

Бризовая циркуляция в атмосфере Крымского региона

© 2015 В.В. Ефимов, О.И. Комаровская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

E-mail: vefim.38@mail.ru

Поступила в редакцию 27.05.2015 г.

Выполнено моделирование атмосферной циркуляции в Крымском регионе в летний период года с использованием численной модели *WRF-ARW* с целью выделения вклада бризовой составляющей скорости ветра. В предположении о суточной квазипериодичности бриза вычислены скорости дневного и ночного бризов в целом для всего региона и более детально для нескольких районов Крыма. Выделены особенности формирования дневного и ночного бризов в этих районах. Наличие прибрежных гор и очертания берега создают характерные особенности развития бриза.

Ключевые слова: бриз, численное моделирование, атмосферная циркуляция, Крымский регион.

Введение. Известно, что в атмосферном пограничном слое Черноморского региона с его сложной орографией, неоднородностями подстилающей поверхности, тепловыми контрастами суша – море развивается широкий спектр мезомасштабных процессов. К ним относятся бризовая циркуляция, различного рода горные ветры в прибрежных районах моря, такие как бора, мезомасштабные вихри и некоторые другие. В то же время их пространственно-временная структура до настоящего времени изучена плохо.

Характерной особенностью атмосферных процессов в регионе в весенне-летний период является бризовая циркуляция, связанная с суточным циклом тепловых контрастов между морем и сушей. Меньшая теплоемкость суши по сравнению с морем вызывает ее более быстрый радиационный нагрев в дневное время суток и соответственно увеличение градиентов температуры и давления в атмосфере между сушей и прилегающим морем. В общем, дневной бриз представляет собой гравитационное течение холодного морского воздуха, распространяющегося на сушу. В передней части этого течения формируется приподнятая «голова» бриза с восходящим потоком воздуха. Это гравитационное течение над сушей занимает нижнюю часть атмосферного пограничного слоя, выше него образуется обратная ячейка бризовой циркуляции, менее локализованная по высоте. Граница раздела между прямой и обратной ячейками может быть неустойчивой, что ведет к возникновению колебаний типа Кельвина – Гельмгольца. Морской бриз распространяется на сушу на расстояние 50 – 100 км. К концу светового дня гравитационное течение затухает. При этом сформировавшаяся «голова» бриза может генерировать распространяющийся далее на сушу на расстояние 200 – 300 км внутренний бор (уединенную внутреннюю волну). В процессе дневного прогрева в области бризового течения над сушей устанавливается хорошо развитая конвекция. В отличие от дневного противоположный ему ночной бриз, вызванный боль-

шим радиационным охлаждением суши по сравнению с морем, развивается слабее. Эта асимметрия связана с рядом причин, и в первую очередь, с меньшим ночным температурным контрастом между сушей и морем по сравнению с дневным.

Бризовая циркуляция оказывает значительное влияние на формирование климата прибрежных регионов. Морской бриз является основным механизмом вентиляции воздуха над большими приморскими городами, а также основным источником увлажнения и охлаждения воздуха днем в прибрежных областях суши со средиземноморским или тропическим климатом. Бриз также влияет на работу ветрогенераторов, располагаемых в прибрежных районах моря.

В последние 10 – 20 лет бризовая циркуляция активно изучается (см. обзорные работы [1, 2]). Например, число работ по исследованию бризов (по оценке из статьи [2]), опубликованных только в 1990 – 2003 гг., составляет более 500. По существу, проблема изучения бризовой циркуляции включает в себя широкий круг вопросов, связанных с нелинейным взаимодействием в диапазоне масштабов от синоптических (сотни километров) до мезо- и мелкомасштабных. Даже в указанном выше общем представлении о бризе как о гравитационном течении холодного морского воздуха в практических приложениях должны учитываться и влияние силы Кориолиса, и нелинейность береговой линии, и неоднородности топографии суши, и синоптическая ситуация (прежде всего фоновый ветер, его направление и интенсивность), и другие физические эффекты.

Существенное продвижение в изучении физических механизмов и свойств бризовой циркуляции произошло в результате использования в численном моделировании *LES-приближений (Large Eddy Simulation)*. Они позволили воспроизвести мелкомасштабную структуру бриза (хотя и в модельных постановках), предложить новые параметризации характеристик бриза в процессе развития – его высоту, горизонтальную и вертикальную скорости [3 – 8].

Количество работ по численному моделированию бризовой циркуляции непосредственно для конкретных прибрежных районов относительно невелико. Для Черноморского региона они практически отсутствуют (отметим лишь работу [9], в которой рассчитывался бриз для Черного моря, но в модели с довольно грубой пространственной сеткой, и статью [10], в которой рассматривался бриз над Крымом). В то же время такие численные расчеты для Черноморского бассейна с его сложной береговой линией и наличием высоких прибрежных гор представляют безусловный интерес, а результаты расчетов могут значительно отличаться от простых модельных представлений.

