

# ПРОГНОЗ МЕХАНИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В НИЖНЕМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ АВИАЦИИ

*Н.П. Шакина, Е.Н. Скриптунова, А.Р. Иванова*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации  
chakina@metcom.ru*

## Введение

Основными факторами, обуславливающими развитие турбулентности в нижнем слое атмосферы, являются торможение воздушного потока вследствие трения вблизи поверхности Земли, различие в нагреве отдельных участков земной поверхности солнечной радиацией, а также деформация воздушного потока различными препятствиями. Соответственно, турбулентность, возникающая под действием перечисленных факторов, называется механической, термической и орографической турбулентностью [3]. Зачастую развитие турбулентности в реальных условиях происходит при одновременном воздействии более чем одного из указанных факторов.

В теплый период года отмечается преимущественно термическая турбулентность, а механическая фиксируется только при полетах на предельно малых высотах при скоростях ветра более 5 м/с. В холодный период большее значение приобретает механическая турбулентность. Она развивается при наличии сильных ветров (в частности, во фронтальных зонах), в условиях пересеченной местности и над поверхностями с большой шероховатостью (лесные массивы, городская застройка).

Причиной механической турбулентности является вертикальный сдвиг ветра, возникающий в результате трения в пограничном слое [2]. Поскольку скорость ветра у Земли приближается к нулю, – сдвиг ветра тем больше, чем сильнее ветер. Соответственно, тем более интенсивна механическая турбулентность. Кроме скорости ветра, интенсивность механической турбулентности зависит от шероховатости подстилающей поверхности и от устойчивости стратификации в нижнем слое: чем больше шероховатость, тем сильнее турбулизируется воздушный поток, причем в менее устойчивой атмосфере турбулентность развивается более интенсивно, чем в очень устойчивой. В последнем случае вертикальные порывы подавляются из-за необходимости тратить много энергии на работу против сил плавучести.

При метеорологическом обеспечении авиации необходимо прогнозировать все виды турбулентности, влияющей на полет воздушных судов как в нижнем слое, так и в свободной атмосфере. Количественный прогноз турбулентности в настоящее время осуществляется на основе продукции численных моделей атмосферы. Соответствующие схемы пост-процессинга разрабатываются применительно к конкретным численным моделям. В условиях Гидрометцентра России такой моделью является оперативно используемая мезомасштабная модель COSMO-Ru с шагом 7 км на области, включающей европейскую Россию и ближнее зарубежье. На базе выходных данных этой модели нами была разработана схема прогноза термической турбулентности [4]. Практически одновременно разрабатывалась и схема прогноза (расчета по прогностическим полям) механической турбулентности. В настоящей статье описаны алгоритм и конкретная реализация указанной схемы, а также полученные с ее помощью результаты прогноза.

### 1. Состояние вопроса

В Руководстве по прогнозированию метеорологических условий для авиации [1], изданном в 1985 году, механическая турбулентность определяется как турбулентность, возникающая вследствие приземного трения, приводящего к изменениям направления и скорости ветра, формированию профиля ветра с большими вертикальными градиентами и образованию вихрей. Интенсивность механической турбулентности прямо зависит от скорости воздушного потока и степени шероховатости поверхности. Прогноз механической турбулентности, согласно [1], предлагалось давать на основе прогноза ветра и данных о шероховатости. Зависимость вертикальных порывов  $w$ , вызывающих болтанку, от скорости ветра для нижнего 500-метрового слоя предлагалась в виде

$$w = K \cdot V, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость ветра у земли;  $K$  – коэффициент, зависящий от характера подстилающей поверхности и меняющийся от 0,14 до 0,53. В среднем предлагалось принимать  $K = 0,40$ . Интенсивность болтанки оценивалась по формуле:

$$\Delta n = 0,06 K \cdot V. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta n$  – приращение перегрузки самолета в долях  $g$ .

При попытке использовать цитированные рекомендации для прогноза по территории и для построения карты возникает проблема задания коэффициента  $K$  в узлах сетки на области. Использование среднего значения  $K$  позволяет получить лишь грубые приближенные оценки.

Современные численные прогностические модели содержат, в частности, информацию о свойствах подстилающей поверхности с достаточно высоким горизонтальным разрешением. Кроме того, накопленный за последние 15–20 лет мировой опыт открывает возможности более точного, в сравнении с [1], расчета интенсивности механической турбулентности на основе продукции численных моделей [6].

Пограничный слой модельной атмосферы считается турбулентным, причем турбулентность в нем описывается классической теорией турбулентности в стратифицированном слое. Важнейшей причиной турбулизации пограничного слоя является сдвиг ветра. Турбулентное течение характеризуется наличием потоков свойств – количества движения, тепла и влаги, – рассчитываемых через турбулентные пульсации. Механическая турбулентность определяется интенсивностью турбулентных пульсаций вертикальной и горизонтальной составляющих скорости частиц; эти же пульсации определяют и поток количества движения. Поэтому целесообразно рассматривать турбулентный поток количества движения как характеристику интенсивности механической турбулентности [8].

Поток количества движения у земли  $M$  определяется выражением:

$$M = \rho \cdot C_D \cdot V^2, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $C_D$  – коэффициент торможения воздушного потока, зависящий, в частности, от свойств подстилающей поверхности.

В зависимости от структуры конкретной прогностической модели, в ней рассчитываются либо  $C_D$ , либо непосредственно  $M$ . Так, в модели COSMO-Ru7 выполняется расчет коэффициента торможения. Рассмотрим вкратце процесс этого расчета.

