

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.555.4

DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-134-146

## Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра

В. В. Ефимов\*, О. И. Комаровская

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

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

Поступила в редакцию 27.11.2018 г.

**Введение.** Рассмотрено влияние Крымских гор на ветровой режим Крымского региона для различных сезонов и направлений ветра.

**Материалы и методы.** Использованы данные о среднемесячных значениях температуры на модельных уровнях реанализа *ERA-Interim* за 40 лет (1979–2018 гг.), а также результаты моделирования с использованием региональной численной модели атмосферной циркуляции *WRF-ARW*.

**Анализ результатов.** Рассмотрены поля скорости приземного ветра в Крымском регионе при северных и южных направлениях фонового ветра, близких к нормальному по отношению к расположению горного хребта. Приведен годовой ход частоты плавучести для равнинных частей суши Крымского полуострова и отделенного от них Крымскими горами Южного берега. Выделены периоды наибольших вероятных возмущений, вносимых Крымскими горами в поля приземного ветра. С использованием модели региональной атмосферной циркуляции *WRF-ARW* воспроизведены поля скорости ветра при нескольких характерных направлениях фонового невозмущенного ветра.

**Обсуждение и заключение.** Показано, что в весенне-летний период (апрель – июнь) в атмосфере над морем создаются условия, необходимые для блокирования потока воздуха, набегавшего с юга на гряды Крымских гор. В результате формируется вдольбереговой поток и создается мезомасштабная зона возмущений скорости. При северных ветрах устойчивая стратификация в пограничном слое над областью суши Крыма в среднем наблюдается в течение всего года, кроме четырех летне-осенних месяцев (июнь – сентябрь), и значительные возмущения скорости ветра также могут развиваться. Однако они имеют более локальный характер: сконцентрированы непосредственно вблизи горного хребта и над подветренным склоном, где в узкой прибрежной зоне формируются возмущения скорости типа боры. Рассмотрена статистика повторяемости этих двух случаев возмущений поля скорости приводного ветра, вызываемых горами.

**Ключевые слова:** Крымский регион, поле скорости приземного ветра, Крымские горы, число Фруда, частота плавучести, модель *WRF-ARW*.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

**Для цитирования:** *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 134–146. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-134-146

© Ефимов В. В., Комаровская О. И., 2019

# Disturbances in the Wind Speed Fields due to the Crimean Mountains

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

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

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

*Introduction.* Influence of the Crimean Mountains on the wind regime in the Crimea region for different seasons and wind directions is considered.

*Data and methods.* Data on the monthly average temperature values on the model levels of the ERA Interim reanalysis [10] for 40 years (1979–2018) and also the results of modeling using the regional numerical model of atmospheric circulation WRF-ARW are used.

*Results.* The fields of surface wind speeds in the Crimea region are considered at the northern and southern directions of the background wind which are close to the normal one in relation to the ridge. Annual variation of buoyancy frequency for the flat regions of the Crimea Peninsula and for its Southern Coast separated from them by the Crimean Mountains is given. The periods of the most probable disturbances in the surface wind fields induced by the Crimean Mountains are revealed. Using the model of regional atmospheric circulation WRF-ARW, the wind speed fields for a few typical directions of the background undisturbed wind are reconstructed.

*Discussion and conclusions.* It is shown that in a spring-summer period (April–June) in the atmosphere over the sea, the conditions required to block the air flow from the south to the Crimean Mountains ridge arise. As a result, an alongshore flow is formed, and the mesoscale zone of speed perturbations springs up. At the northern winds, stable stratification in the boundary layer over the Crimea land areas is observed, on the average, throughout the whole year, except for four summer-autumn months (June–September); significant wind speed disturbances can also advance. However, they are of local character, i.e. concentrated directly near the mountain ridge and over the leeward slope where the velocity disturbances of a bora type are formed in a narrow coastal zone. Recurrence of these two cases of the wind speed field perturbation caused by the mountains is assessed and considered.

**Keywords:** Crimea region, field of surface wind speed, Crimean Mountains, Froude number, buoyancy frequency, WRF-ARW model.

**Acknowledgments:** The investigation was carried within the framework of the state tasks on theme № 0827-2018-0001 “Fundamental studies of the interaction processes in the ocean-atmosphere system conditioning the regional spatial-temporal variability of natural environment and climate”

**For citation:** Efimov, V. V. and Komarovskaya, O. I., 2019. Disturbances in the wind speed fields due to the Crimean Mountains. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 35(2), pp. 134-146. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-134-146 (in Russian).

## Введение

Крымские горы являются естественной преградой на пути распространения воздушного потока и могут приводить к значительным возмущениям полей скорости ветра и температуры воздуха, определяющим локальные особенности климата Крыма. В работе [1] подробно исследуется механизм влияния Крымских гор на температурный режим района Южного берега Крыма (ЮБК). Показано, что при ветрах северного и северо-западного направлений в зимний период происходит блокирование воздушного потока на северных склонах Крымских гор и замещение его на южных склонах более теплым воздухом из верхних слоев атмосферы. Результатом этого является формирование теплого субсредиземноморского климата в районе ЮБК. Однако этим эффектом не ограничиваются все виды возмущений полей скорости и температуры, зависящие как от характеристик поля скорости фонового потока (от

его направления и величины скорости), так и от вертикальной структуры поля температуры (от частоты плавучести). Под фоновым ветром будем понимать ветер вне зоны искажения воздушного потока горами.