Настоящая работа основана на моделировании атмосферной циркуляции с использованием региональной численной модели с повышенным пространственным разрешением для 31-суточного летнего периода – периода наибольшего развития бриза в Черноморском регионе. В продолжение работы [9] выделен вклад бризовой циркуляции для дневного и ночного периодов суточного цикла для всего Крымского региона и более детально для нескольких районов, имеющих различные конфигурацию берега и рельеф суши. Рассматриваются особенности развития бриза в этих районах.

Численная модель. Цель численного моделирования в данной работе – воспроизведение бризовой циркуляции во всем регионе Черного моря с тем, чтобы получить оценки, осредненные за достаточный промежуток времени в летний сезон года. Для этого была использована известная численная модель атмосферной циркуляции *WRF-ARW* [11] с тремя вложенными доменами, параметры которой были выбраны для проведения длительного счета с повышенным пространственным разрешением и необходимыми настройками параметризации физических процессов (в первую очередь при параметризации конвективного атмосферного пограничного слоя). Отметим лишь основные из них.

По вертикали были заданы 26 неравномерно расположенных по высоте σ -уровней в планетарном пограничном слое. Разрешение в доменах составляло 9; 3 и 1 км. Использовались следующие схемы параметризации: *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*.

Для параметризации приземного пограничного слоя трения использовалась схема *MM5 similarity*. Атмосферный пограничный слой описывался схемой *YSU* (*Yonsei University*). В ней задается линейно-параболический профиль коэффициента вертикальной турбулентной вязкости, а для параметризации неразрешаемых в модели подсеточных потоков импульса, тепла и влаги вводится коррекция локального градиента, а также задается величина потока вовлечения.

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

Результаты моделирования. Для расчетов был выбран летний 31-суточный период с 6 июля по 6 августа 2011 г. На рис. 1 показано изменение величины скорости ветра на высоте 10 м за выбранный период в точке с координатами 45° с. ш., 34° в. д. в центральной части полуострова. В общем, этот период характеризовался относительно слабой синоптической изменчивостью, лишь в течение 2 – 3 сут в регионе наблюдались кратковременные порывы ветра скоростью 8 – 9 м/с, в остальное время скорость ветра находилась в пределах 5 – 7 м/с. С учетом квазипериодичности бриза выделение вклада бризовой циркуляции, имеющей характерные величины скорости ~ 4 м/с на фоне таких же или больших фоновых скоростей синоптического ветра, достигалось простой процедурой осреднения значений скорости для заданного времени суток с последующим вычитанием среднемесячных значений. Это дало возможность вычислить суточный цикл развития бриза. Указанная процедура осреднения позволила выделить среднемесячный вклад бризовой циркуляции на фоне текущего синоптического ветра, имеющего характерные временные масштабы изменчивости 3 – 5 сут (в предположении

об их аддитивности). Хотя, безусловно, рассчитанные значения – это средне-месячные значения скорости бриза за выбранный нами промежуток времени, и влияние синоптических процессов за этот период на оценку бризовой циркуляции все же нельзя считать пренебрежимо малым.