На поверхности Земли ( $sfc$ ) потоки  $\tau$  количества движения по осям  $x$  и  $y$  определяются известными соотношениями

$$\begin{aligned} \tau_{sfc}^{13} &= -\rho C_D |\vec{V}_h| u, \\ \tau_{sfc}^{23} &= -\rho C_D |\vec{V}_h| v, \end{aligned} \quad (4)$$

где через 1, 2, 3 обозначены оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно;  $u$ ,  $v$  – составляющие скорости ветра по осям  $x$ ,  $y$  соответственно;  $\rho$  – плотность воздуха;  $|\vec{V}| = (u^2 + v^2)^{1/2}$  – модуль скорости ветра; все величины берутся на нижнем уровне  $h$  над подстилающей поверхностью.

Потоки свойств, согласно теории подобия Монина – Обухова, постоянны в пределах приземного слоя. На этом основании можно вычислить

объемный коэффициент торможения  $C_D$ , выразив его через характеристики приземного слоя. Так, производная скорости ветра по  $z$  вблизи подстилающей поверхности представима в виде

$$\frac{d}{dz} |\vec{V}_h| = \frac{u_*}{kz} \Phi_m(\xi), \quad (5)$$

где  $k$  – постоянная Кармана;  $u_*$  – скорость трения:

$$u_* = \left[ \left( \frac{\tau_{sfc}^{13}}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{sfc}^{23}}{\rho} \right)^2 \right]^{1/4}; \quad (6)$$

$\Phi_m$  – функция профиля, зависящая от безразмерной высоты  $\xi = z/L$ , где  $L = (\theta u_*^2 / kg\theta_*)$  – масштаб длины Монина – Обухова;  $\theta_*$  – масштаб температуры в приземном слое:

$$\theta_* \equiv - \frac{1}{\rho c_{pd} \pi_{sfc}} \frac{H_{sfc}^3}{u_*}. \quad (7)$$

В (7) обозначено:  $c_{pd}$  – теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении;  $\pi_{sfc}$  – безразмерное давление у земли;  $H_{sfc}$  – поток ощутимого тепла у земли.

Вид функции профиля определяется согласно Бузингеру [5] и Дайеру [7], которые на основании полевых измерений независимо сформулировали следующие соотношения для устойчивой, нейтральной и неустойчивой стратификации:

$$\begin{aligned} \Phi_m &= 1 + 4,7\xi, \text{ если } \xi > 0 \text{ (устойчивость),} \\ &= 1, \text{ если } \xi = 0 \text{ (нейтральная стратификация),} \\ &= (1 - 15\xi)^{-1/4}, \text{ если } \xi < 0 \text{ (неустойчивость).} \end{aligned} \quad (8)$$

Используя это аналитическое представление  $\Phi_m$ , можно проинтегрировать (5) по  $z$  от  $z_0$  до уровня  $h$ , в качестве которого используется нижний уровень модели, лежащий внутри приземного слоя атмосферы. После интегрирования получим

$$\frac{|\vec{V}_h|}{u_*} = \frac{1}{k} \left\{ \ln \left( \frac{h}{z_0} \right) + \Psi_m \left( \frac{h}{L}, \frac{z_0}{L} \right) \right\}. \quad (9)$$

Здесь  $\Psi_m$  – проинтегрированная функция  $\Phi_m$ :

$$\begin{aligned}
\Psi_m(h/L, z_0/L) &= 4/7 (h/L - z_0/L), \text{ если } L > 0 \text{ (устойчивость),} \\
&= 1,0, \text{ если } L = 0 \text{ (нейтральная стратификация),} \\
&= -2 \ln\{(1+x)/(1+x_0)\} - \ln\{(1+x^2)/(1+x_0^2)\} + \\
&\quad + 2 \operatorname{arctg} x - 2 \operatorname{arctg} x_0, \text{ если } L < 0 \text{ (неустойчивость).}
\end{aligned} \tag{10}$$

В (10) обозначено:  $x = (1 - 15h/L)$ ;  $x_0 = (1 - 15z_0/L)$ .

Из (9) и параметрического соотношения для приземных напряжений получаем следующее соотношение для коэффициента торможения  $C_D$ :

$$C_D = \frac{u_*^2}{|\vec{V}_h|^2} = k^2 \left\{ \ln \frac{h}{z_0} + \Psi_m \left( \frac{h}{L}, \frac{z_0}{L} \right) \right\}^{-2}. \tag{11}$$

В реальности в модели COSMO напряжения трения оцениваются по полю ветра раньше, чем применяется (11). Это затрудняет расчет, потому что в (11) входят как  $u_*$ , так и  $\theta_*$ , через которые определяется  $L$ , и результирующие уравнения приходится решать методом итераций, что является неэкономичным. Эта трудность обходится путем использования числа Ричардсона  $Ri$  вместо  $L$  в качестве параметра устойчивости. Число  $Ri$  легко вычисляется по профилям ветра и температуры. Практически в качестве параметра устойчивости используется конечно-разностный аналог числа Ричардсона ("объемное  $Ri$ "):

$$Ri_B = \frac{g}{\theta_{sfc}} \frac{(\theta - \theta_{sfc})(h - z_0)}{(u^2 + v^2)}. \tag{12}$$

В этом случае для коэффициента торможения предлагается выражение, формально схожее с (11):

$$C_D = C_{Dn} f_m \left( Ri_B, \frac{h}{z_0} \right). \tag{13}$$

Здесь  $C_{Dn}$  – коэффициент торможения при нейтральной стратификации, а  $f_m$  – функции устойчивости, которые аппроксимируют итерационные решения для стратификации, отличной от нейтральной. Для нейтральной стратификации

$$C_{Dn} = k^2 \left\{ \ln \left( \frac{h}{z_0} \right) \right\}^{-2}. \tag{14}$$

Критическое число  $Ri$ , которое представляется как граничное между ламинарными и турбулентными течениями, не вводится. Считается, что с ростом  $Ri$  турбулентность асимптотически затухает.