В данной работе рассмотрено влияние гор на ветровой и температурный режим Крымского региона для различных сезонов и направлений ветра. С использованием региональной численной модели атмосферной циркуляции *WRF-ARW* оценены возмущения полей скорости, вносимые Крымскими горами, в зависимости от направления фонового ветрового потока, а также рассмотрены особенности сезонной изменчивости таких возмущений.

Характер обтекания воздушным потоком горы определяется вертикальным профилем скорости ветра и частоты плавучести в нижнем слое атмосферы на высотах, сравнимых с высотой горы. Физические механизмы взаимодействия горы с воздушным потоком в настоящее время достаточно хорошо изучены (см., напр., обзорные работы [2–6]). Определяющим параметром режима обтекания является число Фруда, которое в области атмосферного пограничного слоя для высот, сравнимых с высотой горы, задается формулой  $Fr = U/Nh$ , где  $U$  – скорость ветра,  $h$  – высота горы,  $N$  – частота плавучести, связанная с вертикальным профилем потенциальной температуры  $\theta$ :  $N^2 = g\theta_z/\theta_0$ , здесь  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\theta_0$  – средняя потенциальная температура,  $\theta_z$  – производная по высоте  $z$ . Для безразличной стратификации  $N$  частицы воздуха в приповерхностном слое свободно поднимаются вверх по наветренному склону и далее опускаются вниз по подветренному склону горы. Для бароклинной устойчивой атмосферы при  $N > 0$  частицы могут подняться только до высоты  $h < \sim U/Frh$  [7]. Сам характер обтекания горы потоком воздуха при достижении числом Фруда некоторого критического значения изменяется – происходит переход от нелинейного волнового режима к обрушению внутренних волн. При наличии протяженного горного хребта (а именно такими и являются Крымские горы) критическое значение числа Фруда близко к единице [3]. Если число Фруда больше критического, при обтекании гор потоком устанавливается закритический волновой режим, если меньше – докритический режим, приводящий к обрушению внутренних волн и формированию интенсивного струйного течения на подветренном склоне гор. В первом случае возмущения развиваются на больших высотах, сравнимых с высотой гор, во втором они развиваются, начиная с области малых высот. Применительно к большим скоростям ветра, когда эти возмущения скорости определяются как бора, первый случай можно определить как случай глубокой, а второй – как случай мелкой боры [8].

### Численная модель

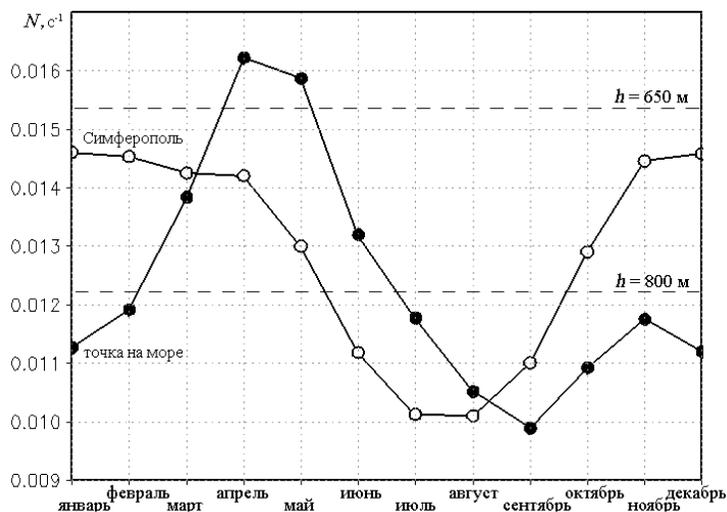
Для моделирования использовалась численная модель атмосферной циркуляции *WRF-ARW* [9], хорошо известная в литературе. Укажем кратко ее параметры. Выбраны 4 последовательно вложенных домена с разрешением 8100, 2700, 900, 300 м соответственно, при этом четвертый домен с самым высоким разрешением охватывал область ЮБК. Вертикальная структура представлена в модели 39 неравномерными по высоте (с увеличенным разрешением в планетарном пограничном слое)  $\sigma$ -уровнями. Для расчета в модели применены следующие опции: *RRTM* и *Dudhia* – для баланса коротко-

волновой и длинноволновой радиации соответственно, *Kain-Fritsch* – для кучевой облачности. Фазовые переходы в атмосфере определялись схемой *Single-Moment 3-class*, параметризация приземного пограничного слоя задана схемой *MM5 similarity*. Атмосферный пограничный слой рассчитывался по схеме замыкания турбулентности *Mellor – Yamada* в первых двух доменах и *YSU (Yon Sei University)* – во вложенных третьем и четвертом доменах. Входные данные, определяющие расчет развития атмосферных процессов во всех доменах заданием граничных условий на внешнем первом домене, представляют собой данные оперативного анализа *Global Forecast System (GFS)* с разрешением  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  и временным интервалом 6 ч.

