

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-6-24>

УДК 551.511.31+551.558.21

Исследование возникновения горных волн над Европейской территорией России и оценка возможности их прогнозирования для авиации с помощью модели COSMO-Ru6.6

***А.Р. Иванова, Н.И. Комасько,
Е.Н. Скриптунова, А.А. Завьялова***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
ivanova@mecom.ru*

Исследуется возможность образования горных волн над Европейской территорией Российской Федерации в период с мая по август 2023 года. Обсуждаются условия возникновения сильных нисходящих потоков и орографической турбулентности для четырех полигонов, включающих горные системы Урала, Северного Кавказа, Кольского полуострова и Крыма. Произведен анализ циркуляционных и термодинамических условий, благоприятных для генерации горных волн над ЕТР, на основе начальных и прогностических данных модели COSMO-Ru6.6. Оценена точность прогноза параметров, используемых в расчетах. Установлено, что в некоторых случаях умеренная турбулентность, отмеченная в самолётных наблюдениях AIREP Specі вблизи районов со сложным рельефом, могла иметь орографическую природу.

Ключевые слова: горные волны, сообщения пилотов, модель COSMO-Ru, орографическая турбулентность

Investigation of the mountain wave generation over the European part of Russia and assessment of forecasting capabilities for aviation using COSMO-Ru6.6 model

***A.R. Ivanova, N.I. Komasko,
E.N. Skriptunova, A.A. Zavialova***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
ivanova@mecom.ru*

The probability of the mountain wave generation over the European part of the Russian Federation in May–August 2023 is studied. The conditions for the occurrence of strong downdrafts and leeward orographic turbulence are discussed for 4 domains including the mountain systems of the Urals, the North Caucasus, the Kola Peninsula and Crimea. An analysis of circulation and thermodynamic conditions favorable for the generation of mountain waves over European Russia were calculated using the initial and forecast data of the COSMO-Ru6.6 model. The accuracy of forecasting the parameters used in the calculations was assessed. It was found that in some cases, moderate turbulence reported in AIREP Specі aircraft observations near the areas with complex terrain could be of orographic nature.

Keywords: mountain waves, pilot reports, COSMO-Ru model, orographic turbulence

Введение

Орографические гравитационные волны, иначе называемые горными волнами (ГВ), являются следствием деформации устойчиво стратифицированного воздушного потока, натекающего на препятствие [17], и одним из механизмов обмена количеством движения между земной поверхностью и атмосферой [16]. Горные волны, распространяющиеся по вертикали, называются стационарными. Те, которые распространяются по горизонтали на подветренной стороне хребта, обычно именуются «захваченными» («trapped waves») или просто «подветренными» («lee waves»). Характеристики горных волн, условия их возникновения и некоторые аспекты их моделирования подробно описаны в обзоре [3].

Для авиации информация о горных волнах имеет особое значение. Еще в 1958 г. Всемирной метеорологической организацией был выпущен документ «Авиационные аспекты горных волн» [14], в котором приводился анализ случаев влияния ГВ на летательные аппараты и формулировались некоторые особые подходы к прогнозированию. Основными негативными аспектами воздействия ГВ на воздушное судно оказались интенсивные нисходящие потоки и возникающая на подветренной стороне гор сильная турбулентность. Зафиксированные по данным наблюдений вертикальные скорости нисходящих движений достигали в некоторых горных регионах 10–12 м/с. Подобные потоки способны привести к столкновению воздушного судна с поверхностью в районе со сложной орографией, поскольку пилоту в этих условиях может не хватить времени на исправление ситуации. Турбулентность, связанная с роторными облаками на подветренной стороне орографического препятствия, несколько раз приводила к авиационным происшествиям и даже катастрофам – настолько были велики нагрузки на элементы конструкции самолета. В катастрофе Боинга-707 в марте 1966 г. на подветренной стороне Фудзиямы, когда погибли 113 пассажиров и 11 членов экипажа, пиковые нагрузки при попадании в область роторной турбулентности, как оказалось, составили +9g и -4g. По информации совета по безопасности на транспорте США, в период 1990–2017 гг. было зафиксировано 42 авиационных происшествия, вызванных орографической турбулентностью, из них 16 случаев со смертельным исходом [19].

Учитывая опасность горных волн для полетов, Международная организация гражданской авиации (ИКАО) требует обязательного включения информации о текущем и прогностическом наличии горных волн умеренной и сильной интенсивности в сообщениях AIRMET и SIGMET [7].

Постановка задачи и используемые материалы

Разнообразие рельефа нашей страны позволяет сделать заключение, что основные проблемы, связанные с горными волнами, следует ожидать в ее азиатской части. Однако и на Европейской территории России (ЕТР) существуют горные системы, которые при определенных циркуляционных

и термодинамических условиях в данном районе способны порождать ГВ. В ряде работ описаны случаи возникновения орографических возмущений атмосферы, генерируемых на подветренной стороне Уральского хребта [2, 11], Крымских [1, 5, 6, 12] и Кавказских гор [13].

Для настоящего исследования использовались следующие материалы:

– сведения об опасных явлениях, в т. ч. о горных волнах, над ЕТР по сообщениям пилотов (AIREP Speci) за период с 9 июня 2021 г. по 31 августа 2023 года.

– начальные данные на модельных уровнях конфигурации модели численного прогноза погоды COSMO-Ru-ENA [9] с шагом 6.6 км (COSMO-Ru6.6) за период с 1 февраля 2022 г. по 31 августа 2023 г. и прогностические поля трех компонентов скорости ветра, температуры и давления с заблаговременностью 6 и 12 ч за период с 11 мая по 31 августа 2023 года.

Цель работы состояла в поиске и анализе сообщений пилотов о горных волнах над ЕТР, анализе параметров индикации ГВ, рассчитанных на основе модельных данных, а также в оценке успешности прогноза этих параметров.

2. Анализ сообщений о горных волнах над ЕТР по данным наблюдений

Согласно определению [7], горную волну (Mountain Wave, MTW) следует считать:

а) сильной, если она сопровождается нисходящим потоком со скоростью 3,0 м/с (600 фут/мин) или более и/или наблюдается или прогнозируется сильная турбулентность;

б) умеренной, если она сопровождается нисходящим потоком со скоростью 1,75–3,0 м/с (350–600 фут/мин) и/или наблюдается или прогнозируется умеренная турбулентность.

