

Синоптические условия формирования новороссийской бора в современном климате

Н. Н. Соколихина*, Г. В. Суркова,

И. И. Леонов**

Разработана классификация условий образования новороссийской бора, основанная на данных о синоптических ситуациях, предшествующих возникновению явления и способствующих его развитию. Выделены азорский, североатлантический, сибирский и арктический классы новороссийской бора. Также разработан синоптико-климатический метод классификации случаев новороссийской бора, который заключается в переходе от анализа типовых схем синоптических процессов к анализу непосредственно полей приземного давления и геопотенциала, характеризующих каждый синоптический класс новороссийской бора. Использование этого метода позволило привлечь для прогноза новороссийской бора данные моделирования полей давления, которые воспроизводятся значительно лучше, чем поля ветра; не только выделить случаи новороссийской бора, но и определить их классы на продолжительном временном периоде с 1979 г. по настоящее время; составить прогноз повторяемости новороссийской бора в XXI в. Было установлено, что в периоды потепления климата увеличится число ситуаций новороссийской бора сибирского класса, на фоне которого чаще наблюдается бора фронтального и муссонного типов, относящихся к самым экстремальным по своим метеорологическим характеристикам и последствиям.

Ключевые слова: новороссийская бора, синоптические условия, климатический прогноз, численное моделирование, опасные явления.

DOI: 10.52002/0130-2906-2024-11-108-115

Введение

Новороссийская бора (НБ) представляет собой сильный порывистый ветер, направленный вниз по горным склонам к морю в районе от Анапы до Туапсе и приносящий в зимнее время быстрое и резкое похолодание. В Новороссийске бора проявляется сильнее всего, в среднем за год фиксируется более 30—40 дней с борой, максимум их повторяемости отмечается в ноябре — марте [6, 8—10]. Порывы ветра при боре могут превышать 40—50 м/с, при наступлении бора быстрое падение температуры воздуха в течение нескольких часов нередко сопровождается образованием мощ-

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; e-mail: natalia.sokolikhina@gmail.com (Соколихина Наталья Николаевна).

**АО “Россети научно-технический центр”, Управление ГИС-систем и климатических воздействий.

ных гололедных отложений на береговых объектах и морских судах, иногда приводя к их разрушению и затоплению и к значительному ущербу экономике и хозяйству региона. Сочетание сильного и продолжительного холодного ветра, высокой влажности воздуха, резкого падения температуры создает крайне некомфортные условия для населения и окружающей среды, иногда приводя к необратимым потерям. В связи с этим, несмотря на локальный характер явления, изучение боры остается актуальным как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, позволяя установить закономерности многолетней динамики повторяемости больших скоростей ветра, характерных для боры, и приблизиться к пониманию роли изменения климата в этих процессах. Климатический прогноз новороссийской боры имеет и практическое значение, поскольку полученная в результате прогноза информация о боре позволит оценить ветровое воздействие и последствия боры и при необходимости заблаговременно принять меры, направленные на смягчение возможного ущерба.

Исследование новороссийской боры активизировалось в конце XIX в. Так, Н. А. Коростелев на основе анализа данных за период с 1891 по 1900 г. установил важную закономерность: бора наступает, "...когда внутри страны давление воздуха быстро растет, образуя барометрический максимум, и таким образом появляется сильное падение давления по направлению к морю, где постоянно существуют благоприятные условия для возникновения барометрических минимумов" [7]. То есть он впервые сделал вывод, что бора главным образом формируется при определенном типе крупномасштабной циркуляции при наличии благоприятствующих для ее развития местных факторов.