### Годовой ход частоты плавучести

Параметры плавучести и скорость ветра над равнинными частями суши Крымского п-ова и отделенным от них Крымскими горами Южным берегом Крыма обычно существенно различаются. Возмущения, вносимые грядой Крымских гор, также существенно различаются при южных и северных направлениях скорости фонового ветра.

Рассмотрим годовой ход частоты плавучести для этих областей. На рис. 1 приведены значения частоты плавучести  $N$ , полученные по данным о среднемесячных значениях температуры на модельных уровнях реанализа *ERA-Interim* [10] за 40 лет (1979–2018 гг.). Здесь представлен годовой ход оценки средней величины частоты  $N$  в слое 10–546 м для двух выбранных точек: первая расположена в области суши в непосредственной близости к Симферополю, вторая – над морем южнее Ялты.



**Р и с. 1.** Годовой ход частоты плавучести  $N$ , средней по высоте 10–546 м, в точке на суше  $45^\circ$  с. ш.,  $34^\circ$  в. д. (Симферополь) и в точке на море  $43,875^\circ$  с. ш.,  $34,25^\circ$  в. д. по данным реанализа *ERA-Interim* [10] за период 1979–2018 гг.

**F i g. 1.** Annual variation of buoyancy frequency  $N$  (average over height 10–546 m) at the point on land  $45^\circ$  N,  $34^\circ$  E (Simferopol) and at the point in the sea  $43.875^\circ$  N,  $34.25^\circ$  E based on the ERA-Interim reanalysis data [10] for 1979–2018

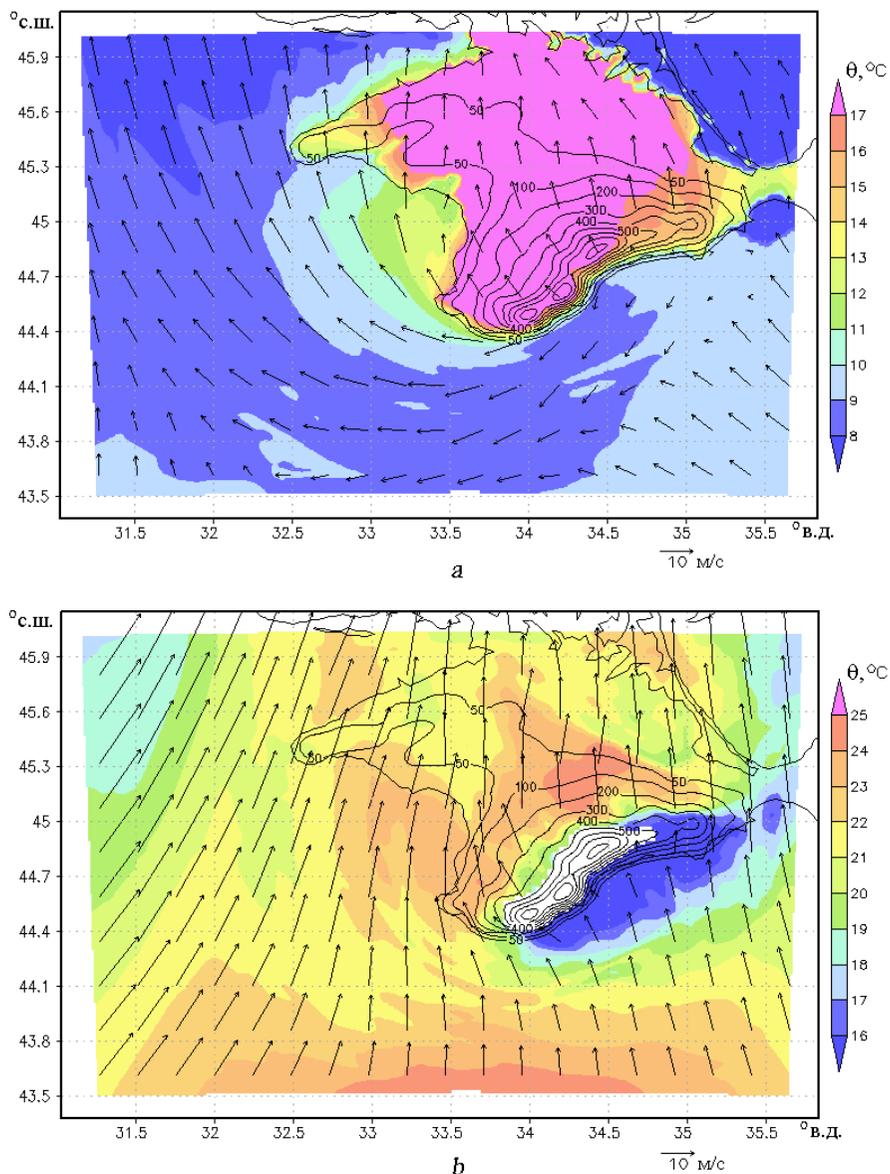
Как видно, годовой ход  $N$  над сушей и морской областью существенно различается. Над морем для периода апрель – май в частоте плавучести наблюдается хорошо выраженный максимум устойчивости, связанный с весенним прогревом воздуха над относительно холодной водой. Над сушей воздух устойчивый в течение всего года, кроме летне-осенних месяцев июнь – сентябрь, когда в результате дневного прогрева и формирования конвективно-неустойчивого атмосферного пограничного слоя среднесуточные значения минимальны. И хотя данные  $N$  представляют собой осредненные за 40 лет среднесуточные значения, а оценки для конкретного срока наблюдений могут различаться вследствие синоптической изменчивости, тем не менее можно считать, что общие тенденции годового хода частоты плавучести над морской частью и сушей Крымского региона рис. 1 описывает.