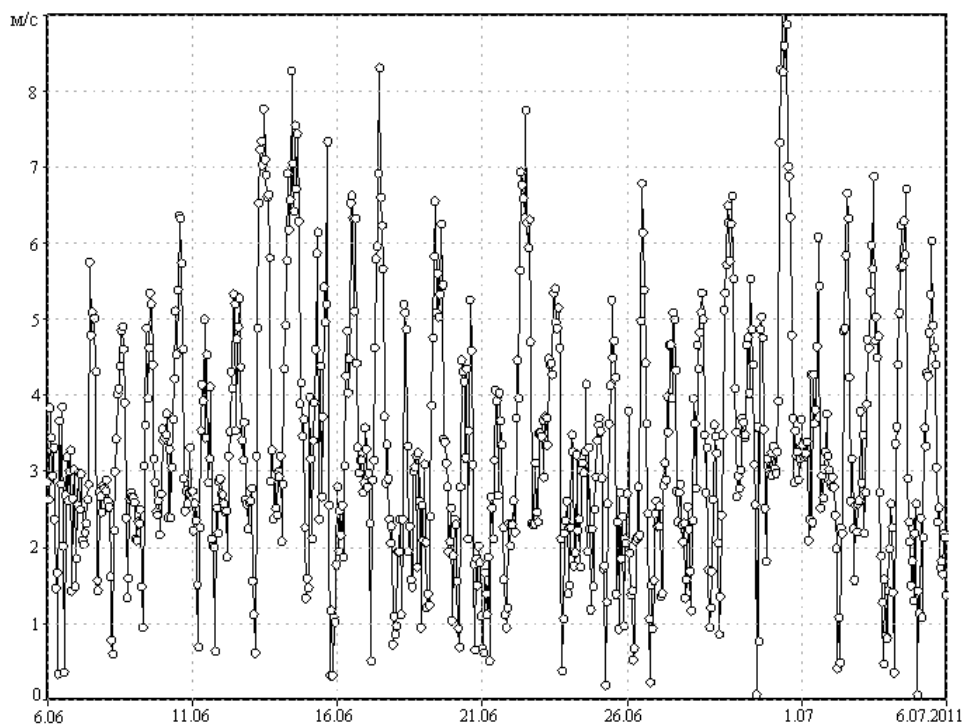


Рис. 1. График скорости ветра на высоте 10 м за 6 июля – 6 августа 2011 г. в точке с координатами 45° с. ш., 34° в. д.

Результат таких расчетов – поля скорости бризовой циркуляции на высоте 10 м – представлен на рис. 2, а, б. Здесь показаны скорости дневного и ночного бризов на моменты их максимального развития 13 и 2 ч местного времени соответственно. Поскольку исходной причиной бризовой циркуляции является суточный цикл инсоляции, имеющей незначительную межгодовую изменчивость в летний период года, полученные оценки бризовой циркуляции можно достаточно уверенно отнести в целом к указанному периоду года. Основной причиной нарушения суточного цикла солнечной радиации вблизи поверхности в летний период года для Черноморского бассейна является вторжение циклонов. Но такие события для лета достаточно редки: например, для июля в среднем наблюдается не более одного случая в месяц с продолжительностью до 2 – 3 сут, когда облачность над морем составляет 70 – 100 % (при этом бриз не развивается). Для периода наших расчетов над морем наблюдалась лишь незначительная эпизодическая облачность (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/imagery/subsets/>). Поэтому приведенные поля скорости бриза можно считать типичными для Крымского региона для этого времени года.

