо представлена мелкомасштабная изменчивость модуля и направления скорости, определяемая рельефом гор. Выделяются большие величины скорости на подветренном склоне гор (до 35 м/с) и малые – на наветренном, особенно над прибрежной частью Карского моря. Также можно отметить возникновение на наветренном восточном склоне гор вдольберегового течения воздуха, направленного на юго-запад, со скоростями $\sim 6 - 10 \text{ м/с}$. Это является результатом блокирования воздуха на наветренном склоне: поток бароклинного воздуха, набегаящий на горы, не имеет достаточного запаса кинетической энергии для переваливания через них и в результате распространяется вдоль горного хребта.

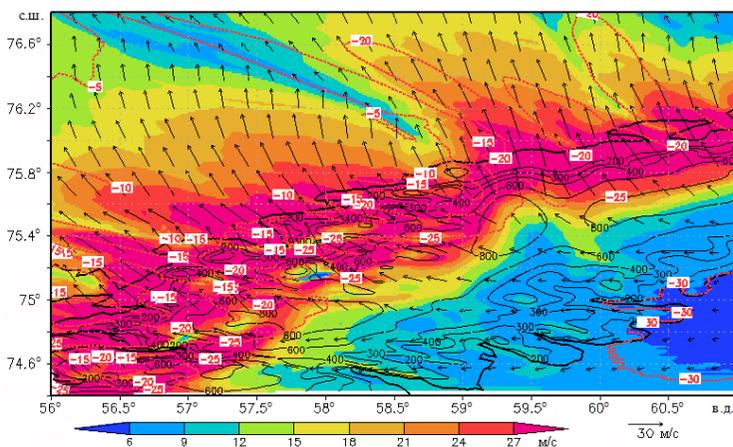


Рис. 3. Поля потенциальной температуры θ на высоте 2 м и скорости ветра на высоте 10 м на $14:00$ 6 декабря 2014 г. по данным расчета в третьем домене (разрешение $1 \times 1 \text{ км}$)

Как известно, основным параметром, задающим режим обтекания горы воздушным потоком, является число Фруда $Fr = U/Nh$, где постоянные по высоте U – скорость потока воздуха, N – частота устойчивости, h – высота горы. Баротропный поток при любой скорости свободно обтекает сверху гору, ба-

роклинный же – лишь при скорости $U > Nh$ [11 – 13]. Для переменных по высоте значений скорости ветра и частоты устойчивости этот простой критерий становится достаточно условным. Для значительно меняющихся и немонотонных по высоте профилей температуры и скорости ветра определение таких характерных особенностей обтекания потоком воздуха гор, как высоты блокирования на наветренном склоне и формирование критического слоя, становится возможным только при численном моделировании [12, 13].

Эффект блокирования хорошо представлен на рис. 4, где показана вертикальная структура скорости и потенциальной температуры на меридиональном сечении по $59,5^\circ$ в. д. через горный хребет, проходящем через высокогорную часть арх. Новая Земля. В области атмосферы на наветренном склоне изотермы потенциальной температуры почти горизонтальны. Изотермы $\theta < 23^\circ$ пересекают наветренный склон – это эффект блокирования. На подветренном северо-западном склоне образуется хорошо выраженное прижатое к склону струйное течение – собственно бора. Его скорость достигает 40 м/с. Не рассматривая существующие физические представления о механизмах формирования боры, отметим, что на рис. 4 хорошо представлены все характерные особенности, учитываемые при построении ее аналитических или численных моделей [13 – 16]. В первую очередь это формирование критического слоя – турбулентной области с вертикальными изотермами. В достаточно наглядной гидравлической модели боры существование такой области приводит к сгущению линий тока и резкому усилению скорости на подветренном склоне [13].