Горизонтальные штриховые линии  $h = 650$  м и  $h = 800$  м на рис. 1 для условного значения скорости ветра  $U = 10$  м/с соответствуют величинам числа Фруда  $Fr = 1$ . Таким образом, значения  $N$ , лежащие выше этих линий, попадают в диапазон  $Fr < 1$ , когда для соответствующей высоты хребта развиваются низкоуровневые возмущения. Область на графиках, приходящаяся на диапазон  $Fr > 1$ , соответствует высокоуровневым волновым возмущениям скорости [8].

### **Возмущения, вносимые Крымскими горами, для разных направлений ветра**

Рассмотрим поля приповерхностного ветра для случаев действия сильных ветров, характерных для региона. Были выбраны случаи действия северо-восточного ветра как наиболее повторяемого направления для Крымского региона (по данным для Симферополя, <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/33946.htm>), а также случаи действия северного, северо-западного и противоположного южного, юго-восточного ветров с направлениями, близкими к нормальному по отношению к расположению гор.

Ветер южного направления. Наибольшие возмущения поля скорости ветра над морской областью Крымского региона развиваются в период апрель – июнь при ветре южного направления. Они интересны тем, что охватывают значительные (до 100–150 км) части моря южнее и юго-западнее Крыма и выражаются в изменении направления фонового ветра. Вблизи ЮБК ветер изменяет направление на вдольбереговое, и лишь на значительном удалении от полуострова сохраняется направление фонового ветра. Этот тип возмущений иллюстрирует рис. 2, а, на котором для случая действия фонового ветра юго-восточного направления в апреле 2018 г. показаны векторы скорости ветра на высоте 10 м и потенциальная температура в условных единицах  $\theta = \text{K} - 273,15$  (для горных районов использование температуры  $\theta$  более удобно для описания приповерхностной температуры, которая для уровня моря близка к температуре в °C).

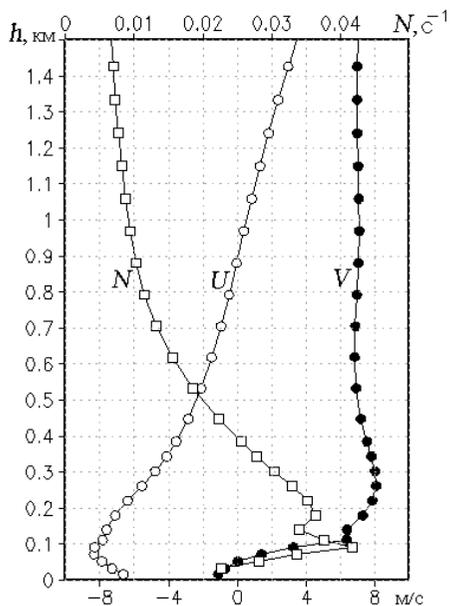


**Р и с. 2.** Поля скорости ветра (стрелки) и потенциальной температуры (цвет) на высоте 10 м (а) и 550 м (b) по данным моделирования на 01.04.2018 г. (12:00)

**Fig. 2.** Fields of wind speed (arrows) and potential temperature (color) at the heights 10 m (a) and 550 m (b) based on the model data for 01.04.2018 (12:00)

Физический механизм формирования горами обширной области возмущений поля скорости ветра хорошо поясняет рис. 3. На нем приведены вертикальные профили частоты плавучести  $N$  и компонент скорости – зональной  $U$  и меридиональной  $V$  – в нижней части атмосферы. Видны большие величины частоты плавучести, достигающие вблизи поверхности  $\sim 0,04 \text{ с}^{-1}$ , и скорости ветра  $\sim 10 \text{ м/с}$ . Для таких величин  $Fr \sim 0,5$ , т. е. при обтекании гор вет-

ром существен эффект блокирования ветра на наветренном склоне гор, ограничивающем подъем частиц воздуха вдоль склона. Так, при осредненных в нижней части атмосферы значениях скорости  $\sim 10$  м/с и  $N \sim 0,02-0,03$  с $^{-1}$  высота блокирования  $h_b = V/N$ : выше этой высоты частицы приповерхностного воздуха не поднимаются, а растекаются вдоль наветренного склона в поперечном (вдоль хребта) направлении. В нашем случае такой склоновый ветер направлен на запад.

