

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НОВОЗЕМЕЛЬСКОЙ БОРЫ

В. С. Кошкина^{1,2}, А. В. Гавриков¹, Н. Д. Тилинина¹

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: gavr@sail.msk.ru;

²Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
Россия, 141701, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9,
e-mail: koshkina.vs@phystech.edu

В работе исследуется разновидность подветренной бури – новоземельская бора. Это малоизученное мезомасштабное явление, для которого характерно наличие высокой скорости ветра на западном склоне архипелага, угрожающее безопасности портовых строений и морской навигации. В работе предлагается подход для автоматической идентификации боры, что позволит составить климатическую картину этого явления и выявить его характерные особенности. Разработанный подход был применен к долговременным (2015–2023 гг.) данным высокоразрешающего численного моделирования, полученным с помощью атмосферной модели WRF, и к данным атмосферного реанализа ERA5. За девятилетний период было проанализировано около 220 бор, причем это сделано не только для всего архипелага (что характерно для большинства исследований), но и для отдельных регионов Новой Земли. Региональное разбиение показало различия в климатологической картине и в термодинамических характеристиках бор. Показано, что качественно климатические характеристики боры не зависят от пространственного разрешения. Это потенциально позволяет применить разработанный метод для идентификации бор на более долгопериодных данных, к примеру, на всем периоде реанализа ERA5. Однако на количественном уровне высокое разрешение ожидаемо показывает большую интенсивность и продолжительность явления.

Ключевые слова: новоземельская бора, подветренные бури, мезомасштабные процессы, автоматическая идентификация аномалий, климатология, Арктика, численное моделирование, WRF

Введение

Новая Земля (НЗ) – это протяженный архипелаг в Северном Ледовитом океане. Его длина в широтном направлении составляет 925 км, ширина – до 150 км, а высота в северной части до 1.5 км. Архипелаг находится в зоне интенсивных синоптических процессов, связанных как с циклонической активностью, так и с особенностью орографии. Стоит отметить, что Новая Земля служит разделом как водных, так и воздушных масс Карского и Баренцева морей.

Отличие гидрометеорологических условий Карского и Баренцева морей обусловлено различием в ледовой обстановке (Ефимов, Комаровская, 2018). Карское

море большую часть года покрыто льдом, что приводит к образованию холодной воздушной массы и термически устойчивого атмосферного пограничного слоя (АПС). В то время как Баренцево море снабжается теплыми водами Северо-Атлантического течения, что обеспечивает отсутствие льда большую часть года и наличие теплой воздушной массы с неустойчивым АПС. При восточном направлении фонового потока воздуха холодная воздушная масса Карского моря перетекает через хребет НЗ на поверхность сравнительно теплого Баренцева моря, что приводит к возникновению боры.

Бора – это мезомасштабное атмосферное явление, относящееся к классу подветренных бурь, которое характеризуется резким усилением холодного ветра в подветренной прибрежной зоне. Такие экстремальные явления часто представляют серьезную опасность для морской навигации, портовой инфраструктуры, нередко вызывают человеческие жертвы и значительный экономический ущерб.

Формирование подобных экстремальных явлений характерно для многих районов земного шара (Markowski, Richardson, 2010). Подробный обзор работ, посвященных катастрофическим ветрам типа боры, приведен в (Беданок и др., 2018). Существует более 25 регионов формирования подобных ветров, носящих разные местные названия: новороссийская (Гавриков, Иванов, 2015) и адриатическая бора (Grisogono et al., 2009), певекский южак (Дмитриев, 2024) и т. д.

Поскольку мезомасштабные экстремальные погодные явления носят локальный (местный) характер, они неудовлетворительно прогнозируются глобальными моделями и восстанавливаются реанализами, ввиду их грубого пространственного разрешения и гидростатической постановки моделирования. Поэтому большинство работ, посвященных новоземельской боре, основаны на высокоразрешающем моделировании (Шестакова, 2016; Ефимов, Комаровская, 2018; Ефимов, 2018).

Новоземельская бора является одной из наименее изученных. К первым работам можно отнести статью (Moore, 2013), где дается общий анализ статистики сильных ветров в Баренцевом море, а также отмечены увеличенные теплотери моря через поверхность в окрестности западного побережья НЗ, связанные с борой. Основными особенностями формирования новоземельской боры, отмеченными в серии работ (Ефимов, Комаровская, 2018; Ефимов, 2018; Шестакова, Моисеенко, 2018; Shestakova et al., 2020), являются: (а) значительный перепад температуры между приземным воздухом Карского и Баренцева морей (15 градусов и более), и (б) превалирование циркуляций синоптического масштаба, которые формируют устойчивый юго-восточный и восточный ветер. Однако, в работе (Ефимов, Комаровская, 2018) отмечено, что, в отличие от классических бор (например, новороссийской), для случая новоземельской боры падение температуры не является необходимым условием. Напротив, юго-восточный ветер, дующий с холодного побережья Карского моря, может приводить к нагреву воздуха над западным берегом НЗ. Кроме того, авторы отмечают, что основное условие развития боры – наличие устойчивой стратификации потока воздуха над наветренным склоном горного хребта (Ефимов, Комаровская, 2018; Ефимов и др., 2018). В работе (Ефимов, 2018) отмечено возникновение северо-восточного вдольберегового

течения на наветренном восточном склоне НЗ, которое возникает в результате блокирования потока, при перетекании холодной воздушной массы Карского моря.

На настоящий момент физический механизм, стоящий за формированием боры, однозначно не установлен. Тем не менее, существуют работы, предлагающие различные теории процессов формирования бор. Так, в работе (Шестакова, Моисеенко, 2018) предложено рассматривать ураганный ветер в районах Новороссийска, Певека и на Новой Земле как процесс обтекания гор в рамках модели гидравлического скачка. Также в литературе распространен волновой подход к описанию механизма возникновения подветренных бурь (Smith, 1979). В рамках волнового подхода, усиление ветра на подветренном склоне вызвано усилением внутренних гравитационных волн над препятствием (Klemp et al., 1975), а также с эффектами их обрушения (Lin, Wang, 1996; Peltier, Clark, 1983) и особенностями формы обтекаемого рельефа (Gohm et al., 2008).