Подробная и часто используемая до настоящего времени генетическая классификация новороссийской боры была представлена в работах А. М. Гусева и коллег [8] на основе данных наблюдений с 1891 по 1900 г. и с 1952 по 1954 г. Согласно этой классификации выделяются четыре типа НБ: стоковая, внутримассовая, муссонная, фронтальная. Для явного учета крупномасштабных атмосферных процессов и их типа Е. К. Семеновым и коллегами [10] была разработана синоптическая классификация, не противоречащая генетической, но дополняющая ее с точки зрения особенностей общей циркуляции атмосферы и взаимного расположения барических образований в приземном слое и нижних слоях атмосферы. Согласно классификации Е. К. Семенова и коллег выделяются следующие синоптические типы НБ: азорский, североатлантический, сибирский, арктический. Для выделения типов НБ применялись и другие подходы, использующие методы кластерного анализа, примененного к полям приземного давления. Например, в работах В. В. Ефимова с соавторами [6] были выделены два вида конфигурации поля приземного давления для случаев НБ. Другие авторы в основном уделяли внимание анализу отдельных случаев и их моделированию на ограниченной территории [12, 13].

Новизна настоящей работы состоит в установлении связи синоптических ситуаций и конфигурации крупномасштабного барического поля с возникновением НБ за длительный период, что позволяет оценить тенденции ее повторяемости. Если в работе [10] для составления синоптической классификации НБ рассматривался десятилетний период 1998—2007 гг.,

то здесь для многолетнего климатического анализа привлечены данные реанализа ERA-Interim о приземном давлении и геопотенциальной высоте изобарической поверхности 850 гПа за холодный период (октябрь — апрель) с 1979 по 2015 г.

Цель работы — исследование средних многолетних особенностей повторяемости случаев различных типов НБ по синоптической классификации на фоне современных и прогнозируемых изменений климата по данным наблюдений и моделирования на основе типизации крупномасштабных атмосферных процессов.

Материалы и методы исследований

Оценка вероятности возникновения опасного явления и изучение его дальнейшей динамики требуют знания физических условий, благоприятных для развития этого явления, присущей ему структуры и жизненного цикла, а также местных особенностей, влияющих на его эволюцию. В особенности это относится к явлениям, математическое моделирование которых на данном этапе развития науки затруднено. Иначе говоря, “надо создать концептуальную модель явления, знание которой вселяет в прогнозиста уверенность в отношении необходимости внесения тех или иных изменений в прогностическую продукцию модели” [2].

Уникальность синоптической классификации — в комплексном подходе, используемом для понимания сущности крупномасштабных атмосферных процессов, способствующих формированию новороссийской боры. Синоптическая классификация продолжает и усиливает в деталях генетическую классификацию В. М. Гусева и коллег [8].

Для многолетней синоптической систематизации случаев новороссийской боры в период 1979—2015 гг. использовались: 1) синоптическая классификация случаев НБ для холодного времени года (ноябрь — апрель) [10] для периода 1998—2007 гг. (95 случаев НБ) по данным приземных, аэрологических, спутниковых и радиолокационных наблюдений; 2) результаты глобального реанализа ERA-Interim; 3) выполненные в ходе работы численные эксперименты с мезомасштабной моделью WRF-ARW для отдельных случаев новороссийской боры [4—6, 8, 13—15]. Совокупность различных данных позволила перейти к концептуальной синоптической модели новороссийской боры [2, 10].

Несмотря на то что, согласно шкале Бофорта, штормовым называют ветер, скорость которого на высоте 10 м над поверхностью превышает 20,8 м/с, в этой работе борой (при соответствии прочих характеристик) мы будем называть ветер, скорость которого достигла 10 м/с и более. Такое пороговое значение было получено в работе [10], где были разработаны количественные критерии выделения боры: барическая тенденция, приземное давление, температура воздуха, скорость ветра и осадки. Каждый случай боры за период 1998—2007 гг. был сначала отнесен авторами к одному из генетических типов [8] и далее — к одному из типов по синоптической классификации на основе количественных критериев, предложенных в работе [10].

Для того чтобы получить представление о многолетних изменениях повторяемости случаев новороссийской боры, были использованы данные

реанализа ERA-Interim [16] об атмосферном давлении на уровне моря и о значениях геопотенциальной высоты на уровне 850 гПа за период 1979—2015 гг. по территории 40—70 с. ш., 10—60 в. д. с горизонтальным пространственным разрешением 0,75° 0,75° за холодный период (октябрь — апрель) с 1979 по 2015 г. Отдельно рассматривался временной срез с 1998 по 2007 г., в связи с тем, что он соответствует календарю новороссийской боры из работы [10], в котором было выделено 95 случаев боры.