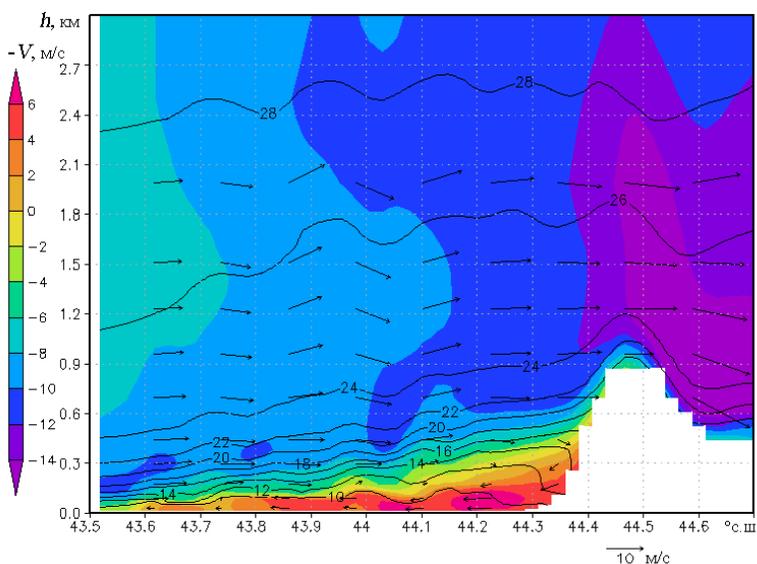


**Р и с. 3.** Вертикальные профили зональной ( $U$ ) и меридиональной ( $V$ ) компонент скорости ветра и частоты плавучести ( $N$ ) в точке Черного моря  $43,875^\circ$  с. ш.,  $34,25^\circ$  в. д. по данным модельных расчетов на 01.04.2018 г. (12:00)

**F i g. 3.** Vertical profiles of zonal ( $U$ ) and meridian ( $V$ ) components of wind speed and buoyancy frequency ( $N$ ) at the point in the Black Sea  $43.875^\circ$  N,  $34.25^\circ$  E based on the model data for 01.04.2018 (12:00)

Для высоты  $\sim 500$  м, как видно из рис. 2,  $b$ , область блокирования воздушного потока и область возмущений сократились до небольшой зоны непосредственно вблизи вершины гор. Интересно также появление здесь области пониженных на  $3-4^\circ\text{C}$  значений потенциальной температуры  $\theta$  над морем в прибрежной части ЮБК. Это прямо указывает на подъем воздуха при приближении к наветренному склону горного хребта.

На рис. 4 показано распределение по высоте меридиональной компоненты скорости вдоль разреза, проведенного через высокогорную часть хребта (по  $34^\circ$  в. д.). Хорошо представлена область возмущений, протяженная по долготе на более чем 100 км и по высоте с толщиной, постепенно уменьшающейся по мере удаления от Крыма.

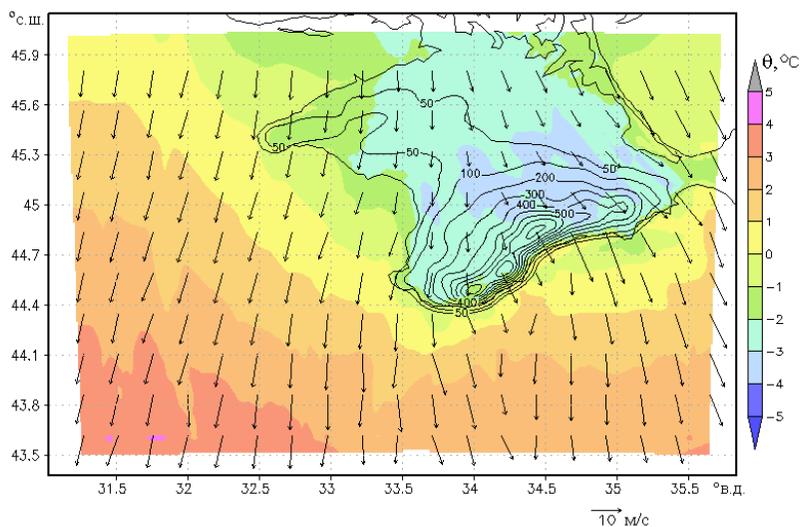


**Р и с. 4.** Вертикальная структура меридиональной компоненты  $V$  скорости ветра (цвет), потенциальной температуры  $\theta$  (изолинии) и векторы скорости  $\{V, 20 W\}$  (стрелки), где  $W$  – вертикальная компонента, в вертикальной плоскости для зонального сечения по  $34^\circ$  в. д. по данным модельных расчетов на 01.04.2018 г. (12:00)

**Fig. 4.** Vertical structure of the wind speed meridian component  $V$  (color), potential temperature  $\theta$  (isolines) and speed vectors  $\{V, 20 W\}$  (arrows), where  $W$  is vertical component on the vertical plane for zonal section along  $34^\circ$  E based on the model simulations for 01.04.2018 (12:00)

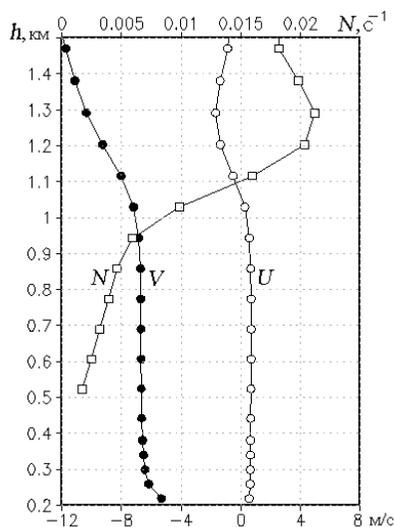
**Ветер северного направления.** На рис. 5 показаны поля скорости для случая действия ветра северного направления, на рис. 6 – вертикальные профили частоты плавучести и компонент скорости над сушей, у основания наветренного склона гор. Здесь поток воздуха на пологом протяженном наветренном склоне почти не блокируется – не изменяет своего направления при приближении к вершине горного хребта. Это объясняется характерной особенностью вертикального профиля частоты  $N$ : до высот  $\sim 500$  м величины  $N \sim 0,01 \text{ с}^{-1}$ , высота блокирования  $\sim 800$  м. В этом проявляется основное отличие от случая действия южного ветра, где устойчиво стратифицированный поток воздуха натекает на очень крутой склон гор ЮБК.