Следует отметить, что предыдущие работы посвящены преимущественно анализу единичных событий боры на основе точечных данных метеонаблюдений (Шестакова, Моисеенко, 2018), данных дистанционного зондирования Земли или численного моделирования выбранного события (Гавриков, Иванов, 2015; Ефимов, Комаровская, 2018). Исследования единичных событий позволяют получить представление о характерных для боры параметрах. Так, в статье (Шестакова, Моисеенко, 2018) на основе рассмотренных частных эпизодов подветренных бурь выделены характерные особенности вертикальных полей скорости и температуры. В работе (Klemp, Durran, 1987) воспроизведена адриатическая бора и показано, что фундаментальную роль в процессе формирования ураганного ветра играет обрушение внутренних волн, критерием которого является число Фруда (Fr). В работе (Ефимов и др., 2018), посвященной новоземельской боре, в качестве основного критерия наличия события боры также используется значение числа Фруда ($Fr < 1$), что соответствует хорошо перемешанному критическому слою над подветренным склоном НЗ и блокированию потока воздуха на наветренном склоне. Вторым критерием является превышение скорости ветра эмпирически выбранной величины 10 м/с над наветренным склоном на высотах, сравнимых с высотой горы.

С точки зрения повышения безопасности навигации, значительный интерес представляет возможность заблаговременного прогноза экстремального явления. Чтобы продвинуться в этом направлении, необходима информация о большом количестве уже случившихся бор. Поэтому в настоящей работе мы отходим от исследования единичных случаев и предлагаем метод, позволяющий получить их общую климатическую картину. Выявление случаев боры вручную для продолжительного периода времени представляется избыточно трудоемким, поэтому в данной работе мы предлагаем автоматический метод на основе разработанного критерия. Этот метод позволит получить статистику повторяемости новоземельских бор, а также исследовать их общие физические свойства и механизмы возникновения. Целью данной работы является построение общей системы идентификации событий аномального ветра над Баренцевым морем (боры), а также построение климатологии новоземельских бор.

Данные

В работе использованы данные климатического (2015–2023 гг.) высокоразрешающего моделирования западного региона Арктики с помощью численной модели атмосферы WRF (Skamarock et al., 2019). Горизонтальное пространственное разрешение численного эксперимента составляет 6 км при 70 вертикальных уровнях, из которых 20 – в слое от поверхности до 1.5 км. Выходная продукция сохраняется каждый час. В качестве начальных данных выступает оперативный анализ GFS (National Centers for Environmental Prediction, 2015). Конфигурация модели была разработана с учетом холодного арктического региона. Так, в качестве микрофизических процессов использовалась подсеточная параметризация WSM6 (Hong, Lim, 2006), в которой учитывается 6 типов гидрометеоров. Для описания радиационных процессов в атмосфере – схема RRTMG (Iacono et al., 2008). Параметризации приземного и атмосферного пограничного слоя являются наиболее важными для данного региона. Поскольку мощность АПС в полярных широтах часто бывает очень низкой (вплоть до нескольких метров), то для их описания использовались локальные схемы MYNN (Olson et al., 2019). Ввиду высокого разрешения, параметризация конвективных процессов не использовалась.

В дополнение к данным высокоразрешающего моделирования в работе исследуется и современный атмосферный реанализ ERA5 (Hersbach, 2020), который предоставляет все необходимые метеорологические данные с интервалом 1 час на глобальной сетке с пространственным разрешением около 27 км.

Методы

Области исследования

Регионом исследования является западная часть Российской Арктики с центром над архипелагом Новая Земля. На рисунке 1 показаны два случая сильного прибрежного ветра: характерный случай новоземельской боры (рисунок 1а) и синоптическая ситуация сильного ветра при ее отсутствии (рисунок 1б) по данным численного моделирования WRF. В обоих случаях на фоне сильного ветра на западном побережье дополнительно присутствует и значительный горизонтальный температурный градиент, однако второй случай иллюстрирует ускорение ветра за счет прижатия потока со стороны Баренцева моря, в то время как для возникновения боры необходимо перетекание фонового потока через горный хребет (рисунок 1а). Поэтому при разработке критерия боры мы опирались только на направление и скорость приземного ветра в Карском море (как характеристика фонового потока) и на западном побережье (как характеристика интенсивности боры). Как говорилось во введении, к выводу о слабой связи температуры с новоземельской борой пришли и другие исследователи (Ефимов, Комаровская, 2018).

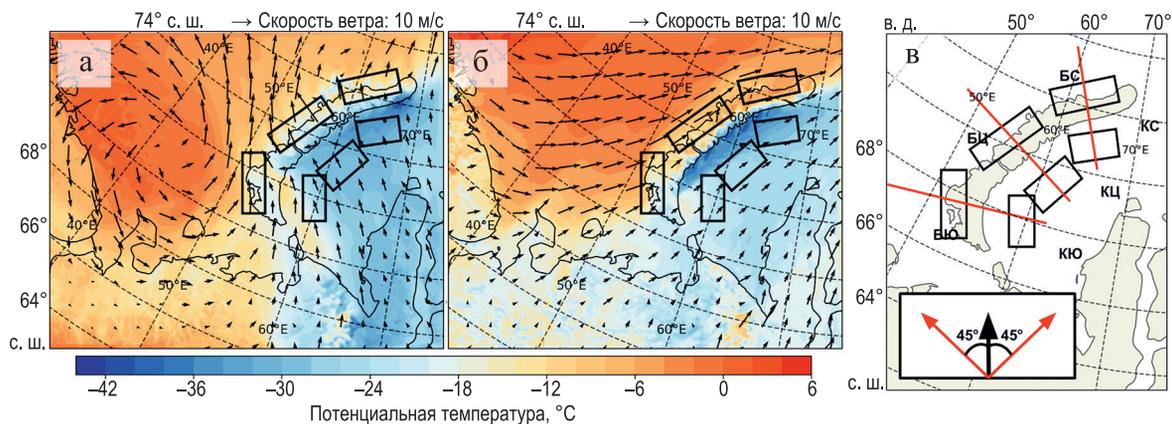


Рис. 1 – Пример синоптической ситуации с борой 15 февраля 2015 г. (а) и без боры 8 февраля 2015 г. (б). Заливкой показано распределение приземной температуры воздуха на 2 м, °С. Черные стрелки – скорость и направление ветра на 10 м. Схема областей исследования (в): черные области – регионы вычисления критерия боры; красные прямые – положение вертикальных профилей (см. ниже); на врезке внизу пример региона: черная стрелка – направление нормали к хребту, красные стрелки – предельные направления ветра при боре