На основе полученной 36-летней выборки был произведен расчет средних значений обоих показателей: атмосферного давления на уровне моря и геопотенциальной высоты изобарической поверхности 850 гПа. Дополнительно для большей наглядности рассчитывались отклонения от среднего многолетнего (1981—2015 гг.) давления и геопотенциала для каждого класса.

Для климатического прогноза новороссийской боры на период 2016—2100 гг. была использована модель земной климатической системы (INMCM 4), разработанная в Институте вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук [3]. Расчет повторяемости различных синоптических классов новороссийской боры выполнен на основе результатов численных экспериментов в рамках программы Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 (CMIP5). Преимущество модели INMCM 4 в том, что она является одной из лучших среди ансамбля моделей CMIP5 с точки зрения воспроизведения поля атмосферного давления в Северном полушарии. Расчеты выполнялись для результатов эксперимента CMIP5 [18] по сценарию RCP8.5 [17]. Поле атмосферного давления для каждого модельного дня сопоставлялось с полем-композитом определенного синоптического класса боры. Для сопоставления рассчитывалась пространственная корреляция этих двух полей. В случае, если коэффициент корреляции был выше 0,95, считалось, что в этот день пространственная структура поля давления благоприятна для развития боры. Выбор значения 0,95 в качестве показателя близости полей, основанный на предварительных оценочных расчетах для современного климата, показал хорошее сходство повторяемости случаев с борой по данным реанализа и модели.

Результаты и обсуждение

Результаты получены на основе синоптической классификации НБ Е. К. Семенова и коллег, примененной для более продолжительного по сравнению с работой [10] временного периода 1979—2015 гг. Это дает большее, чем ранее, основание для формирования многолетней климатической картины синоптических особенностей при развитии НБ.

Анализ рассчитанных при выполнении данной работы композитных полей атмосферного давления на уровне моря по типам, выделенным в синоптической классификации, показал, что для азорского типа характерно наличие над центральной частью Европы вытянутой субширотной области повышенного атмосферного давления (около 1025 гПа в центре). Разница давления с Новороссийском, который находится в этом случае в барической седловине, составляет около 6—8 гПа. Над севером европейской части России и Скандинавией наблюдается обширная область низкого давле-

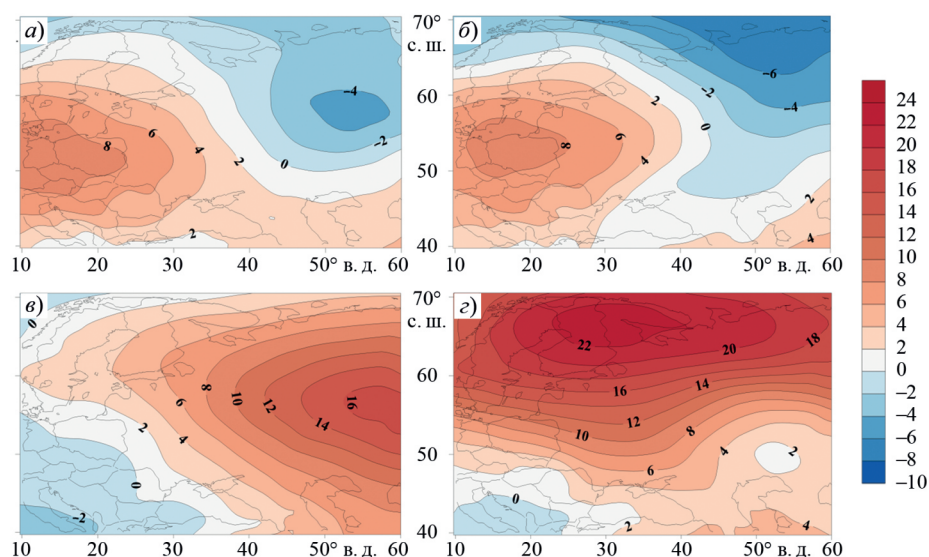
ния. На карте отклонений приземного давления от среднеклиматических для выбранной территории (рисунок *а*) положительный максимум отмечается над Германией и Чехией.