Для такого случая действия фонового ветра максимальные значения возмущений скорости приповерхностного ветра локализованы в области подветренного склона горного хребта – в масштабе рис. 5 эта сравнительно узкая зона не представлена. Рассмотрение детальной структуры поля ветра в области горного хребта и наветренного склона для случаев действия северного ветра выходит за рамки статьи – она описана ранее в работах [1, 11, 12]. В прибрежной зоне моря видны относительно небольшие возмущения скорости. Они выражаются в изменениях направления ветра, связанных с вдольбереговыми неоднородностями гор. Величины скорости в этой зоне сравнимы со значениями скорости фонового ветра над морем. Интересно, что ветер над сушей имеет на 40–60% меньшие значения скорости, что объясняется большими значениями параметра шероховатости поверхности суши по сравнению с морем.



**Р и с. 5.** Поля скорости ветра (стрелки) и потенциальной температуры (цвет) на высоте 10 м по данным моделирования на 03.12.2013 г. (10:00)

**F i g. 5.** Fields of wind speed (arrows) and potential temperature (color) at height 10 m based on the model data for 03.12.2013 (10:00)



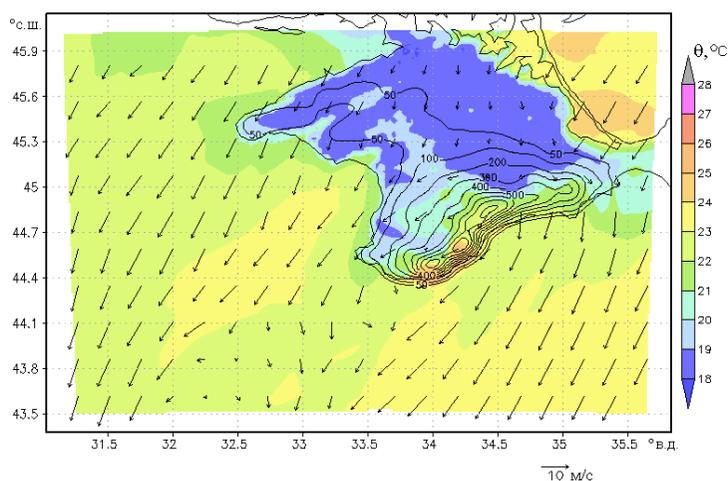
**Р и с. 6.** Вертикальные профили зональной ( $U$ ), меридиональной ( $V$ ) компонент скорости ветра и частоты плавучести ( $N$ ) в точке на суше  $45^\circ$  с. ш.,  $34^\circ$  в. д. по данным модельных расчетов на 03.12.2013 г. (10:00)

**F i g. 6.** Vertical profiles of zonal ( $U$ ) and meridian ( $V$ ) components of wind speed and buoyancy frequency ( $N$ ) at the point on land  $45^\circ$  N,  $34^\circ$  E based on model simulations for 03.12.2013 (10:00)

Таким образом, ветер северного направления даже при устойчивой стратификации не вызывает значительных мезомасштабных возмущений скорости и температуры над морем южнее Крыма. В то же время это не относится к сравнительно узкой области над сушей и к морской области вблизи гор, где более мелкомасштабные возмущения могут быть значительными. При боль-

ших скоростях фонового ветра здесь могут развиваться интенсивные течения воздуха типа боры [11, 12], а температура воздуха – повышаться по сравнению с соседними областями на 4–6°C [1].

Ветер северо-восточного направления. Этому случаю соответствует фоновый ветер, направленный вдоль склонов горного хребта. На рис. 7 показано поле скорости ветра в виде векторов для одного из таких эпизодов действия северо-восточного ветра. В целом можно отметить, что не происходит значительного изменения поля приповерхностного ветра в областях по обе стороны горного хребта. Лишь за юго-западной оконечностью полуострова над морем за грядой высоких гор видны вихревые образования. Гидродинамические механизмы таких возмущений могут напоминать цепочки Кармана, но их анализ требует отдельного рассмотрения.