Большая протяженность архипелага потенциально может привести к ситуации, когда бора возникнет только на каком-то участке НЗ. Чтобы это учесть, мы рассмотрели несколько подходов пространственной оценки. При *региональном подходе* три области Баренцева моря (на юге – БЮ, в центре – БЦ и на севере – БС на рисунке 1в) оценивались независимо, и каждая имела комплементарную область в Карском море (КЮ, КЦ и КС на рисунке 1в) для расчета фонового потока. *Общий подход* (классический) применялся для оценки боры на всем архипелаге в целом. Для этого три области в Карском море, как и три области в прибрежной зоне Баренцева моря, оценивались совместно.

Критерии наличия боры

Определяющей метрикой разработанного критерия служит скорость и направление приземного ветра (на высоте 10 м). Для наличия боры направление ветра должно лежать в диапазоне ± 45 градусов от нормали к хребту (врезка на рисунке 1в). Это условие должно выполняться на более чем 30 % площади региона. При постановке условия на модуль скорости ветра, вместо классического подхода с установкой абсолютного значения, мы требуем, чтобы медианная скорость на западном побережье НЗ превышала медианную скорость фонового потока в Карском море на 30 %, что позволяет более надежно определять бору вне зависимости от сезона и пространственного разрешения данных. В настоящей работе фоновой скоростью считается медиана приземной скорости ветра в домене Карского моря.

На рисунке 2 приведены ситуации из рисунка 1, но с увеличением над центральным регионом (БЦ–КЦ). Цветом показаны участки, где направление ветра

удовлетворило критерию. В обоих случаях медианная скорость ветра в западной части НЗ превышала фоновый поток более чем на 30 %, что формально удовлетворяет второму условию критерия. Однако, на рисунке 2б направление ветра не согласуется с основным условием. Таким образом, только случай на рисунке 2а определяется как бора.

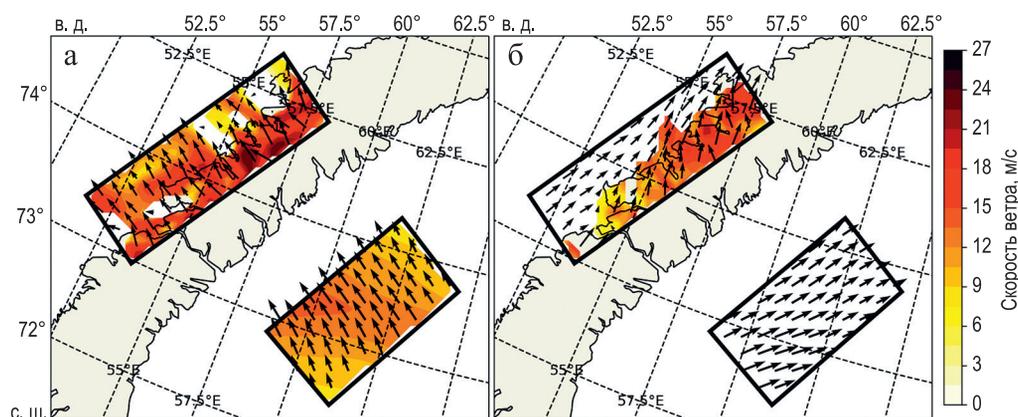


Рис. 2 – Пример двух случаев: наличие (а) и отсутствие (б) боры, согласно разработанному критерию. Стрелки – направление ветра, заливка – скорость ветра на 10 м. Заливка присутствует только там, где выполнилось условие направления ветра

На полученный результат дополнительно накладывается условие на продолжительность. Если критерий срабатывал непрерывно менее 24 часов, то такой случай отбрасывается. Также если между двумя борями существует перерыв менее 36 часов, то эти два явления объединяются. Последнее условие продиктовано синоптическими особенностями региона. Дело в том, что бора здесь часто бывает подавлена (но не остановлена) за счет прохождения мощного циклона, однако, затем быстро восстанавливается. Такие ситуации было решено учитывать, как один случай.

В рамках *регионального* подхода бора идентифицировалась независимо для каждой пары Баренцево море – Карское море (север, центр и юг: пары БС–КС, БЦ–КЦ и БЮ–КЮ на рисунке 1в). В случае общего подхода расчет критерия проводился по объединенным регионам Баренцева (БС, БЦ, БЮ) и Карского (КС, КЦ, КЮ) морей.

Разработанный критерий позволяет определить бору с использованием минимального количества пороговых значений для любого сезона и, потенциально, для любого пространственного разрешения.

Результаты

На рисунке 3 представлен пример работы критерия на данных WRF (а) и ERA5 (б) для одного из случаев боры в феврале 2022 г. Цветные блоки – это периоды действия боры, интенсивность цвета показывает 90-й перцентиль скорости ветра с шагом 1 час. Представленный пример является характерным случаем развития боры над

Новой Землей, когда бора начинается на севере архипелага и, постепенно ослабевая, опускается к его южной части. При этом, если рассматривать расчет критерия для региона в целом, то период боры захватывает все эти три стадии. Этот процесс хорошо отражен в данных WRF (рисунок 3а). Следует отметить, что в данных ERA5 бора также была зафиксирована, однако она началась на несколько суток позже, проявилась лишь в южном регионе и была менее интенсивной. Причиной такого отличия, по всей видимости, является более грубое разрешение и гидростатическая постановка численной модели реанализа. Низкое пространственное разрешение топографии региона в ERA5 препятствует моделированию мезомасштабных процессов (Ефимов, 2018), а гидростатическая постановка модели существенно ограничивает кататические процессы в принципе.