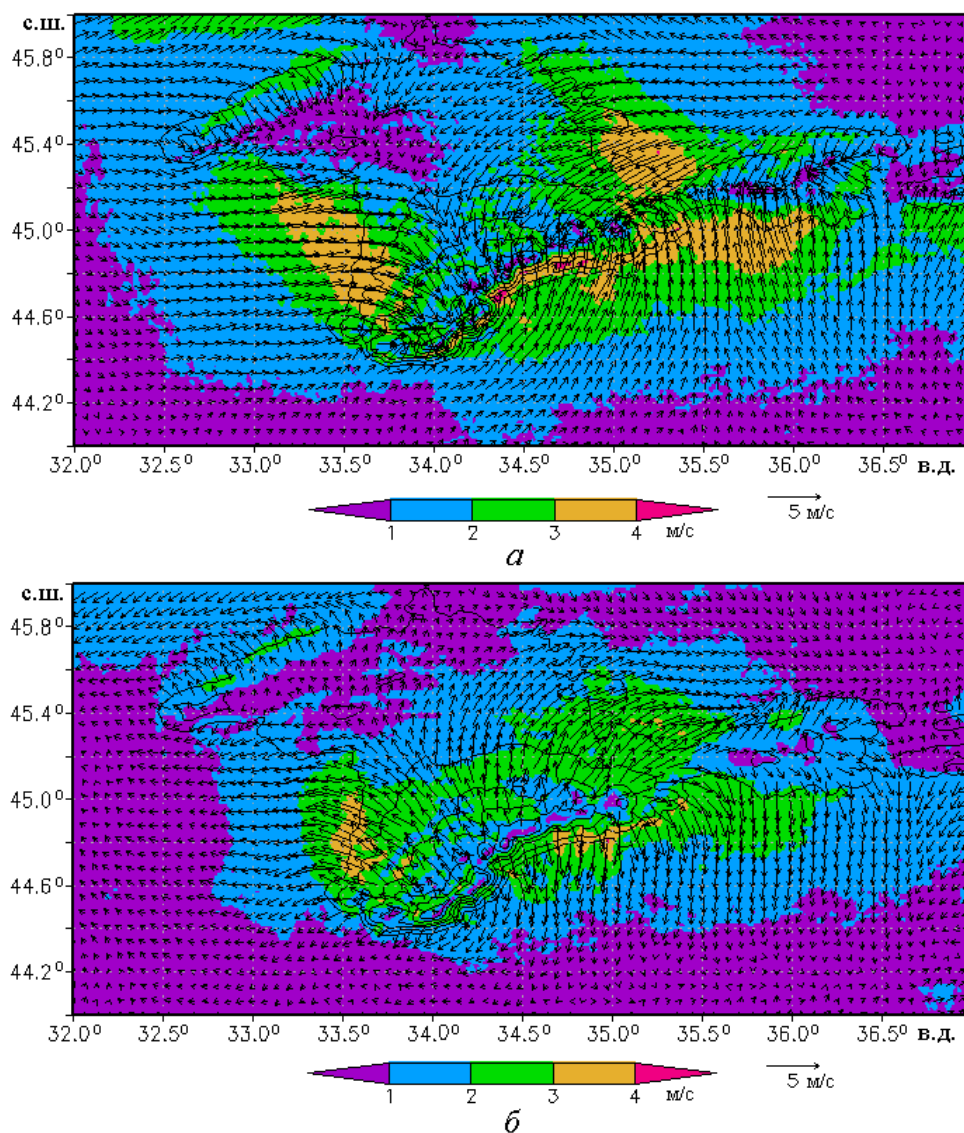


Рис. 2. Поля скорости ветра для дневного бриза (*а*) на момент его максимального развития (13 ч) и ночного бриза (*б*) на момент его максимального развития (2 ч) для Крымского региона (цветом показана величина модуля скорости ветра)

Как видно из рис. 2, поле скорости бриза определяется двумя особенностями региона: ограниченностью размеров Крымского п-ова и наличием достаточно высоких Крымских гор. Выделяются три области повышенных величин скорости дневного бриза – это западное побережье (район Севастополь – Евпатория), северо-восточное побережье и предгорная зона Южного берега Крыма (рис. 2, *а*). Здесь величины скоростей дневного бриза максимальны вблизи берега и составляют ~ 4 м/с. В целом картина поля скорости дневного бриза имеет характер сходящихся к центру полуострова воздушных течений. Отметим, что результатом этого являются повышенная облачность и осадки в

центральных областях Крыма по сравнению с прибрежными. Ночной бриз по направлению и местам локализации максимальных скоростей противоположен дневному (рис. 2, б).