Аналитическое выражение для  $f_m$  взято таким же, как и в модели ECMWF. При статически устойчивом приземном слое

$$f_m = \frac{1}{1 + 2bRi_B(1 + dRi_B)^{-1/2}}, \quad (15)$$

при неустойчивой стратификации ( $Ri_B < 0$ )

$$f_m = 1 + \frac{2b|Ri_B|}{1 + 3bcC_{Dn} \left\{ \left( \frac{h}{z_0} \right)^{1/3} - 1 \right\}^{3/2} \sqrt{|Ri_B|}}. \quad (16)$$

Здесь включен предельный случай свободной конвекции:  $|\vec{V}_h| \rightarrow 0, Ri_B \rightarrow \infty$ .

Значения используемых в модели постоянных величин:

$$k = 0,4; b = c = d = 5,0. \quad (17)$$

Приведенные соотношения используются для узлов сетки, расположенных на суше. Для узлов, расположенных на водной поверхности, применяется та же процедура, со следующими изменениями. Для случая неустойчивой стратификации ( $Ri < 0$ ) знаменатель функции  $f_m$  представляется в более простом виде:

$$f_m = 1 + \frac{2b|Ri_B|}{1 + 3bcC_{Dn} \left( \frac{h}{z_0} \right)^{1/2} \sqrt{|Ri_B|}}. \quad (18)$$

В противоположность суше, шероховатость открытой водной поверхности зависит от волнения, а значит – от ветра. В модели COSMO для расчета  $z_0$  используется модифицированная формула Чарнока:

$$z_0 = \frac{\alpha_c}{g} \max(u_*^2, w_*^2) \quad (19)$$

при  $\alpha_c = 0,0123$ . Здесь

$$w_* = \left[ \frac{g(h - z_0)}{\rho c_{pd} T_{sfc}} H_{sfc}^3 \right]^{1/3} \quad (20)$$

– масштаб скорости восхождения при свободной конвекции.

В (20) входит  $z_0$ . Решение получающегося уравнения (методом итераций) снова оказывается неэкономичным. Вместо этого  $w_*$  рассчитывается

при значении  $z_0$ , взятом с предыдущего шага по времени. Затем из (19) определяется  $z_0$  на текущем шаге. В начальный же момент оценка  $z_0 = z_0^i$  получается из эмпирической формулы, в которую входит скорость ветра на уровне 10 м.

Для водных поверхностей, покрытых льдом, принимается постоянное значение  $z_0 = 0,001$  м.

В рамках модели производится расчет коэффициента торможения  $C_D$  в каждом узле сетки согласно (13), (14), где  $z_0$  определяется, как изложено выше. Таким образом,  $C_D$  на каждом шаге по времени зависит не только от вида подстилающей поверхности, но и от полей ветра и температуры (т. е. от вертикальной стратификации в нижнем слое модели). Получаемые значения  $C_D$  записываются в специальный файл и затем используются для расчета потока момента согласно (3). От рассчитанных потоков момента  $M$  в паскалях переходим к интенсивности болтанки согласно табл. 1.

**Таблица 1.** Эмпирические соотношения (передаточная функция) между величинами потока количества движения  $M$  и интенсивностью механической турбулентности [9]

Значения $M, Pa$	Интенсивность турбулентности
0,50 – 0,75	слабая (1)
0,75 – 1,5	умеренная (2)
1,6 – 3,0	сильная (3)
> 3,0	очень сильная (4)

## 2. Расчеты механической турбулентности и их анализ

Расчет механической турбулентности по выходным данным численных моделей с использованием формул раздела 1, начиная с (3), возможен только в том случае, если в модели выполняется расчет коэффициента торможения. Из имеющихся в оперативном использовании моделей такой расчет выполняется только в модели COSMO. Более примитивный расчет механической турбулентности с помощью выражения (1) можно выполнять, если имеется информация о характере подстилающей поверхности, либо, в случае отсутствия такой информации, получать приближенные оценки при среднем значении  $K = 0,4$ . Другой способ приближенной оценки в свое время использовался в метеослужбе Канады (табл. 2).

Располагая продукцией COSMO-Ru7, мы воспользовались модельными полями  $C_D$  для расчета интенсивности механической турбулентности. В каждом узле сетки по значениям коэффициента торможения  $C_D$  и со-

ставляющих приземного ветра при среднем значении плотности воздуха  $\rho = 1,4 \text{ кг/м}^3$  рассчитывается поток количества движения  $M = \rho C_D V^2$  в паскалях ( $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$ ). Результат сопоставляется с пороговыми значениями  $M$  из табл. 1 и таким образом определяется расчетная интенсивность механической турбулентности.

**Таблица 2.** Приблизительная оценка интенсивности механической турбулентности [9]

Приземный ветер (узлы)	Море	Равнина	Холмистая местность
15 – 35	слабая до умеренной	умеренная	сильная
> 35	умеренная до сильной	сильная	экстремальная

Расчеты проводились по начальным и прогностическим полям модели COSMO-Ru7. Безразмерный коэффициент торможения  $C_D$ , выражения для которого приведены в разделе 1, рассчитывается как для начального момента, так и для моментов прогноза. Поскольку его величина зависит от свойств подстилающей поверхности и от стратификации температуры и ветра в нижнем слое, распределение повторяемостей его значений будет, таким образом, иметь сезонный и суточный ход. Кроме того, оно будет неодинаковым в различных частях области расчета ввиду различий в свойствах подстилающей поверхности.

### 2.1. Средние распределения, суточный и годовой ход

Рассмотрим вначале среднее распределение повторяемости  $C_D$  по всей выборке выходных данных модели COSMO-Ru7. Период, в течение которого архивировались поля  $C_D$  (начальные и прогностические), охватывает 5 месяцев (февраль, март, август, сентябрь и октябрь) 2012 года и включает 304 срока и 74 297 600 значений  $C_D$  в начальный момент и столько же прогностических значений с заблаговременностью 12 и 24 ч.