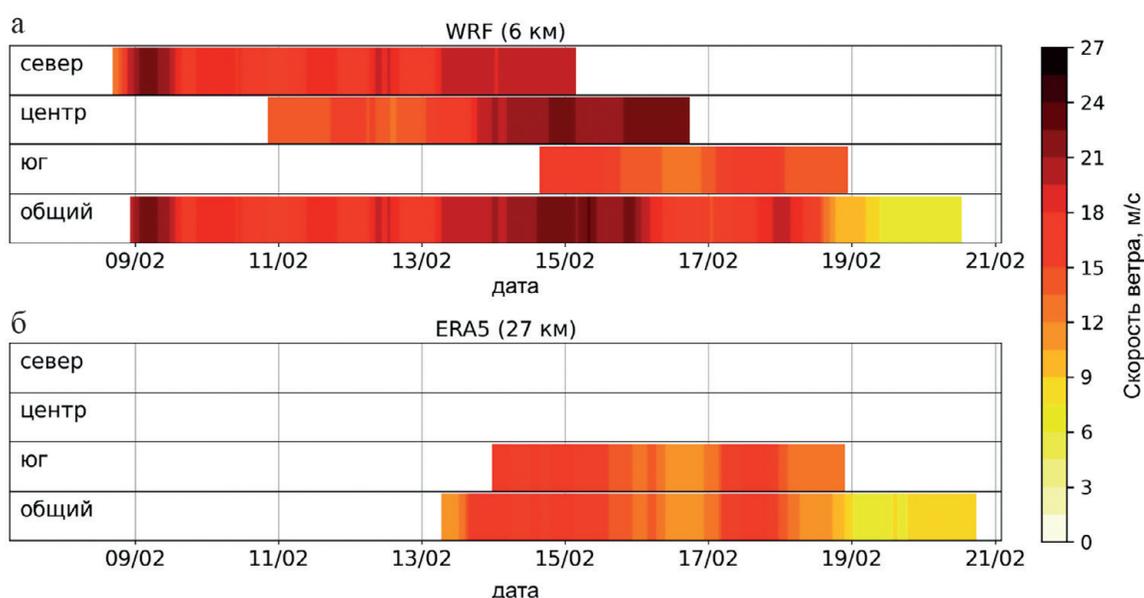


Рис. 3 – Пример работы автоматической идентификации боры в феврале 2022 г. по данным высокоразрешающего численного моделирования WRF (а) и реанализа ERA5 (б).

Цветные области – время действия боры согласно критерию, интенсивность цвета показывает 90-й перцентиль скорости ветра в регионе. Данные представлены для северного, центрального и южного регионов НЗ по отдельности и совместно для всего архипелага

В таблице 1 представлен совместный статистический анализ долгопериодных данных (2015–2023 гг.) WRF и реанализа ERA5. В среднем в год наблюдается порядка 25 эпизодов боры (или суммарно 98 суток) по данным WRF и 20 (суммарно 57 суток) по данным ERA5. Важно, что средняя продолжительность (2–3 суток) и повторяемость (2 в месяц) боры хорошо согласуется между WRF и ERA5. Температурная тенденция (разница потенциальной температуры между концом и началом боры) в Баренцевом море в среднем не превышает ± 2.5 градусов (не показано). Эти результаты хорошо согласуются с полученными ранее в работе (Shestakova et al., 2020). Среднегодовая интенсивность боры в WRF в 1.5 раза выше, чем в ERA5, а экстремальная (99-й перцентиль) продолжительность составляет 13.5 суток в WRF, против 8 суток в ERA5.

Табл. 1 – Статистика бор для всего архипелага, период 2015–2023 гг.

Показатели	WRF	ERA5
<i>Среднегодовые величины</i>		
Количество бор	25.1±2.3	19.8±2.3
Количество дней с борой	98.3±13.5	57.1±6.3
Среднемесячное количество бор	2.2±0.4	2.0±0.6
Продолжительность боры, сутки	3.0±3.1	2.3±1.7
Максимальная скорость ветра, м/с	22.9±5.8	14.8±3.3
<i>Экстремальные величины</i>		
Скорость ветра (99-й перцентиль), м/с	35.5	22.6
Продолжительность боры (99-й перцентиль), сутки	13.5	8.0

Таким образом, в данных реанализа выделяется меньше эпизодов боры в отдельных регионах, однако их совместное рассмотрение показывает хорошее качественное согласие с высокоразрешающим численным экспериментом WRF.

На рисунке 4а представлен среднегодовой сезонный ход скорости ветра по данным WRF (красная кривая) и по данным ERA5 (синяя кривая) за период боры. Столбцами показаны средние максимальные скорости за период боры.

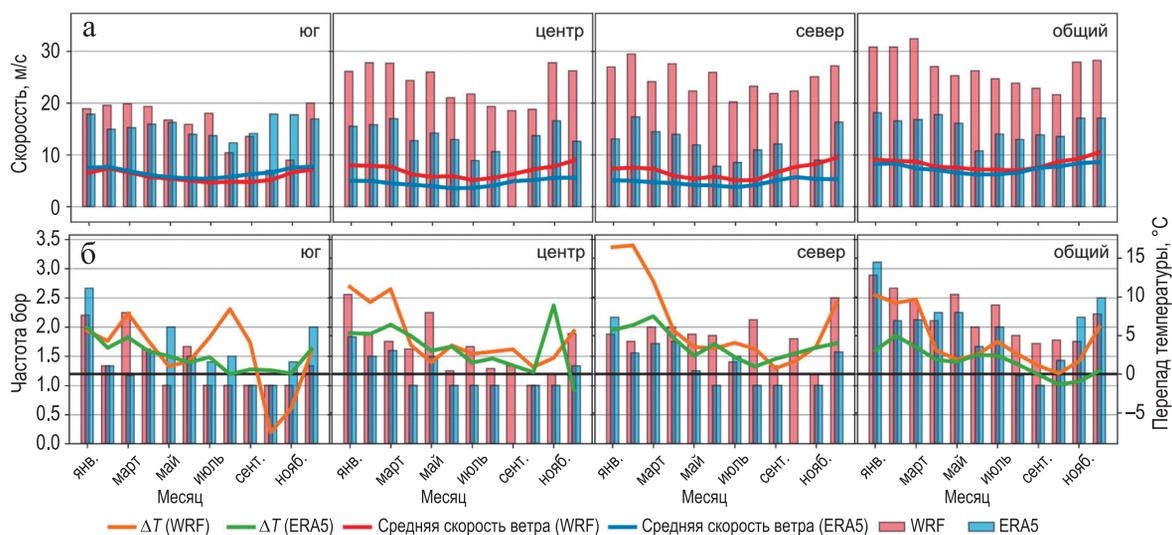


Рис. 4 – Сезонная статистика бор за период 2015–2023 гг. для южного, центрального и северного региона Новой Земли, а также всего архипелага в целом. Скорость ветра в боре (а): столбцы – среднегодовые значения максимальной скорости ветра по данным WRF (красный) и ERA5 (синий), кривые – среднеклиматическая скорость ветра по данным WRF (красный) и ERA5 (синий). Частота повторяемости бор (б): столбцы – данные WRF (красный) и ERA5 (синий), кривые – средний перепад потенциальной температуры между Баренцевым и Карским морем в момент наибольшей интенсивности боры по данным WRF (оранжевый) и ERA5 (зеленый)