Единственным источником фактической информации о наблюдаемых горных волнах и их интенсивности над территорией Российской Федерации служат специальные сообщения пилотов AIREP Speci. К сожалению, подобные сведения во многом субъективны и не всегда могут быть достоверными из-за сложной цепочки передачи информации по каналам связи, в том числе с включением голосовых сообщений.

Формат сводки AIREP Speci описан в [4]. Сообщение состоит из двух строк. В первой присутствует сокращение UA, далее указывается буквенное обозначение территории (RA – для азиатской территории Российской Федерации, RS – для европейской), номер бюллетеня (60–69 – об условиях погоды, 70–79 – о вулканическом пепле) и индекс ИКАО центра связи, рассылающего сообщение. Вторая строка начинается с аббревиатуры ARS (AiRep Special), содержит идентификатор воздушного судна, наблюдаемое явление, время его наблюдения, широту и долготу воздушного судна, эшелон полета.

Ниже приводится пример такого сообщения:

UARA61 RUHB 110415
ARS BAGABCD SEV MTW OBS AT 0515Z N5500E11040 FL180=

Расшифровка сообщения: «Специальное сообщение передано с борта ВС авиакомпании British Airways GABCD. Сильная горная волна отмечалась в 05.15 ч ВСВ. Сообщение относится к местоположению ВС на 55°00' с. ш., 110°40' в. д. на эшелоне 180 гектофутов (~ 5500 м)».

Всего за период с начала архивации сводок AIREP Specі – с 9 июня 2021 г. по 31 августа 2023 г. – было получено 57108 таких сообщений. Большинство из них (37396, или 65 %) относилось к наблюдаемой турбулентности, 19 % (10706) – к грозам, 16 % (9006) – к обледенению. В это время информация о горных волнах умеренной и сильной интенсивности над европейской территорией нашей страны ни разу не была зафиксирована. Однако это не означает, что горные волны над ЕТР в реальности отсутствовали, они просто могли быть не замечены из-за недостатка наблюдений.

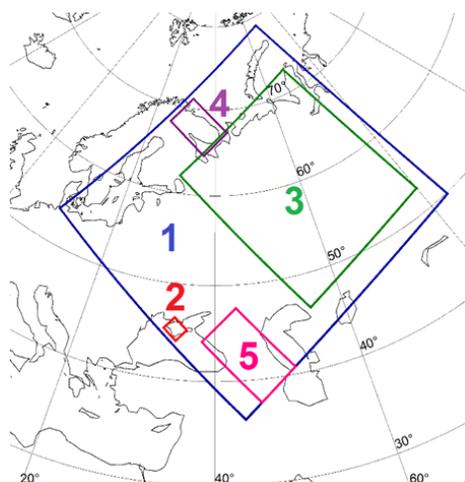
После пандемийного периода полного восстановления авиационного трафика так и не произошло. Наряду с этим, с начала специальной военной операции (то есть с конца февраля прошлого года) большинство аэродромов в южной части ЕТР оказались закрыты и полеты из/в них были приостановлены. По этой причине количество самолетных наблюдений над этой частью страны естественным образом уменьшилось. Кроме того, как следует из определения, приведенного выше, интенсивность горных волн подразумевает наличие нисходящих движений и/или областей турбулентности. Возможно, в части сообщений пилотов о турбулентности природа последней была орографической. Это тоже предстояло проверить. Допускаем также, что в течение упомянутого выше промежутка времени интенсивность горных волн над ЕТР была ниже умеренной и, следовательно, не фиксировалась в сообщениях AIREP Specі.

3. Выбор расчетных полигонов

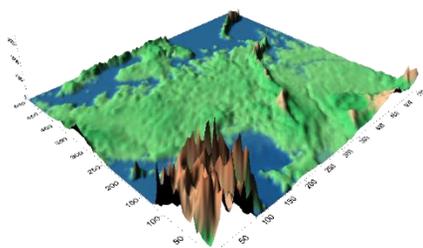
Для анализа возможного возникновения горных волн над Европейской территорией России на базе домена COSMO-Ru-ENA были выделены следующие области, включающие одну или несколько горных систем:

- ЕТР (550×500 узлов модельной сетки);
- Крымские горы (32×36 узлов);
- Уральские горы (300×350 узлов);
- Кольский п-ов, где расположены горные массивы Хибин, Ловозерские тундры, Чунагундра, Мончетундра и др. (70 ×100 узлов);
- горы Северного Кавказа (90×150 узлов).

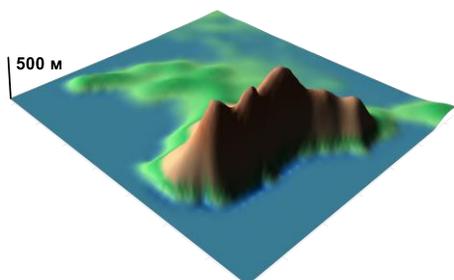
Графическое представление расчетных областей, а также модельная «маска» – орография каждого района в объемном виде изображены на рис. 1.



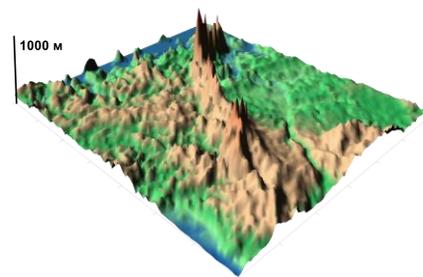
ЕТР



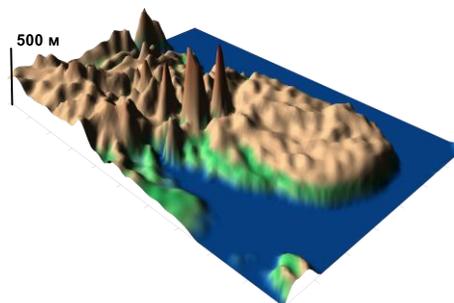
Крым



Урал



Кольский п-ов



Кавказ

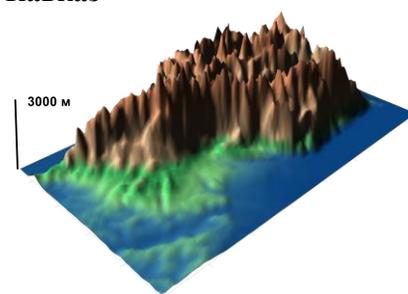


Рис. 1. Расчетные области модельной сетки: 1) ЕТР, 2) Крым 3) Урал, 4) Кольский п-ов, 5) Кавказ и их объемное представление в модельной орографии.