Сравнивая распределения повторяемостей  $C_D$  в среднем по выборке, в дневные и ночные сроки (табл. 3–5), обнаруживаем, что порядок величин в начальных и прогностических полях один и тот же, но в прогностических полях  $C_D$  в ряде градаций оказывается выше, чем в начальных, – иначе говоря, модель переоценивает коэффициент торможения. В среднем по дневному и ночному срокам завышение (в 2 раза и менее по сравнению с начальными полями) прогностических ( $C_D \cdot 10^3$ ) имеет место в интервале от 10 до 100. В ночной срок это завышение особенно сильно выражено: в интервале ( $C_D \cdot 10^3$ ) от 10 до 500 прогностические значения



в 2–3 раза выше, чем рассчитанные по начальным данным. В дневной срок завышение (менее чем вдвое) обнаруживается в интервале 10–100. В остальных градациях прогностическая повторяемость ниже, чем рассчитанная по начальным данным. Большие  $C_D \cdot 10^3$  ночью встречаются реже, чем днем (как в начальных, так и в прогностических полях это наблюдается при  $(C_D \cdot 10^3) > 10$ ).

**Таблица 3.** Повторяемость значений коэффициента торможения ( $C_D \cdot 10^3$ ) в начальных и прогностических (с заблаговременностью 12 и 24 ч) полях за 5 месяцев 2012 г. в среднем за дневной и ночной сроки (00 и 12 ч ВСВ)

$C_D \cdot 10^3$	Начальные поля		Прогноз на 12 ч		Прогноз на 24 ч	
	Число случаев	%	Число случаев	%	Число случаев	%
< 1	10467478	8,57	1328009	1,09	1290624	1,06
1 – 5	32479220	26,59	34682174	28,45	34476228	28,44
5 – 10	46935830	38,42	38270830	31,39	38022781	31,36
10 – 20	18132087	14,84	26288029	21,56	26043596	21,48
20 – 30	11459595	9,38	15942942	13,08	16031442	13,22
30 – 40	1053679	0,86	2749153	2,26	2716121	2,24
40 – 100	1201295	0,98	2292730	1,88	2294801	1,89
100 - 500	373908	0,31	339103	0,28	339020	0,28
500 – 1000	32570	0,03	10310	0,01	10212	0,01
> 1000	16546	0,01	4682	0,00	4725	0,00
Σ ч. случ.	122152400	100,00	121908000	100,00	121229600	100,00

**Таблица 4.** Повторяемость значений коэффициента торможения ( $C_D \cdot 10^3$ ) в начальных и прогностических (с заблаговременностью 12 и 24 ч) полях за 5 месяцев 2012 г. в среднем за ночной срок (00 ч ВСВ)

$C_D \cdot 10^3$	Начальные поля		Прогноз на 12 ч		Прогноз на 24 ч	
	Число случаев	%	Число случаев	%	Число случаев	%
< 1	6014289	9,80	1145091	1,89	1139049	1,88
1 – 5	17288832	28,16	17926018	29,62	17939187	29,55
5 – 10	24456173	39,84	21968107	36,30	21941017	36,14
10 – 20	8232454	13,41	10701131	17,68	10694956	17,62
20 – 30	5008920	8,16	7624823	12,60	7829248	12,90
30 – 40	215486	0,35	569630	0,94	580266	0,96
40 – 100	159857	0,26	544443	0,90	545155	0,90
100 - 500	11379	0,02	40503	0,07	40473	0,07
500 – 1000	442	0,00	175	0,00	158	0,00
> 1000	168	0,00	78	0,00	91	0,00
Σ ч. случ.	61388000	100,00	60520000	100,00	60709600	100,00

**Таблица 5.** Повторяемость значений коэффициента торможения ( $C_D \cdot 10^3$ ) в начальных и прогностических (с заблаговременностью 12 и 24 ч) полях за 5 месяцев 2012 г. в среднем за дневной срок (12 ч ВСВ)

$C_D \cdot 10^3$	Начальные поля		Прогноз на 12 ч		Прогноз на 24 ч	
	Число случаев	%	Число случаев	%	Число случаев	%
< 1	4453189	7,33	182918	0,30	151575	0,25
1 – 5	15190388	25,00	16756156	27,30	16537041	27,32
5 – 10	22479657	36,99	16302723	26,56	16081764	26,57
10 – 20	9899633	16,29	15586898	25,39	15348640	25,36
20 – 30	6450675	10,62	8318119	13,55	8202194	13,55
30 – 40	838193	1,38	2179523	3,55	2135855	3,53
40 – 100	1041438	1,71	1748287	2,85	1749646	2,89
100 – 500	362529	0,60	298600	0,49	298547	0,49
500 – 1000	32128	0,05	10135	0,02	10054	0,02
> 1000	16378	0,03	4604	0,01	4634	0,01
Σ ч. случ.	60764400	100,00	61388800	100,00	60520000	100,00

Чтобы оценить изменчивость коэффициента торможения от месяца к месяцу, были рассчитаны распределения его повторяемости для каждого из пяти месяцев, за которые имелся архив модельных данных, и затем сопоставлены результаты для разных месяцев. Выборка для одного месяца содержала около 13,5 млн значений в узлах сетки как начальных, так и прогностических полей для каждой из заблаговременностей. В табл. 6 и 7 приведены результаты соответственно для зимнего (февраль) и летнего месяца (август).