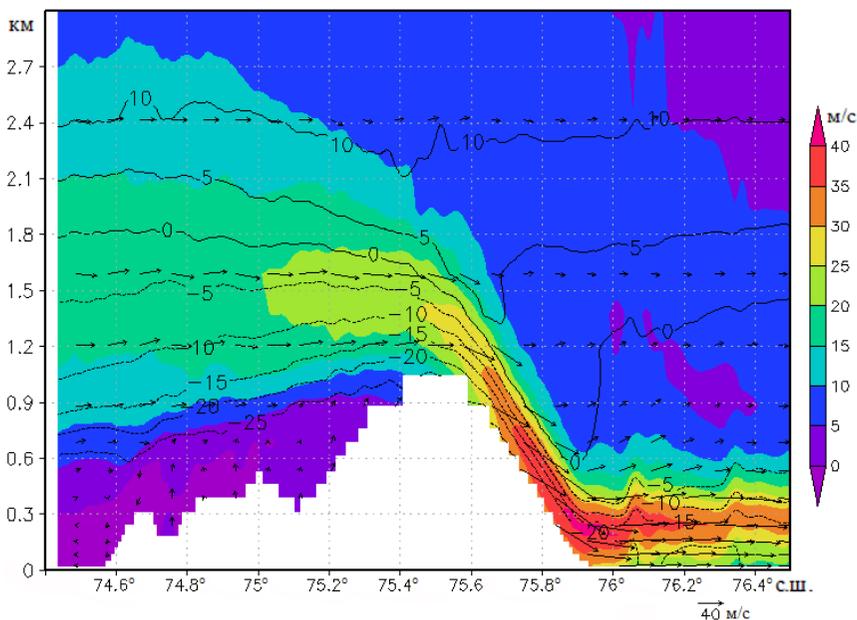


Рис. 4. Вертикальная структура полей скорости ветра (стрелки) с компонентами (v ; $w:25$), потенциальной температуры θ (изолинии) и v -компоненты скорости ветра (цвет) на меридиональном сечении по $59,5^\circ$ в. д. на 14:00 6 декабря 2014 г. по данным расчета в третьем домене (разрешение 1×1 км)

Важным следствием образования боры является формирование области относительно теплого воздуха (в терминах потенциальной температуры) над подветренным склоном и в приповерхностной атмосфере над морем. В целом температура воздуха в прибрежной области над Баренцевым морем в слое до 1 – 1,5 км выше температуры воздуха на тех же высотах над Карским морем на 8 – 20°C. В результате появляется интересная особенность развития Новоземельской боры, регулярно наблюдаемая на спутниковых снимках облачности, – возникновение безоблачной зоны в атмосфере над Баренцевым морем в районе высокогорной области арх. Новая Земля.

Сильная устойчивость набегающего на горы потока воздуха, определяющая эффект блокирования, видна на рис. 5, где показан вертикальный профиль температуры θ в прибрежной области Карского моря. Также приведен профиль частоты устойчивости N , поскольку именно он перед наветренным склоном является определяющим для формирования боры. Как видно, величины N для высот до 1 км составляют $\sim 0,025 - 0,045 \text{ с}^{-1}$, что недостаточно для переваливания потоком воздуха горного хребта. Спутниковые снимки показывают, что в это время (6 декабря 2014 г.) в западной части Карского моря ледяной покров отсутствовал (<http://www.polarview.aq/sic/arctic/>). Поэтому над свободной от льда поверхностью в нижней части атмосферы формировался конвективный пограничный слой. Его высота, однако, составляла всего 200 – 300 м, что не меняло общей картины: поток не переваливал через горный хребет высотой более 1 км.

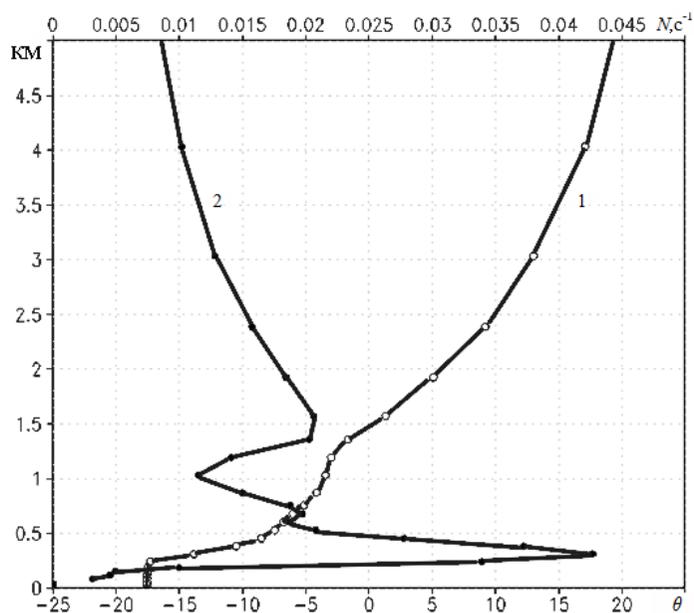


Рис. 5. Вертикальные профили потенциальной температуры θ (1) и частоты устойчивости N (2) в прибрежной области Карского моря в точке 77° с. ш., 59° в. д. на 14:00 6 декабря 2014 г. по данным расчета в третьем домене (разрешение 1×1 км)

Таким образом, можно предполагать, что основным условием развития боры является высокая устойчивость воздуха в нижнем слое атмосферы над Карским морем при ветре восточного и юго-восточного направления. Как известно, устойчивая стратификация в атмосфере наиболее распространена для поверхности моря, покрытой льдом, что типично для Карского моря в зимний период. Поэтому интересно рассмотреть другой случай – обтекание арх. Новая Земля потоком воздуха при неустойчивой стратификации атмосферного пограничного слоя.