Fig. 1. Model grid domains for 1) European Russia 2) Crimea 3) Urals, 4) Cola Peninsula, 5) Caucasus and 3D-presentation of model relief.

4. Анализ расчетов, выполненных по начальным данным модели

Поскольку фактическая информация о наличии горных волн над ЕТР за исследуемый период отсутствовала, было принято решение провести анализ с применением некоторых индикаторов, способных указать на условия их возникновения. Как известно [8], горные волны могут возникать при условии:

- скорости ветра на высоте вершины порядка 8–10 м/с;
- направления потока, отклоняющегося от нормали по отношению к хребту не более чем на 30 градусов;
- устойчивости атмосферы на высотах, близких к вершине препятствия.

При этих условиях считается, что число Фруда, которое в задаче обтекания препятствий отражает связь между естественной длиной волны и шириной препятствия, близко к единице [3]. Для чисел Фруда, значительно превышающих 1, характерно образование зон роторной турбулентности на подветренной стороне горы.

В период с января по август 2023 г. на модельных уровнях анализировались скорость и направление ветра, рассчитывались частота Брента – Вайсяля и число Фруда. Расчет проводился на основании анализа модельной орографии для каждого участка хребта каждого расчетного полигона. На рис. 2 показано направление потоков, перпендикулярных таким участкам (для Крыма были учтены оба направления, так как ГВ, возникающие при потоках, перпендикулярных как одной, так и другой стороне хребта, будут относиться к Европейской территории России). При наблюдении перечисленных выше условий строились разрезы вертикальной скорости на подветренной стороне препятствия для обнаружения в них периодических структур со сменой знака.

Пример захваченных волн в поле вертикальной скорости представлен на рис. 3. Здесь, на подветренной стороне Уральских гор, в нижнем слое обнаружены квазипериодические структуры, напоминающие захваченные волны с длиной около 20 км (примерно 3 шага сетки). Скорость нисходящих движений, характеризующих интенсивность волны, для представленного случая оказалась невелика: максимум составляет 0,16 м/с.

Отметим, что за период исследования количество подобных случаев, когда число Фруда для натекающего на препятствие потока нужной ориентации и интенсивности оказывалось близким к 1, невелико, а поле вертикальной скорости весьма редко соответствует классической «волновой» картине. Тем более невозможно воспроизведение роторов и суброторов под гребнями подветренных волн, поскольку для этого потребовалось бы моделирование на сетке с шагом, не превышающим нескольких сотен метров [18].

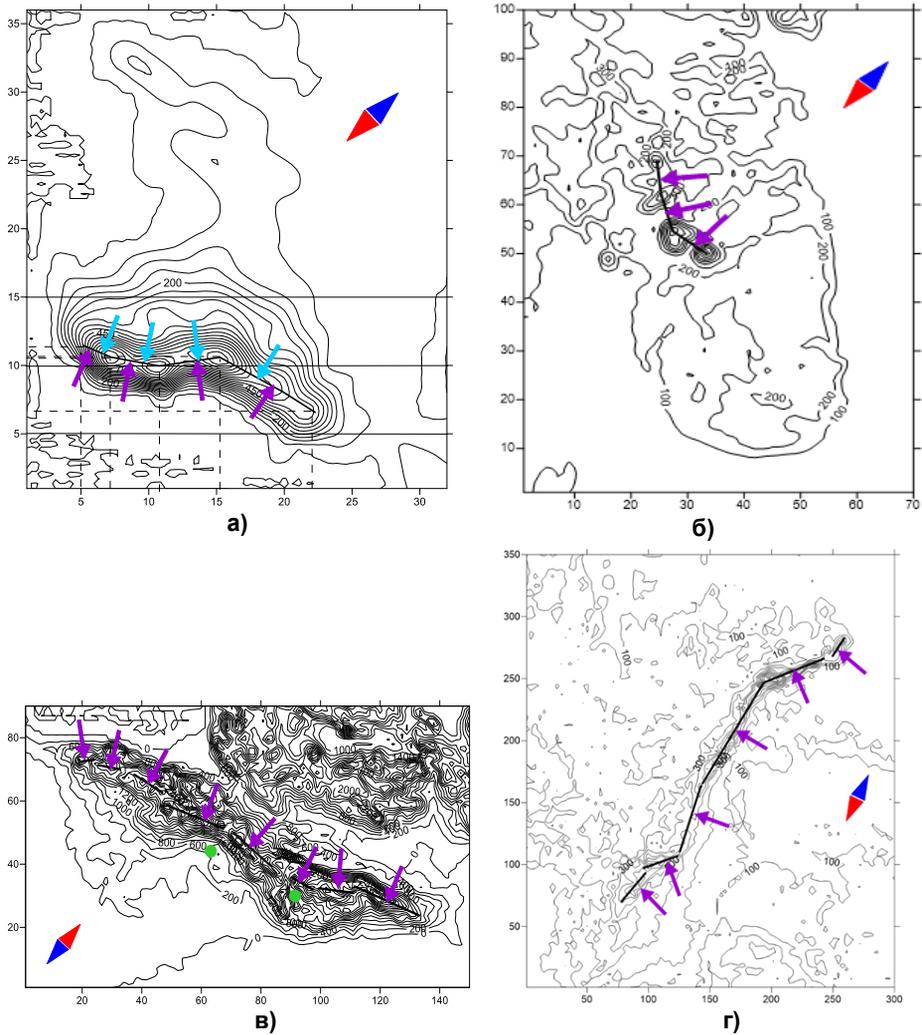


Рис. 2. Карты высот модельной орографии в районе: Крыма (а); Кольского п-ова (б); Кавказа (в); Уральских гор (г). Стрелками указано направление потоков, перпендикулярных участкам горных хребтов (черные отрезки). Цифры на осях соответствуют количеству узлов сетки модели (шаг 6.6 км).
Fig. 2. Model terrain heights for Crimea (а); Cola Peninsula (б); Caucasus (в); Urals (г). The arrows indicate the direction of cross flows to sections of mountain ridges (black segments). The digits on the axes correspond to the number of model grid points (grid step is 6.6 km).