**Таблица 6.** Повторяемость (%) значений коэффициента торможения ( $C_D \cdot 10^3$ ) в начальных и прогностических (с заблаговременностью 12 и 24 ч) полях в феврале 2012 г. в среднем за оба срока, а также за ночной (00 ч ВСВ) и дневной (12 ч ВСВ) сроки

$C_D \cdot 10^3$	Начальные поля			Прогноз на 12 ч			Прогноз на 24 ч		
	средн.	ночь	день	средн.	ночь	день	средн.	ночь	день
0 – 1	7,72	9,59	5,78	1,47	2,33	0,68	1,43	2,12	0,72
1 – 5	30,56	31,03	30,08	30,18	30,75	29,65	30,22	30,67	29,74
5 – 10	38,93	39,32	38,53	33,22	36,01	30,63	33,32	35,88	30,66
10 – 20	14,69	13,24	16,19	19,73	17,69	21,63	19,55	17,81	21,37
20 – 30	6,73	6,03	7,46	12,40	11,23	13,49	12,49	11,50	13,52
30 – 40	0,63	0,43	0,84	1,46	0,95	1,92	1,44	0,97	1,93
40 – 100	0,63	0,34	0,94	1,37	0,96	1,75	1,38	0,97	1,80
100 – 500	0,10	0,02	0,17	0,16	0,07	0,25	0,16	0,07	0,26
500 – 1000	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
> 1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Таблица 7.** Повторяемость (%) значений коэффициента торможения ( $C_D \cdot 10^3$ ) в начальных и прогностических (с заблаговременностью 12 и 24 ч) полях в августе 2012 г. в среднем за оба срока, а также за ночной (00 ч ВСВ) и дневной (12 ч ВСВ) сроки

$C_D \cdot 10^3$	Начальные поля			Прогноз на 12 ч			Прогноз на 24 ч		
	средн.	ночь	день	средн.	ночь	день	средн.	ночь	день
0 – 1	10,90	10,77	11,04	1,07	1,88	0,29	0,92	1,78	0,06
1 – 5	23,22	26,52	19,92	27,57	29,47	25,73	27,69	29,39	25,99
5 – 10	37,30	39,93	34,67	28,76	36,11	21,65	28,80	36,00	21,60
10 – 20	14,80	13,56	16,04	23,96	18,36	29,39	23,88	18,29	29,46
20 – 30	10,16	8,58	11,73	11,83	12,23	11,44	11,97	12,61	11,33
30 – 40	1,37	0,36	2,37	3,60	0,98	6,14	3,55	0,98	6,13
40 – 100	1,57	0,26	2,88	2,75	0,91	4,54	2,75	0,89	4,61
100 - 500	0,60	0,02	1,17	0,43	0,07	0,79	0,42	0,06	0,77
500 – 1000	0,06	0,00	0,11	0,02	0,00	0,03	0,01	0,00	0,03
> 1000	0,03	0,00	0,06	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01

В начальных полях хорошо выражена повышенная повторяемость больших  $C_D \cdot 10^3$  в августе по сравнению с февралем, в особенности в дневной срок. Эти особенности в общем воспроизводятся и в прогностических полях, но при этом самые большие значения чаще встречаются в начальных полях, чем в прогностических. В целом же суточный ход  $C_D$  характеризуется ночным минимумом и дневным максимумом, а годовой ход – зимним минимумом и летним максимумом.

## 2.2. Оценка географических особенностей распределения

Чтобы оценить распределение повторяемости ( $C_D \cdot 10^3$ ) по области расчета, сравним средние распределения по различным частям области. Разделим последнюю на девять прямоугольных частей, расположение которых показано на рис. 1. По выборке начальных полей за оба срока объем данных для каждого из девяти регионов, полученных разделением области расчета, составил от 8 до 8,5 млн узлов сетки.

Нами были рассчитаны средние значения повторяемости градаций ( $C_D \cdot 10^3$ ) по каждому из девяти регионов, показанных на рис. 1, по начальным и прогностическим данным. Обнаружено, что разница между регионами достаточно велика. Именно, в северной части области (1, 2, 3 регионы) высокие (> 20) значения ( $C_D \cdot 10^3$ ) встречаются в 25, 19, 13 % узлов соответственно, т. е. значительно чаще, чем в южной части (7, 8, 9 регионы), где их доля составляет менее 2 % в каждом регионе.

Разброс повторяемостей ( $C_D \cdot 10^3$ ) можно оценить с помощью табл. 8, в которой даны распределения повторяемостей для регионов 1, 6 и 9.