Похожая картина наблюдается в распределении осредненного поля приземного давления, формирующего НБ североатлантического типа. Область высокого давления в этом случае также располагается над центром Европы, однако давление в центре ниже, чем при азорском классе, и отклонения давления от средних климатических значений меньше (рисунок *б*).

В случае с борой сибирского класса в среднем центр крупного антициклона располагается над южной частью Уральских гор (с давлением больше 1034 гПа), отрог которого занимает почти всю европейскую часть России. Эта ситуация сохраняется и на уровне 850 гПа. И самое главное отличие от первых двух классов — положительные аномалии, находящиеся на востоке рассматриваемой территории, почти в 2 раза больше (рисунок *в*).

Антициклон, сопровождающий новороссийскую бору арктического класса, располагается над Баренцевым и Карским морями. По мощности он самый сильный. Положительные аномалии давления занимают больше половины исследуемой территории с максимальными значениями на севере (рисунок *г*).

Использование синоптико-климатического подхода позволило получить данные о повторяемости новороссийской боры в целом и каждого типа в отдельности. Интересно отметить, что в период с 2008 по 2015 г. по данным реанализа произошло увеличение (почти в 2 раза!) числа случаев боры сибирского класса по сравнению с периодом 1998—2007 гг. и уменьшилось число случаев НБ азорского и североатлантического классов, хотя общее число случаев НБ почти не изменилось (рисунок не приводится).



Карты-композиции отклонения приземного давления от средних многолетних (1979—2015 гг.) значений для разных классов новороссийской боры: *а*) азорский; *б*) североатлантический; *в*) сибирский; *г*) арктический класс.

Ранее [10] при сопоставлении синоптической и генетической [8] классификаций было установлено, что самая сильная бора по генетической классификации — фронтального и муссонного типов [8] — чаще наблюдается при сибирском или арктическом классах синоптической классификации. Это дополняет результаты, представленные в работе [6], где также отмечается преобладание боры фронтального типа в холодный период.

Фронтальный тип боры [10] характеризуется большими значениями барической тенденции (до -4 гПа за последние три часа), низким давлением в месте наблюдения (не более 1015 гПа), резким понижением температуры и выпадением осадков. Скорость ветра при таком типе боры может достигать $20\text{—}35 \text{ м/с}$. Фронтальная бора никогда не локализуется только у Новороссийска. Она всегда захватывает значительный участок побережья и может продолжаться до десяти дней. Муссонный тип боры сопровождается значительным горизонтальным температурным контрастом, который в районе северного побережья Черного моря увеличивается, происходит резкое понижение температуры (до $-10\text{...}-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$), а скорость ветра достигает 40 м/с ! При этом муссонная бора может длиться от трех до одиннадцати дней, т. е. такой тип боры — самый продолжительный [10].

В качестве примера структуры крупномасштабного барического поля при новороссийской боре и ее эволюции рассмотрим один из ярких случаев боры XXI в. Такой синоптический подход позволит понять характерные черты крупномасштабного барического поля до, во время и после боры, что может помочь в прогнозировании явления.

Зимой 2012 г. наблюдалась новороссийская бора фронтального типа на фоне синоптической ситуации сибирского класса. Изучение этого эпизода и его моделирование в частности выполнялось в разных научных группах [1, 6, 12]. Во время этой боры на юге Европейской России на побережье Черного моря сильные морозы сопровождалось усилением северо-восточного ветра в период с 25 января по 10 февраля. В Краснодарском крае (Керченский пролив) 27—28 января при скорости ветра до 26 м/с и в Новороссийске 27 января при ураганном ветре 38 м/с происходило парение моря и быстрое обледенение судов. В Керченском проливе 7—8 февраля скорость ветра достигала $26\text{—}29 \text{ м/с}$, в Новороссийске — $33\text{—}44 \text{ м/с}$, в Геленджике — $32\text{—}39 \text{ м/с}$. Ураганные и близкие к ним скорости ветра привели к массовым отключениям электроэнергии, повреждению крыш и зданий, повалу деревьев, был введен режим чрезвычайной ситуации (<https://meteoinfo.ru/novosti/8520-28012014>).