Хорошо видно наличие годового хода, при котором минимальная интенсивность бор наблюдается летом и ранней осенью. В южном регионе (рисунок 4а, юг)

интенсивность боры между моделью и реанализом практически не отличается, что опять же связано с разрешением топографии: низкий и пологий рельеф (100–150 м) минимизирует отличия. Однако в центре, на севере и в общем для всего региона НЗ интенсивность боры в WRF существенно превышает ERA5.

Менее выраженный, но, тем не менее, присутствующий годовой ход частоты повторяемости бор показан на рисунке 4б. Ярче всего его можно наблюдать на общем случае (крайний правый рисунок), где хорошо виден максимум в зимние месяцы и минимум в начале осени. Следует обратить внимание на сезонный ход перепада потенциальной температуры (ΔT) между Баренцевым и Карским морями в момент наибольшей интенсивности боры. Почти во всех случаях (за исключением октября и ноября) Баренцево море теплее Карского, что согласуется с классическим представлением о механизмах возникновения и развития боры. Аналогично данным об интенсивности боры (рисунок 4а), в центре, на севере и в общем для всего региона НЗ перепад ΔT между Баренцевым и Карским морями в зимний сезон по данным WRF существенно превышает ERA5. Летом перепад температуры не столь ярко выражен.

Для более подробного изучения мезомасштабных особенностей новоземельской боры необходимы данные о вертикальном распределении основных термодинамических величин (скорость ветра и потенциальная температура). На рисунке 5 представлены вертикальные профили (см. рисунок 1в, красные прямые) на основе данных WRF в моменты максимального развития боры.

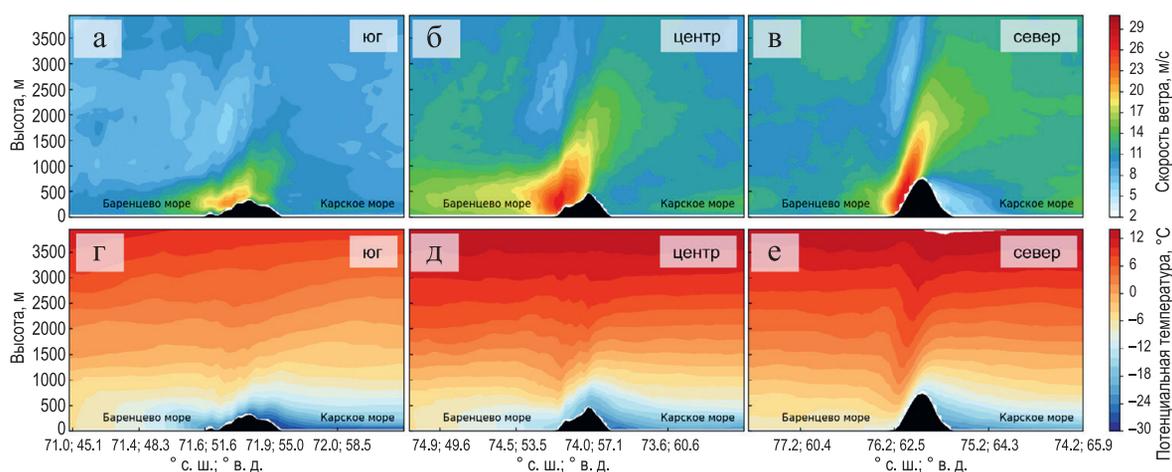


Рис. 5 – Среднее вертикальное распределение скорости ветра, м/с (а–в) и потенциальной температуры, °С (г–е) в момент наибольшей интенсивности боры для зимнего сезона по данным модели WRF

Для всех трех доменов характерно усиление скорости ветра на западном склоне Новой Земли (а–в), а также наличие инверсии скорости на высоте около 1.5 км. Наличие инверсии подтверждается и другими исследователями (Шестакова, Моисеенко, 2018). Ярче выделяется область блокирования холодного потока в Карском море для северной части НЗ (рисунки 5 в, е), где высота хребта существенно выше, чем

в центральной и южной частях архипелага. Следует заметить, что скорость ветра увеличивается вместе с увеличением высоты препятствия.

На средних вертикальных распределениях потенциальной температуры (рисунки 5 г–е) для всех регионов наблюдается перетекание холодного воздуха из Карского моря в Баренцево, что согласуется с классическим представлением о формировании боры.

На рисунке 6 приведены средние за 2015–2023 гг. поля приземной скорости ветра (а, в) и потенциальной температуры (б, г) для зимнего и летнего периодов в момент максимального развития боры. Хорошо видно, что наиболее интенсивными являются зимние боры (рисунок 6а), это объясняется большим температурным градиентом между теплым Баренцевым и холодным Карским морями (рисунок 6б). В то время как летом пространственное распределение температуры существенно более сглаженное (рисунок 6г), что приводит к снижению интенсивности приземного ветра на баренцевоморском побережье НЗ (рисунок 6в). Также можно заметить, что в южной части НЗ температурный градиент существенно слабее в обоих сезонах (рисунки 6 б, г), что, совместно с низким рельефом, объясняет меньшую интенсивность боры.