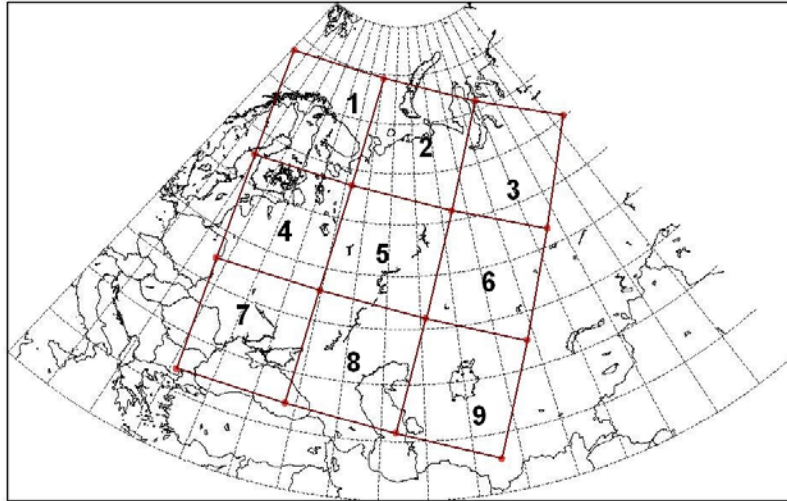
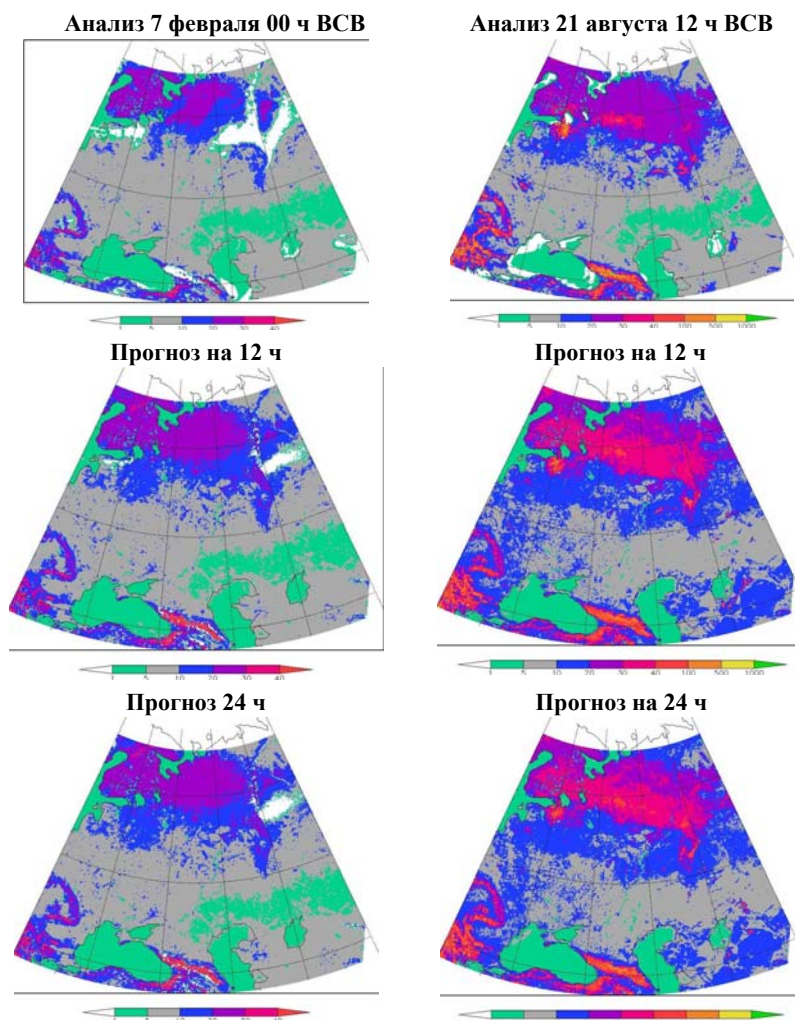


Рис. 1. Область расчета и схема ее разделения на девять регионов.

Таблица 8. Распределение повторяемостей ( $C_D \cdot 10^3$ ) (%) в регионах 1, 6 и 9 за пять месяцев 2012 г. по начальным полям модели COSMO-Ru7 в 00 и 12 ч ВСВ и в среднем за оба срока

$C_D \cdot 10^3$	Регион 1			Регион 6			Регион 9		
	средн.	00 ВСВ	12 ВСВ	средн.	00 ВСВ	12 ВСВ	средн.	00 ВСВ	12 ВСВ
0 – 1	10,14	9,58	10,71	3,18	4,21	2,14	2,41	3,34	1,47
1 – 5	46,65	48,45	44,83	15,09	15,97	14,20	30,06	31,13	28,98
5 – 10	4,87	5,56	4,17	58,04	58,34	57,75	66,12	65,34	66,91
10 – 20	12,81	14,23	11,39	18,24	17,07	19,43	1,28	0,18	2,39
20 – 30	23,63	21,78	25,49	5,21	4,38	6,04	0,06	0,00	0,12
30 – 40	0,98	0,28	1,68	0,11	0,02	0,21	0,02	0,00	0,04
40 – 100	0,69	0,10	1,28	0,10	0,01	0,18	0,03	0,00	0,07
100 – 500	0,21	0,02	0,39	0,03	0,00	0,05	0,01	0,00	0,02
500 – 1000	0,02	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
> 1000	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

На рис. 2 представлены поля коэффициента торможения  $C_D \cdot 10^3$  для двух конкретных сроков, рассчитанные по начальным и прогностическим полям модели. Разница между летним и зимним сроками очень велика; видны также зоны больших значений на севере области расчета, над горными районами (Карпаты, Кавказ), пониженные значения  $C_D \cdot 10^3$  над морями и в средней полосе России.



**Рис. 2.** Начальные и прогностические (на 12 и 24 ч) поля коэффициента торможения ( $C_D \cdot 10^3$ ) зимой (в 00 ч ВСВ 7 февраля 2012 г.) и летом (в 12 ч ВСВ 21 августа 2012 г.).

Из представленного анализа можно сделать следующий вывод. Зависимости коэффициента торможения от характера подстилающей

поверхности, времени суток и сезона выражены хорошо и выглядят достаточно стабильными. В связи с этим представляется целесообразным составить файлы значений этого коэффициента, полученных в модели COSMO-Ru7, по квадратам географической сетки и месяцам года в дневной и ночной сроки для использования с прогностическими полями ветра тех моделей, в которых коэффициент торможения не рассчитывается. Это позволит прогнозировать механическую турбулентность в отсутствие прогностических полей модели COSMO-Ru7, используя прогноз ветра, полученный по другой модели. Такой прогноз будет, очевидно, более эффективен, чем рекомендуемый в [1] расчет с помощью формулы (2).

### 2.3. Распределение повторяемостей скоростей ветра в модельном прогнозе

Поток количества движения  $M$ , согласно (2), равен произведению коэффициента торможения на квадрат скорости ветра и на плотность воздуха. При модельных расчетах используются значения двух последних величин на поверхности 1000 гПа. Выше было установлено, что прогностические значения коэффициента торможения несколько завышены по сравнению с рассчитанными по начальным полям. Представляет интерес оценка прогностических скоростей ветра на поверхности 1000 гПа по сравнению с диагностическими (начальными): как отличаются друг от друга распределения повторяемостей прогностических и диагностических скоростей ветра? Для ответа на этот вопрос были произведены соответствующие расчеты по всей выборке архивных данных и по каждому из пяти месяцев (табл. 9).