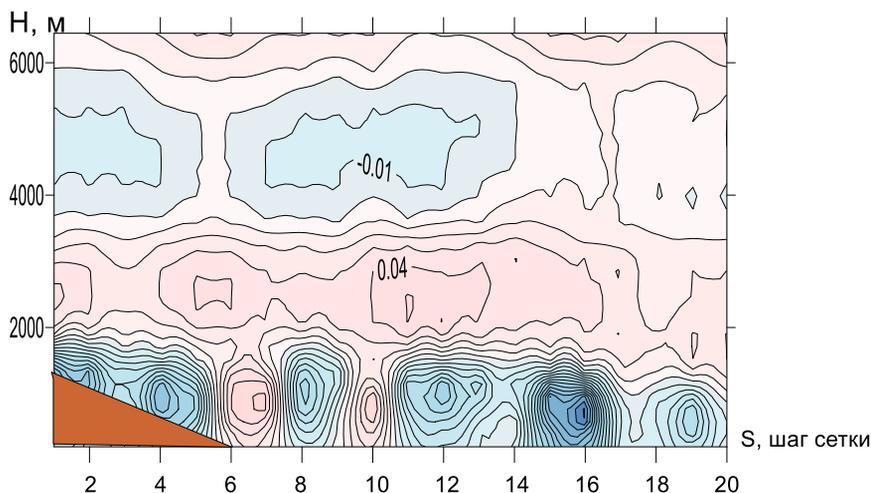


Рис. 3. Разрез вертикальной скорости на подветренной стороне Уральского хребта 19 марта 2023 г. 00 ч ВСВ (внизу). Цифры на горизонтальной оси означают количество шагов сетки от узла, соответствующего вершине хребта.

Fig. 3. Vertical velocity cross-section at leeward side of the Urals 19.03.2023 00 UTC. The digits at abscissa are grid-step numbers from the gridpoint corresponding to the top of the ridge.

Кроме того, по архивным данным было выполнено исследование повторяемости потоков, способных переваливать через орографическое препятствие (отличие направления от перпендикуляра к линии хребта не более 30 градусов, скорость ветра более 8 м/с). Данные для различных горных систем за период с февраля 2022 г. по август 2023 г. приведены в табл. 1.

Таблица 1. Повторяемость ветра (в %), благоприятного для образования горных волн над ЕТР (перпендикулярный к хребту поток, отличие направления не более чем на 30 градусов) для различных горных систем в период с февраля 2022 г. по август 2023 г.

Table 1. Frequency of flows (%) favorable for the mountain wave generation over the European Russia (flow perpendicular to the ridge, direction difference of no more than 30 degrees) for various mountain systems in the period from February 2022 to August 2023

Регион	Скорость ветра, м/с				N1	N2	P,%
	< 5	5,0–7,9	8,0–9,9	≥ 10			
Крым, с юга	77,9	17,2	3,6	1,3	31029	180600	17,2
Крым, с севера	80,9	15,7	2,5	0,9	20856	166152	12,6
Урал	78,1	16,1	3,4	2,4	296105	1827672	16,2
Кольский п-ов	73,5	19,5	5,8	4,0	23253	195048	11,9
Кавказ	78,9	18,3	2,0	0,8	442919	837984	53,0

Примечание. N1 – число случаев подходящего направления; N2 – общее число случаев; P – процент N1 от N2.

Отметим, что потоки подходящего направления (параметр P в таблице) чаще всего наблюдаются в регионе Кавказских гор (в среднем в 53 % случаев, в сентябре 2022 г. наблюдался максимум – 67,7 %). Для этих потоков, как правило, характерны небольшие скорости: всего в 0,8 % случаев они превышают 10 м/с.

Напротив, при малой повторяемости ветров, перпендикулярных участкам «модельных» хребтов на Кольском полуострове, почти в 10 % случаев они достигают скоростей, благоприятных для потенциальной генерации ГВ (>8 м/с).

5. Качество прогноза модельных параметров, ответственных за воспроизведение характеристик горных волн

Успешность симуляции горных волн в модели численного прогноза погоды, очевидно, определяется качеством воспроизведения определенных циркуляционных и термодинамических условий атмосферы, зависящих от корректности прогноза различных модельных параметров. Задача заключалась в том, чтобы проверить, насколько хорошо воспроизводятся в модельном прогнозе данные параметры и условия. Для этого сравнивались значения в узлах сетки по начальным и прогностическим данным в конкретный срок. Следовало также оценить качество прогноза интенсивности горных волн, выражаемой через скорость нисходящих потоков или орографическую турбулентность.

С этой целью была выполнена проверка качества прогноза модуля скорости и направления ветра, а также положительных значений квадрата частоты Брента-Вяйсяля, характеризующих устойчивое состояние атмосферы. Расчеты производились для всей территории ЕТР и каждого исследуемого региона. Успешность прогноза оценивалась для заблаговременностей 6 и 12 ч для каждого из регионов, представленных на рис. 1.

Скорость горизонтального потока

Для анализируемого периода (май–август 2023 г.) модель практически везде завывшала скорость ветра в нижнем километровом слое при прогнозе как на 6 ч, так и на 12 ч (табл. 2). При этом отклонение от среднего значения для «умеренного» ветра (скорость от 5 до 10 м/с) не возрастает с увеличением прогноза, а порой становится меньше. Средняя квадратическая ошибка увеличивается с ростом заблаговременности и с увеличением скорости ветра и оказывается максимальной для региона Кавказа (2,7 м/с при прогнозе на 12 ч для $V > 10$ м/с).

Направление потока

В целом для Европейской территории России примерно в половине случаев направление ветра в прогнозе и анализе для одного и того же срока отличается не более чем на 10 градусов (табл. 3). При этом значительные

ошибки направления ветра, превышающие 30 градусов, составляют 10.7 и 15.8 % в прогнозе на 6 и 12 ч соответственно. Минимальный процент ошибок в данной градации отмечается для Кольского полуострова, максимальный – для Кавказского региона. Однако для последнего домена характерен самый большой процент незначительных ошибок (0–10 град) в сравнении с прочими территориями. Отметим также, что для горных регионов, в отличие от ЕТР, процент незначительных ошибок направления ветра в прогнозе на 12 ч выше, чем в прогнозе на 6 ч.