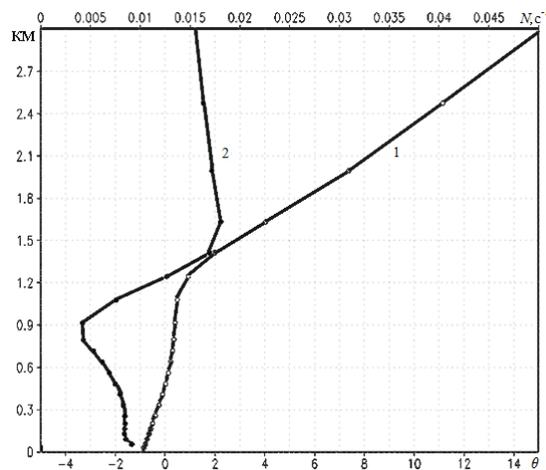


Рис. 6. Вертикальные профили потенциальной температуры θ (1) и частоты устойчивости N (2) в прибрежной области Карского моря в точке 75° с. ш., 55° в. д. на 15:00 3 января 2008 г. по данным расчета в четвертом домене (разрешение 1×1 км)

Рассмотрим такой противоположный боре случай, когда на арх. Новая Земля дует западный ветер. Один из таких примеров, относящийся к 3 января 2008 г., был воспроизведен. В отличие от Карского Баренцево море в этом регионе не было покрыто льдом, температура воды составляла $\sim 0^\circ\text{C}$, и при положительных величинах температуры воздуха формировался конвективно неустойчивый, близкий к нейтральному атмосферный пограничный слой. Вертикальный профиль потенциальной температуры θ и частоты устойчивости N показан на рис. 6. Видны существенные отличия от рис. 5. До высоты ~ 1 км атмосферный пограничный слой был близок к нейтральному, величины частоты устойчивости невелики, $N \sim 0,01 - 0,013 \text{ c}^{-1}$, и это обеспечивало переваливание ветром горного хребта. Вертикальное сечение по зональному разрезу вдоль $59,5^\circ$ с. ш. (рис. 7) показывает, что поля скорости и потенциальной температуры имеют простой вид: обтекание хребта носит характер обычного горного ветра (как и при горном ветре с числами $Fr > 1$). Блокирования набегающего на горы воздушного потока не наблюдается. Над горой возникают лишь линейные гравитационные внутренние волны, нет обрушения волн и не формируется струйное течение боры за горой. Температура в атмосферном пограничном слое перед и за горой приблизительно одинакова. Это имеет важное практическое приложение и означает, что горный хребет оказывает незначительное влияние на перетекание воздуха через него. Таким образом,

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ № 2 2017 9

для западного ветра наличие арх. Новая Земля не является барьером, разделяющим нижнюю часть атмосферы Баренцева и Карского морей.

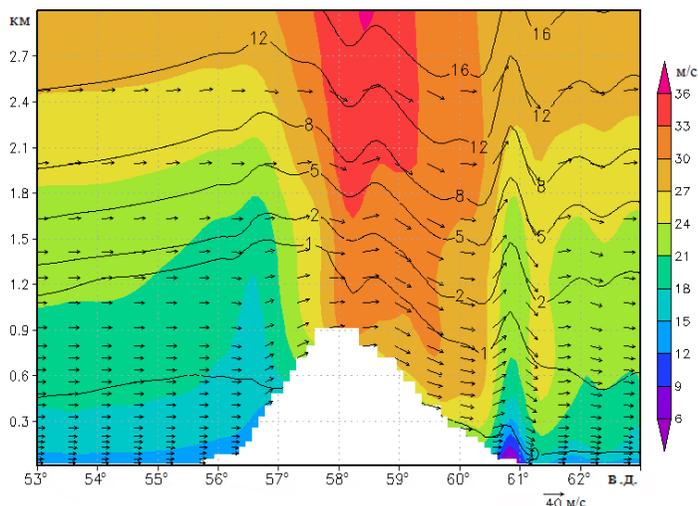


Рис. 7. Вертикальная структура полей скорости ветра (стрелки) с компонентами (u ; w :25), потенциальной температуры θ (изолинии) и u -компоненты скорости ветра (цвет) на зональном сечении по 75° с. ш. на 15:00 3 января 2008 г. по данным расчета во втором домене (разрешение 3×3 км)

Заключение. Численное моделирование атмосферной циркуляции в районе арх. Новая Земля позволило воспроизвести структуру атмосферных полей для нескольких случаев сильных юго-восточных и западных ветров. Приведено типичное распределение полей скорости ветра и температуры, показывающее зоны максимальных скоростей боры в области западного побережья арх. Новая Земля и температурные контрасты между Баренцевым и Карским морями. Показано, что результатом блокирования воздушного потока на наветренном восточном склоне гор является развитие на западном склоне и в прибрежной области Баренцева моря сильного приповерхностного ветра – боры. В результате температура воздуха над Баренцевым морем при боре значительно выше, чем на тех же высотах над Карским морем.