**Таблица 9.** Интенсивность механической турбулентности, оцененная, согласно табл. 1, по начальным и прогностическим значениям ( $C_D \cdot 10^3$ ) за пять месяцев 2012 г.

Скорость ветра, м/с	5 месяцев			Март			Октябрь		
	нач. поля	прогноз 12 ч	прогноз 24 ч	нач. поля	прогноз 12 ч	прогноз 24 ч	нач. поля	прогноз 12 ч	прогноз 24 ч
0 – 2,5	18,67	18,60	18,14	18,0	17,85	17,13	17,43	17,59	17,05
2,5 – 5,0	38,60	37,97	37,56	39,40	37,84	37,36	38,78	38,64	38,40
5,0 – 7,5	23,41	24,08	24,34	23,09	25,13	25,77	25,05	25,44	25,52
7,5 – 10,0	11,11	10,94	11,22	11,61	11,31	11,75	11,39	11,12	11,41
10,0 – 15,0	6,98	7,00	7,24	6,96	6,82	6,91	6,58	6,42	6,76
15,0 – 20,0	1,09	1,24	1,33	0,91	1,00	1,02	0,67	0,69	0,78
20,0 – 25,0	0,14	0,17	0,17	0,04	0,07	0,07	0,08	0,09	0,08
> 25,0	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Результат показывает, что согласие распределений, полученных по начальным и прогностическим полям ветра, достаточно хорошее, однако в целом по выборке имеется увеличенная, по сравнению с начальными полями, повторяемость больших скоростей ветра при прогнозе на 12 ч и еще несколько большая – при прогнозе на 24 ч. Прослеживая изменения распределений от месяца к месяцу, видим, что увеличение повторяемости сильных ветров в прогностических полях особенно заметно в октябре и наименее выражено в марте. Можно полагать на этом основании, что и прогностические значения потока импульса будут завышены.

#### 2.4. Прогноз интенсивности механической турбулентности по модели COSMO-Ru7

Используя модельные значения  $C_D \cdot 10^3$ , табл. 1 и значение плотности воздуха при 1000 гПа по стандартной атмосфере ( $1,3 \text{ кг/м}^3$ ), можно рассчитать поток импульса  $M$  и интенсивность механической турбулентности в градациях «слабая», «умеренная» и «сильная и очень сильная».

Как видно из табл. 10, прогностические повторяемости превышают рассчитанные по начальным полям. Была сделана попытка, аналогично [4], провести коррекцию пороговых значений  $M$  применительно к прогностическим полям так, чтобы повторяемости всех трех градаций механической турбулентности были близки в начальных и прогностических полях в среднем за оба срока.

**Таблица 10.** Интенсивность механической турбулентности, оцененная, согласно табл. 1, по начальным и прогностическим значениям ( $C_D \cdot 10^3$ ) за пять месяцев 2012 г.

Интенсивность механической турбулентности		Повторяемость, %			Максимум, начальные поля		Максимум, прогноз на 12 ч		Максимум, прогноз на 24 ч	
		нач. поля	прогноз 12 ч	прогноз 24 ч	% площ.	дата	% площ.	дата	% площ.	дата
Слабая	сред	8,21	10,00	10,20	-	-	-	-	-	-
	ночь	7,34	7,67	8,05	16,07	8.02	14,71	4.02	14,90	4.02
	день	9,08	12,30	12,35	15,63	26.10	19,19	14.03	19,35	14.03
Умеренная	сред	6,83	8,74	9,11	-	-	-	-	-	-
	ночь	6,46	7,02	7,74	24,92	1.02	23,29	3.02	26,79	8.02
	день	7,19	10,43	10,49	24,24	1.02	27,37	1.02	24,38	6.02
Сильная	сред	2,19	3,07	3,22	-	-	-	-	-	-
	ночь	2,31	2,89	3,23	20,02	7.02	24,29	2.02	26,73	2.02
	день	2,07	3,75	3,21	16,16	1.02	21,72	1.02	22,29	2.02

Однако при сравнении полученных результатов на зависимой (пять месяцев 2012 г.) и независимой (ноябрь 2012 г. – октябрь 2013 г.) выборках оказалось, что прогнозы интенсивности механической турбулентности без коррекции пороговых значений предпочтительнее с точки зрения обеспечения авиации, чем при их коррекции, вследствие более низкого процента непредсказанных явлений и более высокого (в среднем на 0,10) критерия Пирса. Поэтому от коррекции пороговых значений  $M$  было решено отказаться.

Характеристики оправдываемости прогноза механической турбулентности на независимой выборке представлены в табл. 11: их следует признать очень хорошими. Объем выборки составил 172 302 000 узлов сетки для начальных полей и для каждой из двух заблаговременностей. Как оправдываемость прогноза наличия явления, так и предупрежденность достаточно высоки, и в целом оценки лишь несколько хуже, чем на зависимой выборке (нижняя часть табл. 11). По-видимому, годовой ход интенсивности явления выражен не так резко, и обе выборки оказываются достаточно однородными.

### **Заключение**

Составлена программа расчета интенсивности механической турбулентности, определяемой значениями коэффициента торможения воздушного потока в приземном слое и скоростью ветра на поверхности 1000 гПа. Накопленный архив начальных и прогностических полей перечисленных величин за пять месяцев 2012 г. позволил провести расчеты по разработанной программе и изучить особенности указанных полей и успешность прогноза механической турбулентности.