**Р и с. 7.** Поля скорости ветра (стрелки) и потенциальной температуры (цвет) на высоте 10 м по данным моделирования на 18.07.2017 г. (18:00)

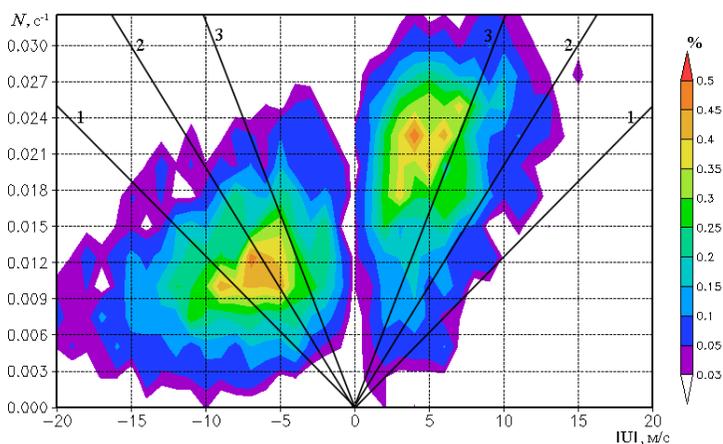
**F i g. 7.** Fields of wind speed (arrows) and potential temperature (color) at height 10 m based on the model data for 18.07.2017 (18:00)

### Повторяемость возмущений для южного ветра

Интересно оценить повторяемость выполнения необходимых условий формирования наиболее значительных возмущений поля скорости ветра, вызываемых горами. К ним относятся два типа рассмотренных возмущений. Во-первых, это показанные на рис. 2 мезомасштабные возмущения скорости, охватывающие всю часть моря, примыкающую к гористой южной оконечности Крыма. Во-вторых, это более мелкомасштабные локальные возмущения типа боры для северного ветра. Как указывалось, для появления таких низкоразмерных возмущений необходимо сочетание достаточно большой скорости ветра нужного направления и таких величин частоты  $N$ , при которых выполняется условие  $Fr < 1$ .

При величинах  $Fr > 1$  возмущения локализованы в области подветренного склона вблизи вершин гор [8]. Это означает, что в таком случае при южном ветре не выполняются необходимые условия для блокирования воздушного потока на склонах гор Южного берега Крыма и не формируется обширная мезомасштабная область возмущений.

На рис. 8 показано совместное распределение частоты плавучести  $N$ , средней для высоты 10–546 м, и скорости ветра на высоте ~910 м для ветров северного направления в точке над сушей (левые части рисунка) в зимние месяцы (январь, февраль). В правой части рисунка показаны распределения для ветров южного направления в точке Черного моря в весенние месяцы (апрель, май). Распределения построены по данным о температуре (53-й и 60-й модельные уровни) и компонентах скорости ветра (51-й модельный уровень) реанализа *ERA-Interim* [10] за 40 лет (1979 – 2018 гг.) с дискретностью по времени 6 ч. При этом северные направления включают северо-западные с отклонением не более  $75^\circ$  и северо-восточные с отклонением не более  $15^\circ$  от северного направления, а южные направления включают юго-западные с отклонением не более  $15^\circ$  и юго-восточные с отклонением не более  $75^\circ$  от южного, что согласуется с расположением хребта Крымских гор. Прямые линии соответствуют значению числа Фруда  $Fr = 1$  для высот 800 м (1), 500 м (2), 300 м (3). Таким образом, на графиках области, лежащие выше этих прямых, соответствуют низкоуровневым режимам возмущений (при больших скоростях ветра это области боры). Области ниже прямых линий соответствуют волновым, более высокоуровневым режимам возмущений.



**Р и с. 8.** Совместное распределение частоты плавучести  $N$ , средней по высоте 10–546 м, и скорости ветра на высоте ~910 м по данным реанализа *ERA-Interim* за период 1979–2018 гг.: слева – для ветров северного направления в точке на суше  $45^\circ$  с. ш.,  $34^\circ$  в. д. в зимние месяцы (январь, февраль); справа – для ветров южного направления в точке Черного моря  $43,875^\circ$  с. ш.,  $34,25^\circ$  в. д. в весенние месяцы (апрель, май). Прямые линии соответствуют значению числа Фруда  $Fr = 1$  для высот 800 м (1), 500 м (2), 300 м (3)

**F i g. 8.** Combined distribution of buoyancy frequency  $N$  average over height 10–546 m and wind speed at height ~910 m based on the *ERA-Interim* reanalysis data for 1979–2018: to the left – for the northern winds at the point on land  $45^\circ$  N,  $34^\circ$  E in winter months (January, February); to the right – for the southern winds at the point in the Black Sea  $43.875^\circ$  N,  $34.25^\circ$  E in spring months (April, May). Straight lines correspond to the Froude number ( $Fr = 1$ ) for the heights 800m (1), 500 m (2) and 300 m (3)

Как следует из рис. 8, повторяемость низкоуровневых возмущений для южных ветров в весенне-летний период заметно выше, чем для северных ветров в зимний период. Значения повторяемости (в % по отношению к общей продолжительности выбранных периодов) приведены в таблице. Таким

образом, возбуждение обширных мезомасштабных областей возмущений поля скорости приводного ветра к югу от высоких Крымских гор все же относится к довольно редким случаям. Причиной этого является малая повторяемость ветров южного направления в весенне-летний период [13–15].