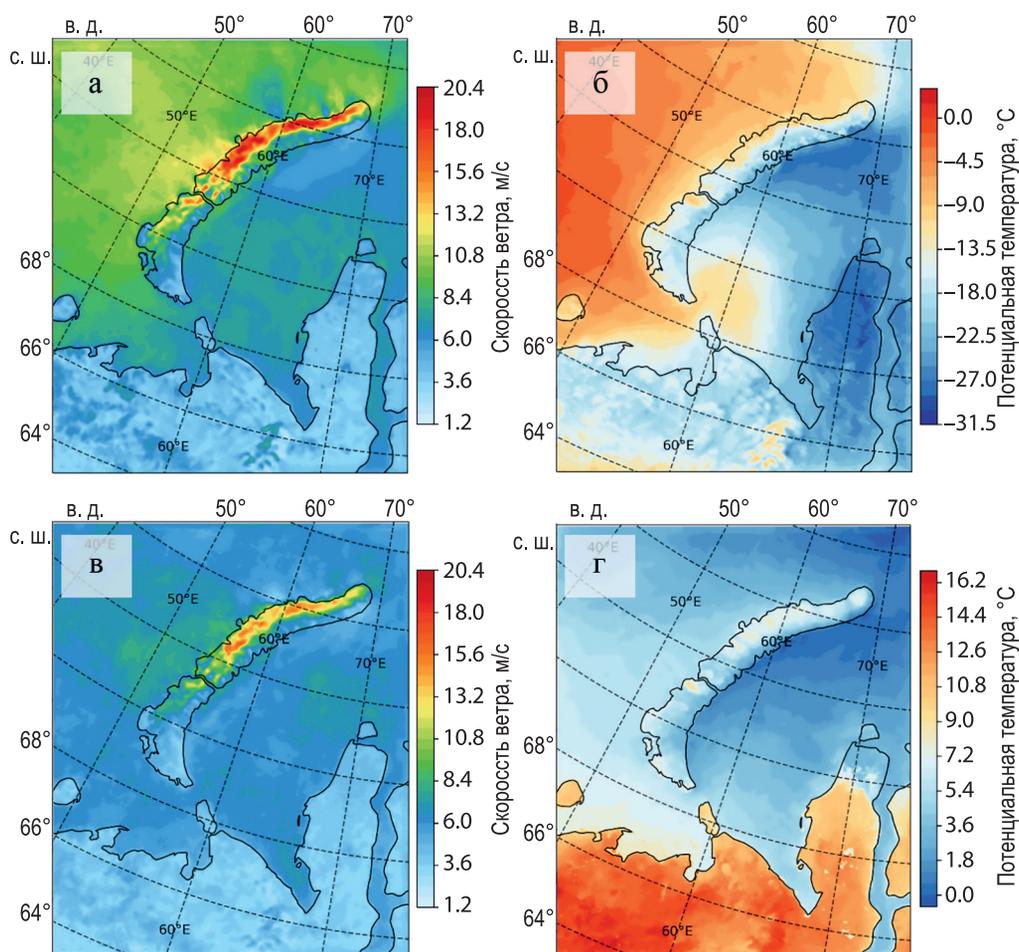


Рис. 6 – Средние горизонтальные распределения приземной скорости ветра (а, в) и потенциальной температуры (б, г) в момент наибольшей интенсивности боры для зимнего (а, б) и летнего (в, г) сезонов по данным WRF

Ниже показано сравнение зимних и летних горизонтальных композитов в моменты наибольшей интенсивности бор, полученных на основе данных WRF и ERA5. На рисунке 7 приведены разницы (WRF–ERA5) приземной скорости ветра (а, б). Наибольшие отличия приходятся на центральную и северную части хребта Новой Земли, достигая величин порядка 15 м/с. В этой области орография ERA5 сильнее всего отличается от орографии WRF (рисунок 7в). Таким образом, низкое разрешение ERA5 сглаживает и снижает высоту препятствия, что приводит к снижению интенсивности боры.

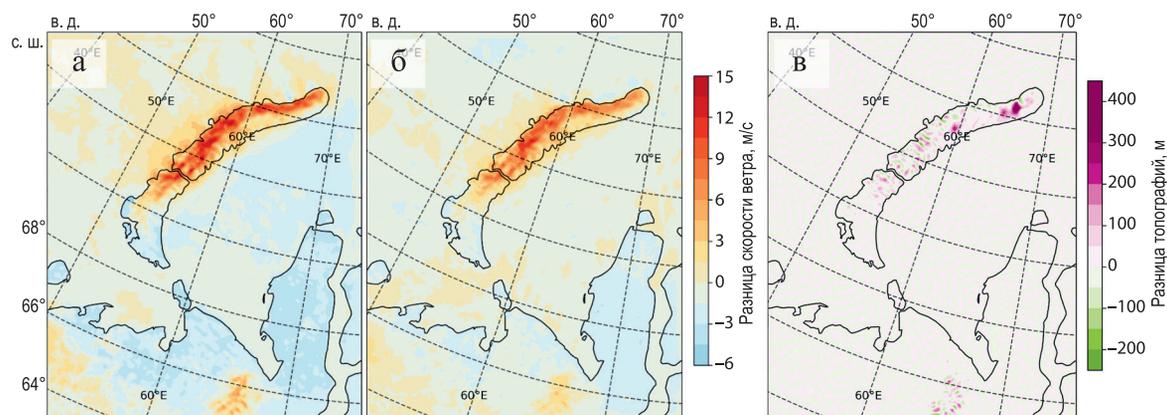


Рис. 7 – Разница (WRF–ERA5) приземной скорости ветра (а–б) в момент наибольшей интенсивности боры по данным WRF для зимнего (а) и летнего (б) сезонов; разница топографий (WRF–ERA5) (в)

Обсуждения и итоги

Был разработан и апробирован метод автоматической идентификации новоземельской боры, который не требует введения абсолютных величин как пороговых значений. В качестве ограничивающего условия используется отношение приземной скорости ветра у баренцевоморского побережья к скорости фоновому потоку и условие на направление фоновому потоку. Такая постановка позволяет применять критерий в любой сезон и на данных любого пространственного разрешения.