Таблица 2. Средняя арифметическая и средняя квадратическая ошибки значений модуля скорости ветра, V , при прогнозе на 6/12 ч в мае-августе 2023 г. на модельных уровнях в нижнем километровом слое

Table 2. Bias and root mean square error of the wind speed module, V , for forecast projection 6/12 hours in May-August 2023 at model levels in the lowest 1-km layer

Регион	Скорость ветра, V , м/с			
	<5	5-8	8-10	>10
Средняя арифметическая ошибка, м/с				
ЕТР	0.6/0.6	0.5/0.4	0.3/0.2	0.2/0.0
Крым	0.7/0.8	0.7/0.7	0.7/0.6	0.5/0.4
Урал	0.5/0.6	0.4/0.4	0.3/0.2	0.1/-0.1
Кольский п-ов	0.5/0.7	0.4/0.4	0.4/0.3	0.2/0.2
Кавказ	0.9/1.0	0.7/0.6	0.6/0.5	0.6/0.6
Средняя квадратическая ошибка, м/с				
ЕТР	1.4/1.6	1.4/1.7	1.5/1.8	1.7/2.0
Крым	1.6/1.8	1.8/2.0	1.7/1.9	1.6/1.9
Урал	1.2/1.4	1.4/1.6	1.4/1.7	1.5/1.9
Кольский п-ов	1.3/1.6	1.5/1.7	1.5/1.8	1.5/1.7
Кавказ	1.8/2.0	2.0/2.2	2.0/2.4	2.2/2.7

Таблица 3. Успешность прогноза на 6/12 ч направления ветра в мае-августе 2023 г. (процент отличия значения в анализе и прогнозе не более чем на Δ , град) на модельных уровнях в нижнем километровом слое

Table 3. Forecast accuracy (projection is 6/12 hours) of wind direction in May-August 2023 (percentage of difference between the values in the initial and prediction data doesn't exceed Δ , deg) at the model levels in the lowest 1-km layer

Регион	Δ , град				
	Штиль	0-10	11-20	21-30	≥ 30
ЕТР	0,02/0,02	58,7/50,1	22,3/23,8	8,2/10,4	10,7/15,8
Крым	0,03/0,03	14,0/19,4	55,1/47,3	21,9/22,7	9,0/10,7
Урал	0,03/0,02	9,5/14,8	59,6/50,5	22,8/24,3	8,2/10,4
Кольский	0,01/0,01	8,6/12,5	61,4/54,3	22,2/23,6	7,8/9,6
Кавказ	0,05/0,05	27,8/32,8	39,5/34,3	21,2/20,7	11,5/12,1

Температурная стратификация

Оценка прогноза устойчивости атмосферы, характеризующейся положительными значениями квадрата частоты Брента–Вяйсяля, представлена в табл. 4. Повторяемость условия $N^2 > 0$ в исследуемый теплый период превышает 60 % во всех районах со сложной орографией и оказывается максимальной для Крымского региона (75,8 %). При такой высокой вероятности значения критериев Пирса и Хайдке оказываются весьма близки и при оценке 6-часового прогноза меняются в диапазоне от 0.66 для Кольского полуострова до 0.8 для Кавказского региона. Для прогноза на 12 ч эти величины уменьшаются примерно на 0.03, оставаясь довольно высокими, чтобы подтвердить успешность прогноза.

Таблица 4. Успешность прогноза на 6/12 ч термической устойчивости атмосферы (условия $N^2 > 0$) в мае-августе 2023 г. в модели COSMO-Ru6.6 на модельных уровнях в нижнем километровом слое

Table 4. Parameters of skill score prediction (projection is 6/12 h) for the atmospheric thermal stability ($N^2 > 0$) in May-August 2023 model at the COSMO-Ru6.6 model levels in the lowest 1-km layer

Регион	ПВ	ОН	ПН	PI	HI
ЕТР	66,6/66,8	91,1/90,3	94,4/94,2	0,76/0,74	0,77/0,76
Крым	75,8/75,9	92,3/91,7	95,0/94,7	0,70/0,68	0,73/0,70
Урал	62,9/63,0	90,2/89,4	94,2/93,9	0,77/0,75	0,78/0,74
Кольский п-ов	73,3/73,4	90,3/89,4	94,9/88,0	0,66/0,63	0,70/0,67
Кавказ	67,2/67,4	92,8/92,0	94,4/94,5	0,79/0,77	0,80/0,79

Примечание. ПВ – повторяемость явления; ОН – оправдываемость наличия явления; ПН – предупредительность наличия явления; PI – индекс Пирса; HI – индекс Хайдке.

Вертикальная скорость

В ходе выполнения исследования при построении разрезов вертикальной скорости по данным на модельных уровнях обращает на себя внимание значительное увеличение интенсивности вертикальных движений в прогностических полях по сравнению с анализом, особенно для заблаговременности 6 ч. В приведенном примере на рис. 4 это хорошо заметно в нижней половине тропосферы до высоты примерно 5 км. Выше характер вертикальных движений (более слабых в начальных данных) может существенно отличаться в анализе и прогнозе.

Увеличение значений вертикальной скорости в прогностических данных подтверждается информацией табл. 6 и 7. В табл. 6 для разных регионов представлена доля вертикальных скоростей «незначительных» вертикальных движений (модуль вертикальной скорости w менее 5 см/с). Эта

доля оказалась максимальной не для ЕТР, а для домена, включающего Уральские горы. Впрочем, это объяснимо: для расчетной области, представленной на рис. 1, узкая горная цепь расположена квазидиагонально: большой процент территории занимают равнины, над которыми не происходит орографическая деформация горизонтального потока с генерацией вертикальных движений.