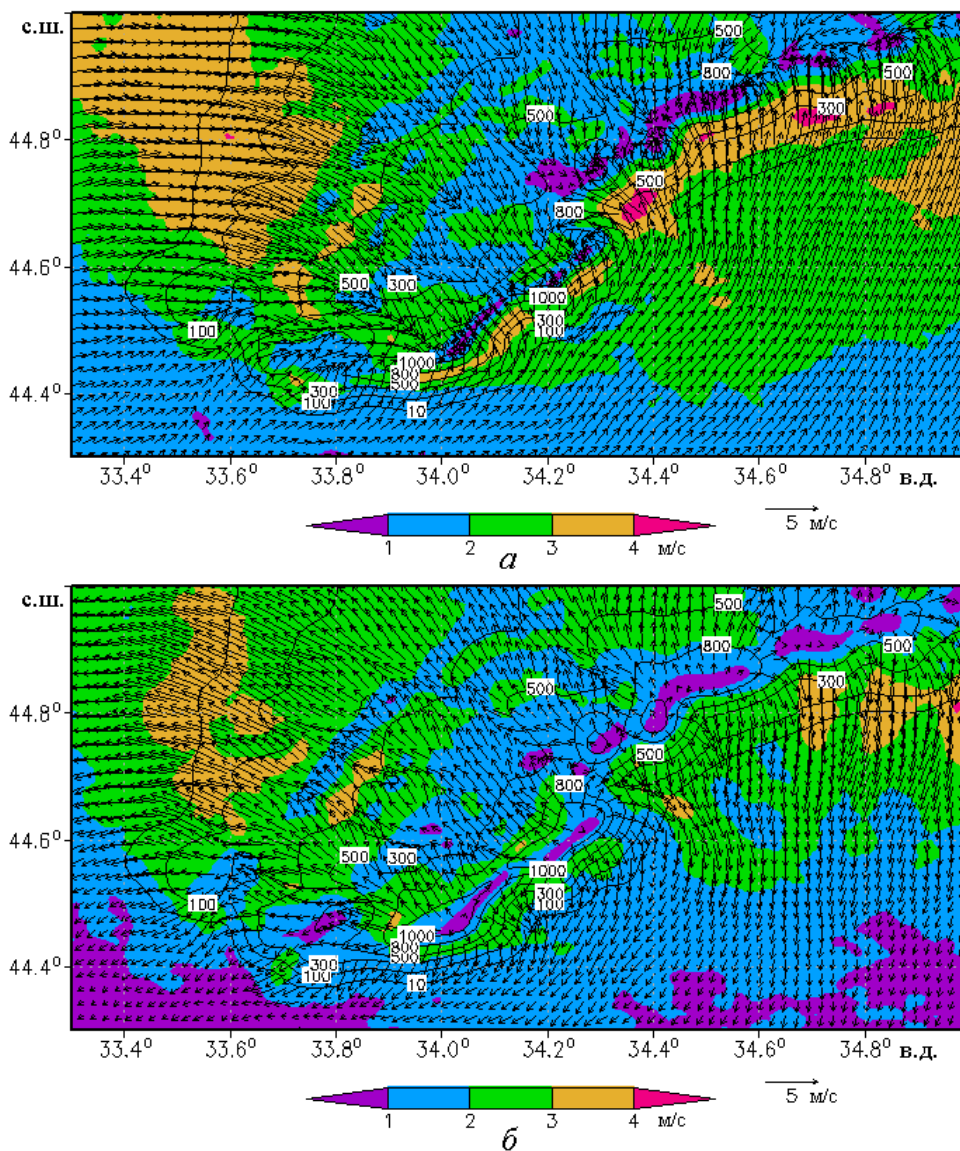


Рис. 3. Поля скорости ветра для дневного бриза (*а*) на момент его максимального развития (13 ч) и ночного бриза (*б*) на момент его максимального развития (2 ч) для южной части Крыма (цветом показана величина модуля скорости ветра; цифры в рамках – рельеф, м)

На рис. 3, *а*, *б* показаны поля скорости бриза для южной части полуострова. Как видно, скорость здесь определяется характером рельефа. В целом дневной бриз в этой части имеет вид сходящихся к вершинам хребта Крымских гор воздушных течений, а ночной – вид течений, стекающих со склонов гор. На общую квазисуточную изменчивость направления вектора скорости

ветра накладываются характерные мелкомасштабные особенности, связанные с гористым рельефом. Так, можно выделить ялтинскую зону, где повышенные скорости ветра возникают на южных склонах высоких окружающих гор, и алуштинскую зону, где большие скорости ветра связаны с понижением горного хребта – Ангарским перевалом.

Расчитанные величины скорости, как указывалось, являются среднемесячными оценками, поэтому представляет интерес ввести коррекцию и выделить вклад в поле скорости именно «чистой» бризовой циркуляции, развивающейся в условиях малого синоптического ветра, т. е. исключить при процедуре осреднения дни, когда бриз не развивался. Для нашего случая это были дни с сильным фоновым синоптическим ветром. В первом приближении можно считать, что суточный цикл бризовой циркуляции нарушается при скоростях фонового ветра, превышающих некоторое пороговое значение: при скоростях ветра с суши на море, больших 5 м/с, бриз над сушей не развивается [12]. При таких же скоростях ветра с моря на сушу область бризовой циркуляции сдвигается далеко на сушу. В обоих случаях можно считать, что бриз развивается при малых скоростях фонового ветра – до ~5 м/с. Построив гистограмму величин скорости ветра, легко оценить долю дней в месячном интервале со скоростями фонового ветра, превосходящими это пороговое значение. Не приводя иллюстраций, укажем, что она составляла ~20 – 30 %. Это означает, что для оценки скоростей «чистого» бриза данные рис. 1 нужно умножить на 1,3 – 1,4.

На рис. 4 и 5 показаны величины скоростей дневного и ночного бризов и суточные годографы скоростей бризовой циркуляции для нескольких районов Крыма. Более простой вид имеет циркуляция в прибрежных западных районах с прямолинейным берегом и отсутствием гор. На разрезе вдоль 44,8° с. ш. (рис. 4, *a*), где показаны скорости дневного и ночного бризов на момент их максимального развития, видно, что дневной бриз распространяется на сушу на расстояние более 50 км, а ночной – на море на расстояние 30 – 40 км. При этом и скорость ночного бриза несколько меньше, чем дневного. Над сушей бризы быстрее затухают, испытывая влияние рельефа, т. е. склонов Крымских гор. На рис. 4 видно, что скорость бриза и над сушей и над морем днем больше, чем ночью. Не останавливаясь на деталях, отметим, что основной причиной заниженных скоростей ночного бриза являются меньшие перепады температур между сушей и морем, которые в нашем случае для периода максимального развития ночного бриза составляют 5 – 6°С по сравнению с 9 – 10°С для дневного. Кроме этого, асимметрия скоростей ночного и дневного бризов может возникать в связи с различиями стратификации атмосферного пограничного слоя и коэффициентов турбулентной вязкости [13].

Как известно, бризовая циркуляция у поверхности не является простым однонаправленным потоком. Поскольку временной масштаб ее развития сравним с масштабом силы Кориолиса, для нее существенно влияние вращения Земли. На рис. 5 показаны суточные годографы скорости бриза для нескольких точек региона. Более простой вид годограф имеет для Евпатории, расположенной на равнинном побережье (рис. 5, *a*). Здесь отчетливо воспроизведено изменение направления вектора скорости ветра по часовой стрелке, связанное с силой Кориолиса [14 – 16]. Для других районов побережья годографы имеют более сложный вид.