**Оценки повторяемости боры зимой (январь, февраль) и весной (апрель, май) при ветрах северных направлений для точки 45° с. ш., 34° в. д. и южных направлений для точки 43,875° с. ш., 43,25° в. д. по данным реанализа ERA-Interim [10] за период 1979–2018 гг.**

**Assessments of bora recurrence in winter (January, February) and spring (April, May) at the northern winds for the point 45° N, 34° E and at the southern winds for the point 43.875° N, 43.25° E based on the ERA-Interim reanalysis [10] for 1979–2018**

Ветер с севера / Northern wind	Высота, м / Height, m	Режим блокирования, % / Regime of blocking, %	Волновой режим, % / Wave regime, %	Ветер с юга / Southern wind	Высота, м / Height, m	Режим блокирования, % / Regime of blocking, %	Волновой режим, % / Wave regime, %
январь, февраль / January, February				апрель, май / April, May			
≥5 м/с / ≥ 5 m/s	h=800	8,05	10,84	≥5 м/с / ≥ 5 m/s	h=800	8,64	0,68
	h=500	3,09	15,80		h=500	7,16	2,15
	h=300	0,32	18,58		h=300	2,88	6,43
≥10 м/с / ≥10 m/s	h=800	0,98	7,19	≥10 м/с / ≥10 m/s	h=800	1,48	0,28
	h=500	0,08	8,09		h=500	0,74	1,01
	h=300	0,00	8,18		h=300	0,00	1,75

**Заключение**

Ветер над Черным морем в прибрежных областях может испытывать значительное влияние окружающих море гор. Возмущения ветра, создаваемые высокими Крымскими горами, в ряде случаев не ограничиваются только прибрежной зоной моря, но распространяются на значительные расстояния от берега – до 100–150 км. В работе при помощи численного моделирования с использованием модели региональной атмосферной циркуляции воспроизведены поля скорости ветра для нескольких характерных направлений фонового невозмущенного ветра.

Показано, что в весенне-летний период (апрель – июнь) в атмосфере над морем создаются условия, необходимые для блокирования потока воздуха, набегающего с юга на гряду Крымских гор. В результате формируется вдольбереговой поток и создается мезомасштабная зона возмущений скорости, распространяющаяся на расстояния до 100–150 км от берега.

Для случая действия северных ветров устойчивая стратификация в пограничном слое над сушей в районе Крыма в среднем наблюдается в течение всего года, кроме четырех летне-осенних месяцев (июнь – сентябрь). При этом могут также развиваться значительные возмущения скорости ветра, од-

нако они имеют более локальный характер: сконцентрированы непосредственно вблизи горного хребта и над подветренным склоном, где в узкой прибрежной зоне формируются возмущения скорости типа боры.

Рассмотрена статистика повторяемости этих двух случаев возмущений поля скорости приводного ветра, обусловленных наличием гор.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Физический механизм влияния гор на климат южного берега Крыма // *Метеорология и гидрология* (в печати).
2. Momentum Fluxes of Gravity Waves Generated by Variable Froud Number Flow over Three-Dimensional Obstacles / S. D. Eckermann [et al.] // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2010. Vol. 67. P. 2260–2278. <https://doi.org/10.1175/2010JAS3375.1>
3. *Grisogono B., Belušić D.* A review of recent advances in understanding the meso-and microscale properties of the severe Bora wind // *Tellus*. 2009. Vol. 61, iss. 1. P. 1–16. doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00369.x
4. *Lin Y.-L.* Mesoscale Dynamic. Cambridge : Cambridge University Press, 2007. 630 p. URL: <http://www.prometeus.nsc.ru/eng/exhibit/09/09-10-13/cont29f.ssi> (дата обращения: 23.11.2018).
5. *Smith R. B.* Hydrostatic Airflow over Mountains // *Advances in Geophysics*. 1989. Vol. 31. P. 1–41. doi:10.1016/S0065-2687(08)60052-7
6. *Smith R. B.* On Severe Downslope Winds // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1985. Vol. 42, no. 23. P. 2597–2603. doi:10.1175/1520-0469(1985)042<2597:OSDW>2.0.CO;2
7. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. Т. 1. М. : Мир, 1986. 396 с.
8. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Сезонная изменчивость и гидродинамические режимы новоземельской боры // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54, № 6. С. 684–698. doi:10.1134/S0002351518060056
9. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR technical note / W. C. Skamarock. Boulder, Colorado, USA : National Center for Atmospheric Research, 2008. 113 p. doi:10.5065/D68S4MVH
10. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828
11. *Ефимов В. В., Барабанов В. С.* Порывистость новороссийской боры // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 12. С. 68–75.
12. *Ефимов В. В., Барабанов В. С.* Моделирование черноморской боры // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 688–698. doi:10.7868/S0002351513060060
13. *Зац В. И., Лукьяненко О. Я., Яцевич Г. В.* Гидрометеорологический режим южного берега Крыма. Л. : Гидрометеоиздат, 1966. 120 с.
14. Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под ред. К. Т. Логвинова, М. Б. Барабаш. Л. : Гидрометеоиздат, 1982. 318 с.
15. Климатический атлас Крыма / Автор-составитель И. П. Ведь. Симферополь : Таврия-плюс, 2000. 118 с.

*Об авторах:*

**Ефимов Владимир Васильевич**, заведующий отделом взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: P-2063-2017**, **Scopus Author ID: 6602381894**, [vefim38@mail.ru](mailto:vefim38@mail.ru)

**Комаровская Ольга Иридиевна**, научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: G-1814-2019**, [komarovskaya@mhi-ras.ru](mailto:komarovskaya@mhi-ras.ru)