Разработанная методика была применена к данным исторического прогноза WRF (6 км) и к данным реанализа ERA5 (27 км). Условием выполнения критерия было превышение скорости ветра у берега над фоновым потоком на 30 %. Статистическое сравнение периода 2015–2023 гг. показало, что на *качественном* уровне пространственное разрешение данных не оказывает существенного влияния на идентификацию бор (количество и продолжительность бор имеют хорошее согласие). Это предоставляет потенциальную возможность использовать разработанный критерий для климатической оценки качественных характеристик (повторяемости, продолжительности и т. д.) для всего периода реанализа ERA5 (1940 – н. в.). Однако необходимо помнить, что *количественно* боры в WRF более интенсивные, чем в ERA5,

что связано с более высоким пространственным разрешением и негидростатической постановкой модели WRF.

Анализ бор для отдельных регионов показал, что южная часть НЗ выделяется существенно меньшей интенсивностью, что связано с низкой высотой хребта и более сглаженным температурным градиентом между западным и восточным побережьями.

Для построения климатологии новоземельских бор разумнее использовать критерий для всего района в целом. Это позволит использовать данные реанализов, которые имеют более грубое пространственное разрешение, но зато более продолжительный период.

Благодарности. Исследование было проведено в рамках госзадания № FMWE-2022-0002 (разработка методологии) и проекта РНФ 23-77-30001 (модельный эксперимент).

Список литературы

1. *Беданок М. К., Ямщиков А. А., Полежаев П. П.* Обзор работ, посвященных моделированию явлений обтекания неровностей поверхности земли и катастрофических ветров типа боры // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2018. № 3. С. 15–39.
2. *Гавриков А. В., Иванов А. Ю.* Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2015. № 51 (5). С. 615–615.
3. *Дмитриев А. А.* Певекский южак и борьба с ним. Litres, 2024.
4. *Ефимов В. В.* Новоземельская бора: механизмы формирования и сезонная изменчивость // Тезисы докл. на конф. 2018. С. 183.
5. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Новоземельская бора: анализ и численное моделирование // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2018. № 54 (1). С. 83–96.
6. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Сезонная изменчивость и гидродинамические режимы новоземельской боры // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2018. № 54 (6). С. 684–698.
7. *Шестакова А. А., Моисеенко К. Б.* Гидравлические режимы обтекания гор при сильных подветренных бурях: новороссийская и новоземельская бора и певекский южак // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2018. № 54 (4). С. 405–416.
8. *Шестакова А. А.* Новоземельская бора: подветренные характеристики и структура натекающего потока // Арктика и Антарктика. 2016. № 2. С. 86–98.
9. *Arthun M., Smedsrud L. H., Boning C. W., Richter J.* Dense water formation and circulation in the Barents Sea // Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2011. Vol. 58. No. 8. P. 801–817.
10. *Gohm A., Mayr G. J., Fix A., Gohm A.* On the onset of bora and the formation of rotors and jumps near a mountain gap // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2008. Vol. 134. No. 630. P. 21–46.
11. *Grisogono B., Belusic D.* A review of recent advances in understanding the meso- and micro-scale properties of the severe Bora wind // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2009. Vol. 61. No. 1. P. 1–16.

12. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Dee D.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
13. *Hong S., Lim J.* The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). 2006. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/WSM6-hong_and_lim_JKMS.pdf.
14. *Iacono M. J., Mlawer E. J., Clough S. A., Delamere J. S.* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2008. Vol. 113. No. 13. P. 2–9. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>.
15. *Klemp J. B., Durran D. R.* Numerical modelling of bora winds // Meteorology and Atmospheric Physics. 1987. Vol. 36. No. 1–4. P. 215–227.
16. *Klemp J. B., Lilly D. R.* The dynamics of wave-induced downslope winds // Journal of Atmospheric Sciences. 1975. Vol. 32. No. 2. P. 320–339.
17. *Lin Y. L., Wang T. A.* Flow regimes and transient dynamics of two-dimensional stratified flow over an isolated mountain ridge // Journal of the Atmospheric Sciences. 1996. Vol. 53. No. 1. P. 139–158.
18. *Markowski P., Richardson Y.* Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Royal Meteorological Society. 2010. Vol. 327.
19. *Moore G. W. K.* The Novaya Zemlya Bora and its impact on Barents Sea air-sea interaction // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. No. 13. P. 3462–3467.
20. National Centers for Environmental Prediction et al. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Boulder CO, 2015. <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>.
21. *Olson J. B., Kenyon J. S., Tao W. K., Dudhia J.* A Description of the MYNN-EDMF Scheme and the Coupling to Other Components in WRF-ARW. 2019. <https://doi.org/10.25923/N9WM-BE49>. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/19837>.
22. *Peltier W. R., Clark T. L.* Nonlinear mountain waves in two and three spatial dimensions // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1983. Vol. 109. No. 461. P. 527–548.
23. *Shestakova A. A., Toropov P. A., Matveeva T. A.* Climatology of extreme downslope windstorms in the Russian Arctic // Weather and Climate Extremes. 2020. Vol. 28. P. 100256.
24. *Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M. G., Huang X., Wang W., Powers J. G.* A description of the advanced research WRF version 4 // NCAR tech. note ncar/tn-556+ str. 2019. Vol. 145.
25. *Smith R. B.* The influence of mountains on the atmosphere // Advances in Geophysics. Elsevier. 1979. Vol. 21. P. 87–230.

Статья поступила в редакцию 31.05.2024, одобрена к печати 16.11.2024.

Для цитирования: Кошкина В. С., Гавриков А. В., Тилинина Н. Д. Автоматическая идентификация новоземельской боры // Океанологические исследования. 2024. № 52 (4). С. 74–89. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(4\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(4).5).

AUTOMATIC IDENTIFICATION OF THE NOVAYA ZEMLYA BORA WIND

V. S. Koshkina^{1,2}, A. V. Gavrikov¹, N. D. Tilinina¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: gavr@sail.msk.ru;

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9, Institutskiy pereulok, Dolgoprudny, 141701, Russia,
e-mail: koshkina.vs@phystech.edu

The paper examines a type of downslope windstorm – the Novaya Zemlya bora. This is a insufficiently studied mesoscale phenomenon characterized by the presence of high wind speeds on the western slope of the archipelago, threatening the safety of port buildings and maritime navigation. The paper proposes an approach for automatic identification of bora, which will allow to make a climatic picture of this phenomenon and to identify its characteristic features. The developed approach was applied to long-term (2015–2023) high-resolution numerical simulation data obtained using the WRF atmospheric model, and to lower-resolution data – atmospheric reanalysis ERA5. Over a 9-year period, about 220 bora events were analyzed, and this was done not only for the entire archipelago (which is typical for most studies), but also for individual regions of Novaya Zemlya. It was shown that the qualitative climatic characteristics of bora do not depend on spatial resolution, which potentially allows us to apply the developed method to identify the bora on longer time periods, for example, the entire period covered by the ERA5 reanalysis data. However, on a quantitative level, high resolution showed a greater intensity and duration of the phenomenon, as expected.