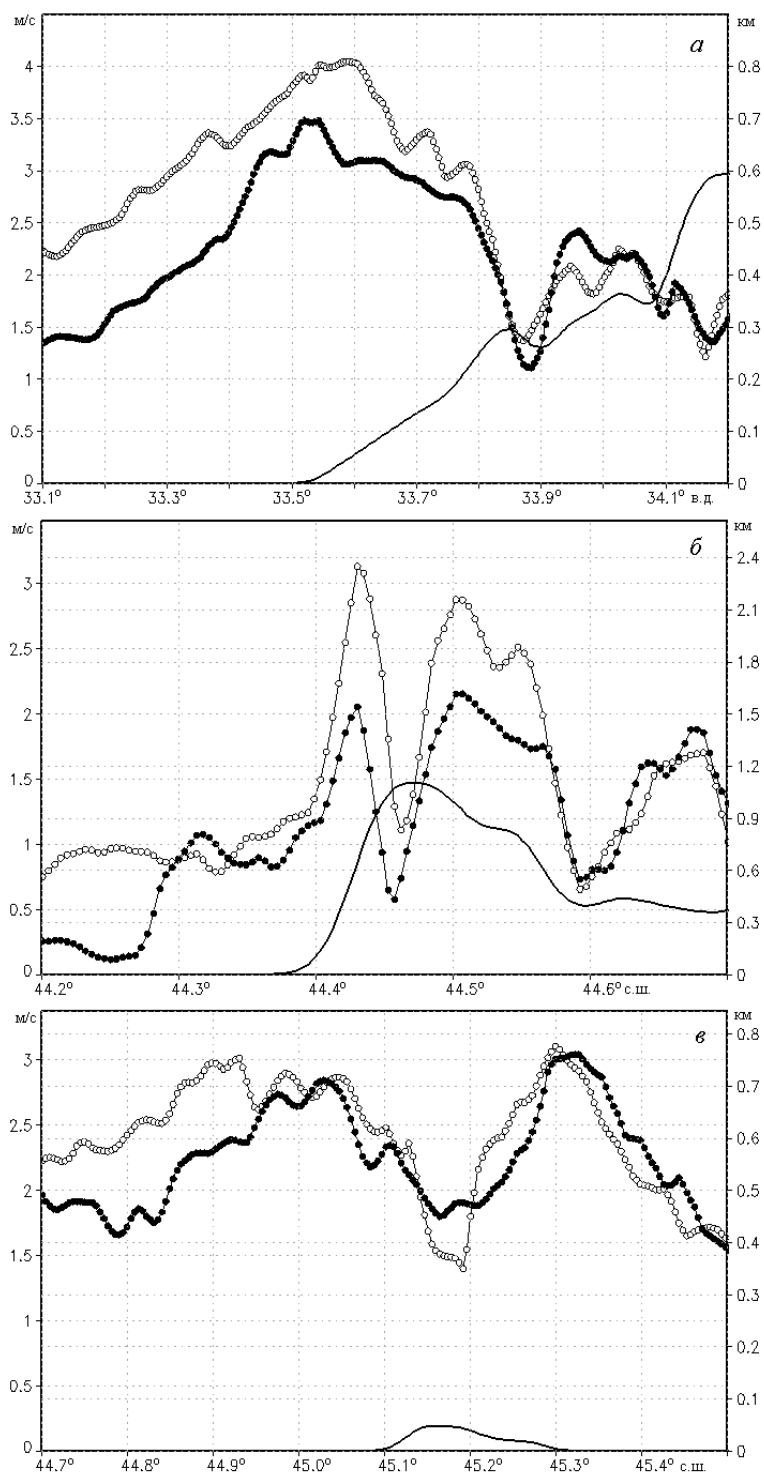


Рис. 4. Графики скорости дневного (—○—) и ночного (—●—) бризов на разрезе вдоль 44,8° с. ш. (а) и на меридиональных разрезях по 34° в. д. (б) и 35,5° в. д. (в) на момент их максимального развития (рельеф суши вдоль разреза показан сплошной линией)