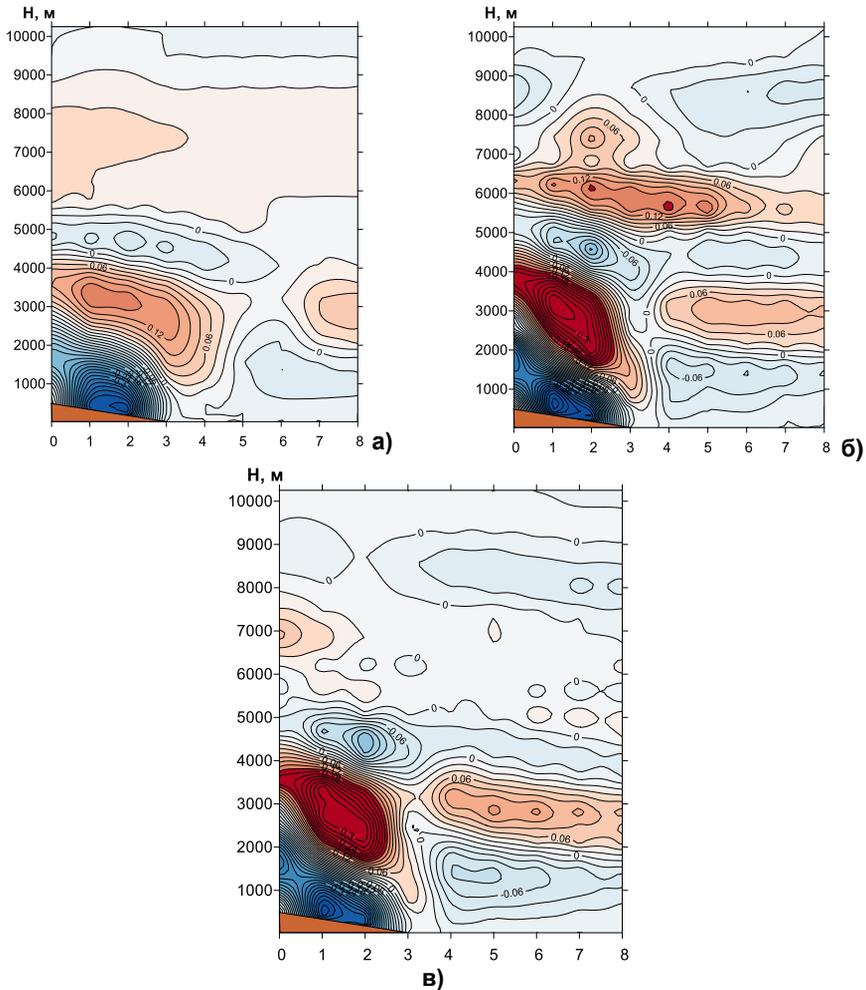


Рис. 4. Поле вертикальной скорости над Крымскими горами 7.02.2023 12 ч ВСВ в модели COSMO-Ru6.6: в начальных данных (анализ) (а); в прогнозе на 6 ч (б); в прогнозе на 12 ч (в). Цифры на горизонтальной оси означают количество шагов сетки от узла, соответствующего вершине хребта.

Fig. 4. Vertical velocity cross-section over the Crimean Mountains on February 7, 2023, 12 UTC in the COSMO-Ru6.6 model: initial data (analysis) (a); 6-h forecast (б); 12-h forecast (в). The digits at abscissa are grid-step numbers from the gridpoint corresponding to the top of the ridge.

Наибольшая доля величин w , превышающих по модулю 5 см/с, наблюдается в Кавказском регионе. Отметим увеличение процентного содержания как восходящих, так и нисходящих движений ($|w| > 0.05$ м/с) с увеличением заблаговременности прогноза. В среднем для ЕТР количество таких случаев в прогнозе на 6 ч увеличивается более чем в 3 раза в сравнении с начальными данными, а для Уральского региона – в 5 раз.

Таблица 6. Доля (%) значений вертикальной скорости, w , в начальных и прогностических данных модели COSMO-Ru6.6 в мае-августе 2023 г. для ЕТР и регионов

Table 6. Part (in %) of vertical velocity values, w , in the initial and forecast data of the COSMO-Ru6.6 model in May-August 2023 for European Russia and mountain regions

Регион	Вертикальная скорость, w , м/с		
	< -0.05	-0.05...0.05	> 0.05
Анализ			
ЕТР	1.7	96.4	1.9
Крым	3.6	92.6	3.8
Урал	1.1	97.9	1.0
Кольский п-ов	2.5	95.2	2.3
Кавказ	8.8	78.3	12.9
Прогноз на 6 ч			
ЕТР	5.9	88.1	6.0
Крым	8.3	84.0	7.8
Урал	5.4	89.4	5.2
Кольский п-ов	5.9	88.6	5.5
Кавказ	14.4	68.8	16.9
Прогноз на 12 ч			
ЕТР	6.4	87.3	6.3
Крым	8.6	83.5	7.9
Урал	5.8	88.5	5.6
Кольский п-ов	6.2	88.1	5.7
Кавказ	14.9	67.8	17.3

В табл. 7 произведена оценка успешности воспроизведения в модели нисходящих движений как возможного признака наличия горных волн. Отметим, что в течение мая–августа 2023 г. интенсивность таких движений не превышала по модулю 0.5 м/с как по начальным, так и по прогностическим данным для всех регионов, кроме Кавказа (там было зафиксировано несколько значений w в градации - 0.5...- 1.0 м/с). В табл. 7 различия в доле узлов с нисходящими движениями между прогнозами на 6 и 12 ч весьма малы. Зато разница между начальными данными и прогностическими с заблаговременностью 6 ч на этот же срок велика: процент узлов в анализе

оказывается меньше в 2–6 раз для нисходящих движений $w \leq -0.1$ м/с и на порядок для $w \leq -0.5$ м/с.

Таблица 7. Процент узлов с нисходящими движениями $w \leq -0.1/-0.5$ м/с на модельных уровнях в начальных и прогностических данных модели. Май–август 2023 г.

Table 7. Part (in %) of the gridpoints with downwards $w \leq -0.1/-0.5$ m/s at model levels in the model initial and forecast data. May-August 2023

	ЕТР	Крым	Урал	Кольский п-ов	Кавказ
Анализ	0.5/0.004	1.2/0.01	0.2/0.001	0.4/0.00005	3.4/0.02
Прогноз на 6 ч	1.7/0.03	2.7/0.1	1.2/0.01	1.1/0.001	6.7/0.2
Прогноз на 12 ч	1.8/0.03	2.8/0.1	1.3/0.01	1.1/0.002	7.0/0.2

Воспроизведение орографической турбулентности в модели

Наличие орографической турбулентности рассчитывалось согласно алгоритму, описание которого подробно представлено в [11]. Это реализация метода критической амплитуды (метод Макфарлина – Бакмайстера с дополнениями Макканна), который позволяет выделить зоны разрушения горных волн с образованием турбулентности с учетом волнового торможения. Пример подобных расчетов приведен на рис. 5. Отметим, что практика рутинного прогноза интенсивности орографической турбулентности для авиации, как правило, основана на более примитивных алгоритмах (например, произведение любого критерия турбулентности в ясном небе на параметр, характеризующий шероховатость поверхности) [15].