Keywords: Novaya Zemlya bora wind, downslope windstorm, mesoscale processes, automatic anomaly identification, climatology, Arctic, numerical modeling, WRF

Acknowledgement: The study was supported with FMWE-2022-0002 project (methodology development) and RSF 23-77-30001 project (model experiment).

References

1. Ārthun, M., L. H. Smedsrud, C. W. Böning, and J. Richter, 2011: Dense water formation and circulation in the Barents Sea. *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*, **58** (8), 801–817.
2. Bedanokov, M. K., A. A. Yamshchikov, and P. P. Polezhaev, 2018: Obzor rabot, posvyashchen-nykh modelirovaniyu yavleniy obtekaniya nerovnostey poverkhnosti zemli i katastrofiches-kikh vetrov tipa bory (Review of works on modeling phenomena of flow around surface irregularities and catastrophic bora winds). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya i geoekologiya*, **3**, 15–39.
3. Dmitriev, A. A., 2024: *Pevekskiy yuzhak i bor'ba s nim (Pevek windstorm and how to combat it)*. Litres.
4. Efimov, V. V., 2018: *Novozemel'skaya bora: mekhanizmy formirovaniya i sezonnaya izmenchivost' (Novaya Zemlya bora: formation mechanisms and seasonal variability)*, pp. 183.

5. Efimov, V. V. and O. I. Komarovskaya, 2018: Novozemel'skaya bora: analiz i chislennoye modelirovanie (Novaya Zemlya bora: analysis and numerical modeling). *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, **54** (1), 83–96.
6. Efimov, V. V. and O. I. Komarovskaya, 2018: Sezonnaya izmenchivost' i gidrodynamicheckiye rezhimy novozemel'skoy bory (Seasonal variability and hydrodynamic regimes of the Novaya Zemlya bora). *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, **54** (6), 684–698.
7. Gavrikov, A. V. and A. Yu. Ivanov, 2015: Anomal'no sil'naya bora na Chernom more: nablyudenie iz kosmosa i chislennoye modelirovanie (Abnormally strong bora on the Black Sea: satellite observations and numerical modeling). *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, **51** (5), 615–615.
8. Gohm, A., G. J. Mayr, A. Fix, and A. Gohm, 2008: On the onset of bora and the formation of rotors and jumps near a mountain gap. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **134** (630), 21–46.
9. Grisogono, B. and D. Belušić, 2009: A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe Bora wind. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **61** (1), 1–16.
10. Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, and D. Dee, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146** (730), 1999–2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>, eprint: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.3803>, <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.3803>.
11. Hong, S. and J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6), http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/WSM6-hong_and_lim_JKMS.pdf.
12. Iacono, M. J., E. J. Mlawer, S. A. Clough, and J. S. Delamere, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **113** (13), 2–9, ISSN: 01480227, <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>.
13. Klemp, J. B. and D. R. Durran, 1987: Numerical modelling of bora winds. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **36** (1–4), 215–227.
14. Klemp, J. B. and D. R. Lilly, 1975: The dynamics of wave-induced downslope winds. *Journal of Atmospheric Sciences*, **32** (2), 320–339.
15. Lin, Y. L. and T. A. Wang, 1996: Flow regimes and transient dynamics of two-dimensional stratified flow over an isolated mountain ridge. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **53** (1), 139–158.
16. Markowski, P. and Y. Richardson, 2010: Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. *Royal Meteorological Society*, 327.
17. Moore, G. W. K., 2013: The Novaya Zemlya Bora and its impact on Barents Sea air-sea interaction. *Geophysical Research Letters*, **40** (13), 3462–3467.
18. National Centers for Environmental Prediction et al., 2015: NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Boulder CO, <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>.
19. Olson, J. B., J. S. Kenyon, W. K. Tao, and J. Dudhia, 2019: *A Description of the MYNN-EDMF Scheme and the Coupling to Other Components in WRF-ARW*, <https://doi.org/10.25923/N9WM-BE49>. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/19837> (accessed on 30.04.2024).
20. Peltier, W. R. and T. L. Clark, 1983: Nonlinear mountain waves in two and three spatial dimensions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **109** (461), 527–548.
21. Shestakova, A. A., 2016: Novozemel'skaya bora: podvetrennyye kharakteristiki i struktura natekaushchego potoka (Novaya Zemlya bora: lee characteristics and structure of the incoming flow). *Arktika i Antarktika*, **2**, 86–98.

22. Shestakova, A. A. and K. B. Moiseenko, 2018: Gidravlicheskiye rezhimy obtekaniya gor pri sil'nykh podvetrennykh buryakh: novorossiyskaya i novozemel'skaya bora i pevekskiy yuzhak (Hydraulic regimes of mountain flow during strong lee storms: Novorossiysk and Novaya Zemlya bora and Pevek windstorm). *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, **54** (4), 405–416.
23. Shestakova, A. A., P. A. Toropov, and T. A. Matveeva, 2020: Climatology of extreme downslope windstorms in the Russian Arctic. *Weather and Climate Extremes*, **28**, p. 100256.
24. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2019: A description of the advanced research WRF version 4. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR*, 145.
25. Smith, R. B., 1979: The influence of mountains on the atmosphere. *Advances in Geophysics*, **21**, Elsevier, 87–230.

Submitted 31.05.2024, accepted 16.11.2024.

For citation: Koshkina, V. S., A. V. Gavrikov and N. D. Tilinina, 2024: Automatic identification of the Novaya Zemlya bora wind. *Journal of Oceanological Research*, **52** (4), 74–89, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR.2024.52\(4\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR.2024.52(4).5).