Формирование такой сильной боры в январе 2012 г. было связано с крупномасштабной перестройкой атмосферной циркуляции, приведшей к формированию аномально теплой погоды в Русской Арктике и исключительных холодов на юге Европы (подробно эта ситуация рассмотрена в работе [11]).

Эта крупномасштабная перестройка была вызвана смещением отрога сибирского антициклона на юг Урала и Нижнюю Волгу, где он к середине января 2012 г. образовал самостоятельный центр с максимальным давлением $1055\text{—}1058 \text{ гПа}$. В результате создались благоприятные условия для интенсивной адвекции теплого воздуха из Западной Европы и Атлантического океана в центральную область Арктического бассейна. По южной периферии этого антициклона усилился восточный перенос холодного воз-

духа из Сибири и Северного Казахстана, что в итоге привело к формированию высоких холодных циклонов над Северным Каспием.

В то же время над Турцией появился второй холодный высокий циклон, который еще больше усилил адвекцию континентального воздуха из Сибири в район Черного моря и на Балканы. Это является ярким примером того, как на фоне синоптических процессов сибирского класса развивается новороссийская бора фронтального типа.

Как говорилось выше, с использованием результатов модели INMCM 4 был составлен климатический прогноз повторяемости новороссийской боры в XXI в. как для общего числа эпизодов, так и с разделением их на синоптические типы. Для выявления эпизодов боры были использованы поля атмосферного давления на уровне моря, которые с хорошей точностью воспроизводятся климатическими моделями. На предварительной стадии этой части работы выделялись поля атмосферного давления модели INMCM 4, которые соответствовали синоптическим классам, благоприятным для развития новороссийской боры [10]. Проверка показала, что пространственная конфигурация поля давления может быть использована как признак возможности развития НБ.

По результатам этапа климатического прогноза можно сделать следующие выводы. В процессе потепления в XXI в. ожидается увеличение общего числа ситуаций с НБ (на 9% по сравнению с 1979—2015 гг.). Более подробный анализ по двадцатилетиям показал, что наиболее заметный рост общего числа НБ (26%) отмечается в 2021—2040 и 2041—2060 гг. (14%), к концу XXI в. произойдет возвращение к современным средним значениям. Модельные расчеты отдельных типов синоптических ситуаций, при которых возникает НБ, показывают, что наибольшие изменения (на 50%) относятся к североатлантическому типу, повторяемость азорского типа незначительно уменьшается (на 7%), для арктического типа она остается близкой к современной, а повторяемость сибирского типа увеличивается на 18%. Это связано с тем, что на фоне потепления климата самые большие изменения наблюдаются в Арктике (повышение температуры), что благоприятствует усилению антициклонов на севере и северо-востоке Европейской части России.

Выводы

Использование синоптико-климатического метода позволило не только выделить случаи новороссийской боры, но и определить их синоптические типы для периода с 1979 по 2015 г.; привлечь для климатического многолетнего прогноза повторяемости случаев новороссийской боры данные моделирования полей давления до конца XXI в.; составить прогноз повторяемости новороссийской боры в XXI в. в целом и по отдельным синоптическим типам.

Установлено, что в период потепления климата в XXI в. на фоне увеличения среднего числа эпизодов боры на 9% вырастет число ситуаций североатлантического типа (на 50%), уменьшится повторяемость случаев боры азорского типа (на 7%) и увеличивается повторяемость боры сибирского типа (на 18%), при котором особенно часто наблюдаются случаи НБ фронтального и муссонного типа, относящиеся к самым экстремальным по своим метеорологическим характеристикам и последствиям.