Предвычисляемый в рамках модели коэффициент торможения в среднем хорошо согласуется с рассчитанным в начальный момент, хотя отмечается определенная переоценка его в прогнозе по сравнению с анализом (т. е. с начальными полями). Суточный ход коэффициента торможения выражен слабо с максимумом в дневной срок, годовой ход характеризуется летним максимумом и зимним минимумом. Региональные особенности в пределах области расчета характеризуются большими значениями на севере области и над горными районами, минимальными значениями над морями и в средней полосе России. Оценки распределений повторяемости скоростей ветра по начальным и прогностическим полям показали, что при модельном прогнозе несколько переоценивается повторяемость больших ( $> 15$  м/с) скоростей. Совместно с отмеченной переоценкой коэффициентов торможения можно ожидать определенного превышения прогнозируемой интенсивности механической турбулентности над рассчитанной по начальным полям.



**Таблица 11.** Оценка оправдываемости прогноза механической турбулентности по независимой выборке (ноябрь 2012 г. – октябрь 2013 г.) и зависимой выборке (пять месяцев 2012 г.) в сроки 00 и 12 ч ВСВ

Показатели успешности	Заблаговременность 12 ч						Заблаговременность 24 ч						
	слабая		умеренная		сильная		слабая		умеренная		сильная		
	00	12	00	12	00	12	00	12	00	12	00	12	
<b>Независимая выборка</b>													
Повторяемость, %	15,6	18,2	8,5	9,4	2,16	2,17	15,6	18,2	8,5	9,4	2,17	2,16	
Оправд. прогн., %	налич.	74,3	62,3	70,4	59,1	61,1	56,6	68,8	58,8	64,6	54,8	55,4	51,1
	отсут.	96,8	96,6	98,3	98,2	99,6	99,6	96,4	96,1	98,1	98,0	99,5	99,5
Преду-прежд., %	налич.	83,0	86,0	82,3	83,3	81,3	80,9	81,1	84,3	80,3	81,5	79,4	78,5
	отсут.	94,7	88,4	96,8	94,0	98,9	98,6	93,2	86,9	95,9	93,1	98,6	98,3
Критерий Пирси	0,77	0,74	0,79	0,77	0,80	0,80	0,74	0,71	0,76	0,75	0,78	0,77	
Критерий Хайдке	0,74	0,65	0,74	0,65	0,69	0,66	0,69	0,61	0,69	0,61	0,64	0,61	
<b>Зависимая выборка</b>													
Повторяемость, %	15,6	18,4	8,41	9,27	2,17	2,09	15,9	18,0	8,61	8,98	2,24	1,94	
Оправд. прогн., %	налич.	73,6	61,8	69,5	57,5	60,9	53,1	68,1	58,6	63,7	53,6	55,5	48,0
	отсут.	96,8	96,7	98,3	98,2	99,6	99,6	96,4	96,1	98,2	98,0	99,6	99,6
Преду-прежд., %	налич.	82,9	86,6	82,3	83,6	82,6	80,8	81,8	83,8	81,6	80,5	81,7	77,6
	отсут.	94,5	88,0	96,7	93,7	98,8	98,5	92,8	87,0	95,6	93,1	98,5	98,3
Критерий Пирси	0,77	0,75	0,79	0,77	0,81	0,79	0,75	0,71	0,77	0,74	0,80	0,76	
Критерий Хайдке	0,74	0,64	0,73	0,64	0,69	0,63	0,69	0,61	0,68	0,60	0,65	0,58	

Расчеты интенсивности механической турбулентности и оценка успешности ее прогноза показали в целом хорошие результаты, однако, как и следовало ожидать, повторяемость умеренной и в особенности сильной турбулентности превышает таковую в начальных полях на 20–30 %. Была сделана попытка коррекции пороговых значений в передаточной функции с целью сблизить указанные повторяемости. Оказалось, однако, что, хотя повторяемости в среднем сближаются, успешность прогноза не повышается в результате коррекции, а понижается вследствие роста числа непредсказанных явлений. Это обусловлено,

по-видимому, более сложной структурой полей коэффициента торможения и ветра, так что коррекция критериев ухудшает согласие начального и прогностического полей. В качестве окончательного варианта прогноза механической турбулентности было принято использование передаточной функции в первоначальном виде. Проверка успешности прогноза на независимой выборке показала высокий результат.

Метод прогноза механической турбулентности, представленный в данной статье, совместно с методом прогноза термической турбулентности [4] используется для прогноза турбулентности на нижних уровнях как совместного эффекта этих двух видов турбулентности. Поля интенсивности термической и механической турбулентности рассчитываются порознь на основе прогностической продукции численной модели COSMO-Ru7 и затем объединяются следующим образом: в каждом узле модельной сетки градиция интенсивности суммарной турбулентности в нижнем слое принимается равной максимуму из двух градиций интенсивности ее составляющих (т. е. термической и механической турбулентности). Такой способ оперативного расчета прогностических полей турбулентности на нижних уровнях полета используется в Гидрометцентре России с 2014 года.

#### Список использованных источников

1. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 301 с.
2. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 307 с.
3. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 312 с.
4. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Прогноз термической турбулентности в пограничном слое для авиации // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 78-100
5. Businger J.A., Wyngaard J.C., Izumi Y., Bradley E.F. Flux profile relationships in the atmospheric surface layer // J. Atmos. Sci. 1971. Vol. 28. P. 181-189.
6. Doms G., Förstner J., Heise E. et al. A description of the nonhydrostatic regional COSMO model. Part II: Physical parameterization. DWD, Offenbach, Germany, 2011.
7. Dyer A. A review of flux-profile relations // Bound. Layer Meteorol. 1974. Vol. 1. P. 363-372.
8. Turcotte M.-F. Aviation weather web site (AWWS) // 11th Conf. Aviation, Range, and Aerospace Meteorol., 4-8 Oct. 2004, Hyannis, MA, USA.
9. [www.caem.wmo.int/pdf/turbulence/mechanicalturbulence.pdf](http://www.caem.wmo.int/pdf/turbulence/mechanicalturbulence.pdf)

Поступила в редакцию 21.04.2017 г.