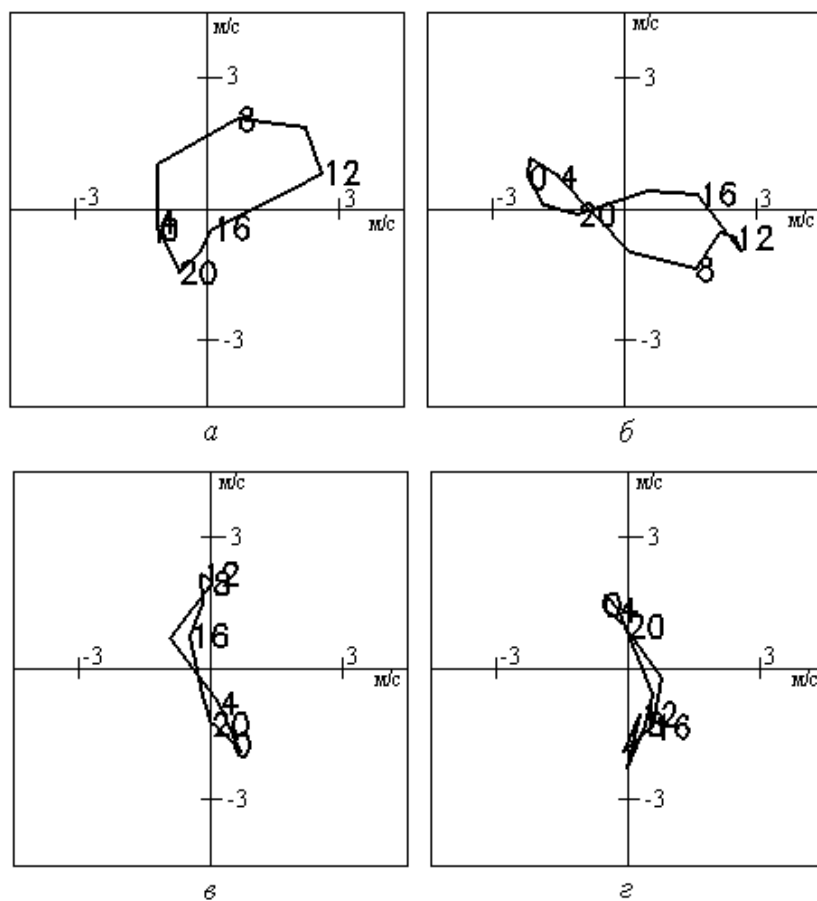


Рис. 5. Суточные годографы скорости бриза для Евпатории (а), Севастополя (б), Ялты (в) и Симферополя (з) (ориентация осей координат соответствует географическим направлениям)

Для Севастополя, находящегося на юго-западной оконечности Крыма, годограф имеет вид восьмерки, преобладающее направление бриза – на запад и восток с незначительными колебаниями вектора скорости между ними (рис. 5, б).

Как отмечалось ранее, бризовая циркуляция над всей сухопутной южной частью полуострова испытывает влияние Крымских гор. Это отчетливо видно на меридиональном разрезе по 34° в. д., пересекающем центральную часть горного хребта (рис. 4, б). Над сушей скорости приповерхностного ветра определяются рельефом гор: над вершиной и днем бризовый ветер практически отсутствует и развивается на обоих склонах горного хребта. Вообще говоря, такой ветер на склонах гор можно считать уже не бризовым, т. е. связанным с тепловым контрастом суша – море, а склоновым горным ветром, обусловленным суточным контрастом радиационного нагрева поверхности склонов гор. Ночью этот склоновый ветер можно рассматривать как кatabатический [17]. Для Ялты на южном берегу Крыма (рис. 5, в) годограф формируется преобладающим дневным бризом, дующим с моря на горы.

На рис. 4, в показаны скорости бриза вдоль меридионального разреза по $35,5^\circ$ в. д. Здесь поле скорости бризовой циркуляции определяется суммарным действием тепловых контрастов между морями (Черным и Азовским) и сухопутной частью полуострова. Днем бризовый ветер направлен к центру перешейка, ночью – от центра к морю (см. рис. 2, б). В результате над сухопутной частью разреза образуется минимум скорости бриза (рис. 4, в).

Годограф скорости бриза для Симферополя, т. е. для удаленной от берега сухопутной части (рис. 5, з), формируется сходящимися от берега к центру дневными бризовыми течениями и ночными склоновыми ветрами с Крымских гор.

Заключение. В работе выполнено численное моделирование атмосферной циркуляции в Крымском регионе за 31-суточный промежуток в летний период года с целью выделения вклада бризовой циркуляции. В предположении о суточной квазипериодичности бриза вычислены скорости дневного и ночного бризов в целом для всего региона и более детально для отдельных районов побережья. Характерный вид дневной бризовой циркуляции над Крымом – направленный к центру полуострова приземный ветер, определяемый двумя особенностями региона: ограниченностью размеров Крымского п-ова и наличием достаточно высоких Крымских гор. Выделяются три области повышенных величин дневного бриза – это западное побережье (район Севастополь – Евпатория), северо-западное побережье и предгорная зона Южного берега Крыма (рис. 1, а). Для западного побережья в области прямолинейного берега бризовая циркуляция имеет более простой вид: годографы скорости приближаются к эллиптическим (большие скорости дневного бриза над сушей и морем по сравнению со скоростями ночного). Над морем бриз распространяется на расстояние 30 – 50 км, над сушей распространение бриза происходит в соответствии с особенностями рельефа.