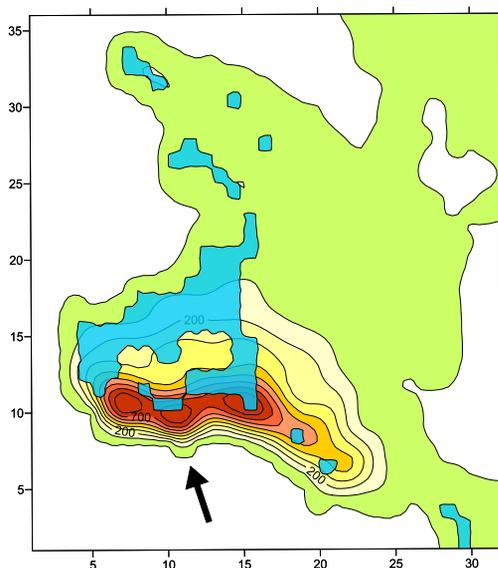


Рис. 5. Области орографической турбулентности (голубая заливка) на подветренной стороне Крымских гор (модельная орография) 17 мая 2023 г. 18 ч ВСВ. Черная стрелка показывает направление натекающего на хребет потока. Цифры на осях – количество узлов модельной сетки.

Fig. 5. Orographic turbulence areas (blue shading) on the leeward side of the Crimean Mountains (model terrain) May 17, 2023 18 UTC. The black arrow shows the direction of the flow crossing the ridge. The numbers on the axes indicate the number of model grid points.

Расчеты орографической турбулентности с использованием выходных данных на модельных уровнях в этой работе были выполнены для Крымского региона за период 1–31 августа 2023 г. Успешность прогнозов оказалась довольно высокой, хотя повторяемость явления, рассчитанная по начальным данным модели, составила около 10 % (табл. 8). При прогнозе на 6 и 12 ч оправдываемость наличия явления достигает 79,9 и 77,2 % соответственно. Критерий Хайдке, характеризующий качество прогноза редкого явления, оказался высоким, равным, соответственно, 0,81 и 0,77 для заблаговременностей 6 и 12 ч. Таким образом, модель весьма успешно спрогнозировала орографическую турбулентность, связанную с разрушением горных волн. Отметим, что для прогноза турбулентности, связанной с образованием роторов под гребнями захваченных волн, необходимо гораздо более тонкое разрешение модельной сетки [18].

Таблица 8. Успешность прогноза орографической турбулентности для Крымского региона в августе 2023 г.

Table 8. Parameters of skill score prediction (projection is 6/12 h) of orographic turbulence for Crimea in August 2023

Орографическая турбулентность	ПВ	ОН	ПН	PI	HI
Прогноз на 6 ч					
Наличие	10,6	79,9	86,9	0,84	0,81
Отсутствие	89,4	98,4	97,4	0,84	0,81
Прогноз на 12 ч					
Наличие	10,4	77,2	82,6	0,80	0,77
Отсутствие	89,6	98,0	97,2	0,80	0,77

Примечание. ПВ – повторяемость явления; ОН – оправдываемость наличия явления; ПН – предупреденность наличия явления; PI – индекс Пирса; HI – индекс Хайдке.

Подтвердить факт наличия орографической турбулентности по данным наблюдений оказалось невозможным по причинам, изложенным в п. 2. Однако была сделана попытка выделить из сообщений AIREP Spec1 о сильной и умеренной турбулентности именно те, в которых турбулентность могла иметь орографическую природу. Для этого был произведен анализ сообщений, переданных с борта воздушного судна вблизи горных хребтов. Проверялись потенциально благоприятные условия для возникновения горных волн (подходящие ориентация воздушного потока и стратификация атмосферы). При соблюдении подобных условий следовало исключить наличие других возможных источников турбулентности, таких как конвекция (для чего производилось вычисление уровня нейтральной плавучести) и области струйных течений (рассчитанных согласно алгоритму, изложенному в [10]).

В ходе исследования были обнаружены некоторые области вблизи Кавказского побережья, где сообщения пилотов об умеренной турбулентности передавались (в отсутствие конвекции и струйных течений) десятки раз. Проверка ориентации воздушных потоков и стратификации атмосферы позволила предположить, что в некоторых случаях эта турбулентность могла иметь орографическую природу. Пример подобных мест обозначен для региона Кавказ на рис. 2 двумя зелеными точками.

Выводы

Наличие горных волн умеренной и сильной интенсивности над европейской частью нашей страны в период 9.06.2021 – 31.08.2023 натурными наблюдениями отмечено не было. Тем не менее исследование полей вертикальной скорости по модельным данным в период с мая по август 2023 г. позволило установить, что при определенных условиях вблизи существующих горных систем над ЕТР (Уральские, Крымские, Кавказские горы, горы Кольского п-ова) могут образовываться структуры, визуально похожие на ГВ, не достигающие, однако, интенсивности, представляющей опасность для полетов воздушных судов. Такие структуры действительно возникают, как и следует из теоретических положений, при натекании на орографическое препятствие достаточно интенсивного воздушного потока при направлении, близком к нормали по отношению к хребту, и при устойчивой стратификации атмосферы на высотах, близких к высоте препятствия. Исследования показали, что перечисленные выше параметры, ответственные за возникновение ГВ (скорость и направление ветра, положительные значения частоты Брента – Вьяйсяля), вполне успешно прогнозируются в модели COSMO-Ru с шагом 6.6 км на сроки 6 и 12 ч. Отметим завышение скорости горизонтального потока в нижнем слое атмосферы в прогнозе для всей территории ЕТР и для областей со сложной орографией в частности. Что касается значений вертикальной скорости в нисходящих потоках, за исследуемый период они ни разу не достигали величин, характерных для интенсивности хотя бы умеренной ГВ, хотя в прогностических полях также оказывались выше, чем в начальных данных.

Орографическая турбулентность, связанная с разрушением ГВ, рассчитывалась по выходным данным модели с применением алгоритма, позволяющего оценить факт ее наличия или отсутствия. Успешность прогноза по модельным данным на срок 6 и 12 ч оказалась довольно высокой – индекс Хайдке для Крымского региона при повторяемости турбулентности около 10% составил 0,81 и 0,77 соответственно. Сравнение самолетных наблюдений за турбулентностью с расчетами орографической турбулентности по модельным данным позволило предположить, что некоторые из сообщений об умеренной турбулентности, переданные с борта самолетов во время полетов вблизи Кавказского побережья, могли быть связаны с разрушением горных волн.