Рассмотрен также противоположный боре случай с западным ветром. При этом конвективный или слабоустойчивый атмосферный пограничный слой над Баренцевым морем не может обеспечить значительного блокирования горами набегающего потока, который является одним из основных условий развития боры. В результате для западного ветра арх. Новая Земля не является барьером, разделяющим зимой нижние слои атмосферы между Карским и Баренцевым морями, как для восточного или юго-восточного ветра.

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. *Arthun M., Ingvaldsen R.B., Smedsrud L.H. et al.* Dense water formation and circulation in the Barents Sea // *Deep-Sea Res. I.* – 2011. – 58. – P. 801 – 817.
2. *Arthun M., Schrum C.* Ocean surface heat flux variability in the Barents Sea // *J. Mar. Sys.* – 2010. – 83. – P. 88 – 98.
3. *Kolstad E.W.* Extreme small-scale wind episodes over the Barents Sea: When, where and why? // *Clim. Dynam.* – 2015. – doi: 1010007/s00382-014-2462-4.
4. *Vidar S. Lien, Trofimov A.I.G.* Formation of Barents Sea Branch Water in the north-eastern Barents Sea // *Polar Res.* – 2013. – 32. – P. 18905.
5. *Новороссийская бора* / Под ред. А.М. Гусева // *Тр. Морского гидрофизического института АН СССР.* – 1959. – 14. – 140 с.
6. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Моделирование черноморской боры // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2013. – 49, № 6. – С. 688 – 698.
7. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Порывистость новороссийской боры // *Метеорология и гидрология.* – 2013. – № 12. – С. 68 – 75.
8. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Моделирование новороссийской боры // *Там же.* – 2013. – № 3. – С. 47 – 55.
9. *Moore G.W.K.* Hydrostatic airflow over mountains // *Adv. Geophys.* – 1989. – 31. – P. 1 – 31.
10. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al.* A description of the Advanced Research WRF version 3 // *NCAR technical note. NCAR/TN – 475+STR.* – 2008. – 112 p.
11. *Гулл А.* Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 396 с.
12. *Lin Y.-L.* *Mesoscale Dynamics.* – Cambridge University Press, 2007. – 630 p.
13. *Smith R.B.* On severe downslope winds // *J. Atmos. Sci.* – 1985. – 42. – P. 2597 – 2603.
14. *Epifano C.C., Rotunno R.* The dynamic of orographic wake formation in flows with upstream blocking // *Ibid.* – 2005. – 62. – P. 3127 – 3150.
15. *Grisogono B., Belušić D.* A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe Bora wind // *Tellus.* – 2009. – 61, No. 1. – P. 1 – 16.
16. *Moore G.W.K.* The Novaya Zemlya Bora and its impact on Barents Sea air-sea interaction // *Geophys. Res. Lett.* – 2013. – 40. – P. 3462 – 3467.

Formation of the Novaya Zemlya bora

V.V. Efimov, O.I. Komarovskaya

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: vefim38@mail.ru*

Structure of the atmospheric fields for a few cases of strong southeast and west winds is reproduced and considered based on the high-resolution numerical model of atmospheric circulation *WRF-ARW*. Typical distribution of the wind speed and temperature fields for these cases is given. It is shown that the main condition of bora occurring consists in stable stratification in the atmosphere low layer above the Kara Sea at the east and southeast winds. Blocking of an air flow on the windward eastern slope of the mountains is followed by arising of a strong near-surface wind – bora – on the western slope and in the coastal area of the Barents Sea. As a result, in case of a bora the air temperature above the Barents Sea exceeds significantly that above the Kara Sea on the same heights. At the west winds, a weakly stable atmospheric boundary layer above the Barents Sea does not constitute a considerable block (by mountains) for a running flow which is one of the basic conditions of bora arising. Thus, as for the west wind, the Novaya Zemlya is not a barrier separating the atmosphere lower layers between the Kara and Barents seas in winter.

Keywords: Novaya Zemlya, bora, atmospheric circulation model *WRF-ARW*, baroclinic flow, stability frequency.