Для других областей Крымского региона на бризовую циркуляцию существенно влияют окружающие горы и неоднородности береговой черты. В районе Южного берега Крыма дневной бриз блокируется достаточно высокими Крымскими горами, а ночной бриз имеет характер кatabатического течения с горного хребта. Над морем и дневной и ночной бриз в этой части полуострова, в первую очередь, определяется мелкомасштабными неоднородностями берега и прилегающих гор. Бриз в восточной части Крымского п-ова определяется совместным влиянием Черного и Азовского морей и особенностями очертания берега.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Crosman E.T., Horel D.J.* Sea and lake breezes: A review of numerical studies // *Bound.-Lay. Met.* – 2010. – 137, № 1. – P.1 – 29.
2. *Miller S.T.K., Keim B.D., Talbot R.W. et al.* Sea breeze: structure, forecasting, and impacts // *Rev. Geophys.* – 2003. – 41, № 3 / 1011. – P. 1 – 31.
3. *Antonelli M., Rotunno R.* Large-eddy simulation of the onset of the sea breeze // *J. Atmos. Sci.* – 2007. – 64, № 12. – P. 4445 – 4457.
4. *Liu C., W. Moncrieff M.* Simulated density currents in idealized stratified environments // *Mon. Wea. Rev.* – 2000. – 128, № 5. – P. 1420 – 1437.

5. *Porson A., Steyn D.G., Schayes G.* Sea-breeze scaling from numerical model simulation. Part I: Pure sea breezes // *Bound.-Lay. Met.* – 2007. – 122, № 1. – P. 17 – 29.
6. *Porson A., Steyn D.G., Schayes G.* Sea-breeze scaling from numerical model simulation. Part II: Interaction between the sea breezes and slope flows // *Ibid.* – 2007. – 122, № 1. – P. 31 – 41.
7. *Robinson F.J., Patterso M.D., Sherwood S.C.* A numerical modeling study of the propagation of idealized sea-breeze density currents // *J. Atmos. Sci.* – 2013. – 70, № 3. – P. 653 – 668.
8. *Sha W., Kawamura T.* A numerical study of sea/land breezes as a gravity currents: Kelvin-Helmholtz billows and inland penetration of the sea-breezes front // *Ibid.* – 1991. – 14, № 14. – P. 1649 – 1665.
9. *Ефимов В.В., Барабанов В.С., Крупин А.В.* Моделирование мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в Крымском регионе Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* – 2012. – № 1. – С. 64 – 74.
10. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // *Там же.* – 2009. – № 5. – С. 23 – 36.
11. *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.
12. *Porson A., Steyn D.G., Schayes G.* Formulation of an index for sea breezes in opposing winds // *J. Appl. Met. Climat.* – 2007. – 46, № 8. – P. 1257 – 1263.
13. *Mak M.K., Walsh J.E.* On the relative intensities of sea and land breezes // *J. Atmos. Sci.* – 1976. – 39, № 2. – P. 242 – 251.
14. *Haurwitz B.* Comments on the sea-breeze circulation // *J. Meteorol.* – 1946. – 4, № 1. – P. 1 – 7.
15. *Neumann J.* On the rotation rate of the direction of sea and land breezes // *J. Atmos. Sci.* – 1977. – 34, № 12. – P. 1913 – 1917.
16. *Simson J.E.* Diurnal changes in sea-breeze direction // *J. Appl. Met.* – 1996. – 35, № 7. – P. 1166 – 1169.
17. *Grisogono B.* Post-onset behavior of the katabatic flow // *Bound.-Lay. Met.* – 2003. – 107, № 1. – P. 17 – 29.

Breeze circulation in the Crimea region atmosphere

V.V. Efimov, O.I. Komarovskaya

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: vefim.38@mail.ru*

To distinguish contribution of wind speed breeze component, the atmospheric circulation in the Crimea region in summer is simulated using the numerical model *WRF-ARW*. Under the assumption of breeze daily quasi-periodicity, the speeds of day and night breezes are calculated for the whole region and, in more details, – for a few regions of the Crimea. The features of formation of day and night breezes in these regions are distinguished. Presence of littoral mountains and the coast contours produce characteristic features of breeze development.

Keywords: breeze, numerical modeling, atmospheric circulation, Crimea region.