Авторы искренне признательны профессору Е. К. Семенову, одному из главных разработчиков представленной в статье синоптико-климатической классификации новороссийской боры, нашему Учителю.

Работа выполнена в рамках государственного задания кафедры метеорологии и климатологии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова № 121051400081-7 (“Погодные и климатические процессы различных пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного воздействия”).

Литература

1. Блинов Д. В., Перов В. Л., Песков Б. Е., Ривин Г. С. Экстремальная бора 7—8 февраля 2012 г. в районе г. Новороссийск и ее прогноз по модели COSMO-Ru. — Вестник МГУ. Сер. 5. География, 2013, № 4, с. 36—43.
2. Васильев А. А., Вильфанд Р. М., Голубев А. Д. Совместное использование численных мезомасштабных и концептуальных моделей при оперативном прогнозе опасных явлений погоды. — Труды Гидрометцентра России, 2016, вып. 359, с. 48—57.
3. Володин Е. М., Дианский Н. А., Гусев А. В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX—XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2013, т. 49, № 4, с. 379—400.
4. Гавриков А. В., Иванов А. Ю. Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, т. 51, № 5, с. 615—626; doi: 10.7868/S0002351515050053.
5. Ефимов В. В., Барабанов В. С. Моделирование новороссийской боры. — Метеорология и гидрология, 2013, № 3, с. 171—176.
6. Ефимов В. В., Комаровская О. И., Баянкина Т. М. Временные характеристики и синоптические условия образования экстремальной новороссийской боры. — Морской-гидрофизический журнал, 2019, т. 35, № 5, с. 409—422; doi: 10.22449/0233-7584-2019-5-409-422.
7. Коростелев Н. А. Новороссийская бора. (Доложено в заседании Физ.-мат. отд-я 5 марта 1903 г.). — СПб, Академия наук, 1904, 135 с.
8. Новороссийская бора. /Отв. ред. А. М. Гусев. — Труды Морского гидрофизического института АН СССР, 1959, т. 14, 140 с.
9. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. /Под ред. А. И. Бедрицкого. — СПб, Летний сад, 2008.
10. Семенов Е. К., Соколихина Н. Н., Соколихина Е. В. Синоптические условия формирования и развития новороссийской боры. — Метеорология и гидрология, 2013, № 10, с. 16—28.
11. Семенов Е. К., Соколихина Н. Н., Тудрий К. О., Щенин М. В. Синоптические механизмы потепления в Арктике. — Метеорология и гидрология, 2015, № 9, с. 20—30.
12. Торопов П. А., Мысленков С. А., Самсонов Т. Е. Численное моделирование новороссийской боры и связанного с ней ветрового волнения. — Вестник МГУ. Сер. 5. География, 2013, № 2, с. 38—46.
13. Шестакова А. А., Моисеенко К. Б., Торопов П. А. Гидродинамические аспекты эпизодов новороссийской боры 2012—2013 гг. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, т. 51, № 5, с. 602—614.
14. Яровая Д. А., Ефимов В. В. Численное моделирование взаимодействия новороссийской боры и верхнего слоя Черного моря. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2023, т. 20, № 2, с. 262—272; doi: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-262-272.
15. Arkhipkin V., Sokolikhina N., Semenov E., and Sokolikhina E. The bora forecast on the Black Sea coast of Russia. /In: 12th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST, 2015, vol. 2, pp. 781—788.
16. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2020, vol. 146, No. 730, pp. 1999—2049.
17. Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G. A., Mitchell J. F. B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J., Thomson A. M., Weyant J. P., and Wilbanks T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. — Nature, 2010, vol. 463, pp. 747—756; doi: 10.1038/nature08823.
18. Taylor K. E., Stouffer R. J., and Meehl G. A. The CMIP5 experiment design. — Bull. Amer. Meteorol. Soc., 2012, vol. 93, pp. 485—498.

Поступила в редакцию 25 IX 2023 г., после доработки 21 XI 2023 г., принята к публикации 27 XI 2023 г.