Список литературы

1. *Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Том 35, № 2. С. 134-146. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-134-146.
2. *Зидлев Н.Н.* Теоретическая картина обтекания Северного Урала при учете устойчивой атмосферы // *Вестник МГУ. Серия 3. Физика, астрономия*. 1977. Т. 18, № 6. С. 42-50.
3. *Иванова А.Р.* О возникновении и возможности прогнозирования опасных для авиации горных волн // *Метеорология и гидрология*. 2024 (в печати).
4. *Инструктивный материал по кодам SIGMET и AIRMET* (Утвержден приказом Росгидромета № 95 от 20.02.2015 г.).
5. *Кожевников В.Н.* Моделирование орографических возмущений над горами Крыма // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Том 55, № 4. С. 49-57. <https://doi.org/10.31857/S0002-351555449-57>
6. *Кожевников В.Н., Моисеенко К.Б., Волков Б.И.* Обтекание гор при сдвиге скорости потока // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Том 52, № 6. С. 660-668.
7. *Метеорологическое обеспечение международной авионавигации*. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации: Издание 20-е. ИКАО, 2018. 230 с.
8. *Пчелко И.Г.* *Авиационная метеорология*. Л.: ГИМИЗ, 1963. 348 с.
9. *Ривин Г.С., Розинкина Е.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В. и др.* Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 4 (374). С. 37-53.
10. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М., Триада лтд, 2016. 312 с.
11. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А.* Прогноз орографической турбулентности по выходной продукции численной модели // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 1. С. 40-52.
12. *Шокуров М.В.* Численное моделирование атмосферной циркуляции над Черным морем // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2011. № 25-2. С. 91-113.
13. *Яровая Д.А., Шокуров М.В.* Мезомасштабные циклонические вихри, возникающие над Черным морем вблизи Кавказского побережья // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 3. С. 14-30.
14. *Aviation aspects of mountain waves*. Technical note No. 18 (prepared by M.A. Alaka, S.M., Ph.D) // WMO-No. 68. TP. 26. 1958.
15. *Kim J.-H., Sharman R., Strahan M., Scheck J.W., Bartholomew C., Cheung J.C.H., Buchanan P., Gait N.* Improvements in nonconvective aviation turbulence predictor for the World Area Forecast System // *Bull. Amer. Met. Soc.* 2018. Vol. 99, no. 11. P 2295-2311. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-01117.1>
16. *Kruse C.G., Smith R.B., Eckermann S.D.* The mid-latitude lower- stratospheric mountain wave “Valve layer” // *J. Atm. Sci.* 2016. Vol. 73. P. 5081-5100. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0173.1
17. *Smith R.B.* 100 years of progress of mountain meteorology research // *Meteorological Monographs*. 2019. Vol. 59. P. 20.1-20.73. DOI: 10.1175/AMSMONO-GRAPHS-D-18-0022.1

18. Udina M., Soler M.R., Sol O. A Modeling Study of a Trapped Lee-Wave Event over the Pyrénées // *Mon. Wea. Rev.* 2017. Vol. 145. P. 75-96. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0031.1

19. Veilett P. Mountain Wave Monsters And What They Can Do. Aviation week, 2020, May 22. Available at: <https://aviationweek.com/business-aviation/mountain-wave-monsters-what-they-can-do>

References

1. Efimov V.V., Komarovskaya O.I. Disturbances in the wind speed fields due to the Crimean mountains. *Physical Oceanography*, 2019, vol. 26, no 2, pp. 123-134.

2. Zidlev N.N. Teoreticheskaya kartina obtekaniya Severnogo Urala pri uchete ustojchivoj atmosfery. *Vestnik MGU. Seriya 3. Fizika, astronomiya*, 1977, vol. 18, no 6, pp. 42-50 [in Russ.].

3. Ivanova A.R. O vozniknovenii i vozmozhnosti prognozirovaniya opasnyh dlya aviatsii gornyh voln. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2024 (in print).

4. Instruktivnyj material po kodam SIGMET i AIRMET (Utverzhden prikazom Rosgidrometa № 95 ot 20.02.2015) [in Russ.].

5. Kozhevnikov V.N. Modeling of atmospheric disturbances over the Crimean mountains. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 344-351.

6. Kozhevnikov V.N., Volkov B.I., Moiseenko K.B. Flow over mountains with the stream velocity shear. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 587-595.

7. Meteorologicheskoe obespechenie mezhdunarodnoj aeronavigatsii. Prilozhenie 3 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviatsii: Izdanie 20-e. ICAO Publ, 2018. 230 s. [in Russ.].

8. Pchelko I.G. Aviacionnaya meteorologiya. Leningrad, GIMIZ Publ, 1963, 348 p. [in Russ.].

9. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeykin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications.

Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 37-53 [in Russ.].

10. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovanie meteorologicheskikh uslovij dlya aviatsii. Moscow, Triada ltd Publ, 2016, 312 p. [in Russ.].

11. Shakina, N.P., Skriptunova, E.N., Zav'yalova, A.A. Orographic Turbulence Forecasting from Numerical Model Output Data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, pp. 28-36. DOI: 10.3103/S1068373921010040.

12. Spokurov M.V. Chislennoe modelirovanie atmosfernoj cirkulyatsii nad Chernym morem. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2011, no. 25-2, pp. 91-113 [in Russ.].

13. Yarovaya D.A., Shokurov M.V. Mezomasshtabnye ciklonicheskie vihri, vozni-kayushchie nad Chernym morem vblizi Kavkazskogo poberezh'ya. *Morskoj gidrofizi-cheskij zhurnal*, 2012, no. 3, pp. 14-30 [in Russ.].

14. Aviation aspects of mountain waves. Technical note No. 18 (prepared by M.A. Alaka, S.M., Ph.D) // WMO-No. 68, TP. 26, 1958.

15. Kim J.-H., Sharman R., Strahan M., Scheck J.W., Bartholomew C., Cheung J.C.H., Buchanan P., Gait N. Improvements in nonconvective aviation turbulence predictor for the World Area Forecast System. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 2018, vol. 99, no. 11, pp. 2295-2311. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0117.1

16. Kruse C.G., Smith R.B., Eckermann S.D. The mid-latitude lower- stratospheric mountain wave “Valve layer”. *J. Atm. Sci.*, 2016, vol. 73, pp. 5081-5100. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0173.1

17. Smith R.B. 100 years of progress of mountain meteorology research. *Meteorological Monographs*, 2019, vol. 59, pp. 20.1-20.73. DOI: 10.1175/AMSMONO-GRAPHS-D-18-0022.1

18. Udina M., Soler M.R., Sol O. A Modeling Study of a Trapped Lee-Wave Event over the Pyrénées. *Mon. Wea. Rev.*, 2017, vol. 145, pp. 75-96. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0031.1

19. Veilett P. Mountain Wave Monsters And What They Can Do. Aviation week, 2020, May 22. Available at: <https://aviationweek.com/business-aviation/mountain-wave-monsters-what-they-can-do>

*Поступила 25.10.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.
Submitted 25.10.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.*