

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 551.509.52

Гибридный метод прогноза порывов ветра

М.М. Курбатова^{1,2}, К.Г. Рубинштейн^{1,2*}

¹Гидрометцентр России

123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, 52

Поступила в редакцию 1.11.2017 г.

Рассматриваются различные способы прогноза скорости порывов ветра на основе численных моделей динамики атмосферы. Приводятся оценки успешности семи методов прогноза порывов ветра на основе данных высокочастотных измерений и сети синоптических станций. На основе анализа успешности различных методов прогноза предлагается гибридный метод прогноза порывов, учитывающий порывы ветра разных механизмов образования. Он дает более стабильные результаты в течение всего года.

Ключевые слова: порывы ветра, гидродинамическая модель, прогноз, турбулентность, опасные явления; wind gusts, numerical weather model, forecast, turbulence, extreme meteorological events.

Введение

Порывом ветра называют резкое кратковременное усиление ветра. Порывы несут наибольшую энергию ветра и могут являться причиной разрушений, влиять на функционирование транспорта. При развитии штормов наибольший урон, как правило, приносят именно сильные порывы ветра, которые приводят к разрушению конструкций, повалу деревьев. Заблаговременный прогноз порывов ветра может помочь в организации превентивных мер, таких как укрепление конструкций, предупреждение населения и др., и способствовать уменьшению ущерба. При этом не существует однозначной связи между скоростью среднего ветра и его порывами, даже при небольшом ветре порывы могут достигать значительных величин. При описании пыльных бурь, метелей и радиационно-опасных веществ ключевым параметром является скорость ветра. Однако начало подъема частиц с поверхности может быть вызвано порывами ветра, а не средним ветром. Поэтому реалистичный прогноз порывов ветра очень важен.

Существует ряд методов прогноза. Их можно условно разделить на три группы: статистические, синоптико-статистические и динамические. Статистические методы основаны на построении распределения скоростей ветра в данной точке на основе ряда наблюдений [1, 2]. Параметры этого распределения позволяют оценивать частоту и повторяемость порывов ветра в данной точке. Такой подход актуален в задачах расчета нагрузок на здания и объекты, выборе площадок для строительства и т.п., но его сложно использовать в задачах прогноза из-за необходимости длинного ряда наблюдений и неодно-

значности обобщения для других точек. Синоптико-статистические методы основаны на выделении предикторов значительных порывов ветра на основе данных наблюдений. Наиболее часто такие методы применяются для прогноза особенно сильных порывов ветра – шквалов [3, 4], и требуют наличия длинного ряда наблюдений, к тому же даже точный прогноз предикторов не всегда ведет к точному прогнозу самого явления. Сюда же условно можно отнести использование фактора порыва – отношения скорости порыва к скорости ветра. В конкретных точках фактор порыва часто определяется эмпирически. Он может зависеть от устойчивости атмосферы и / или неровности поверхности. Существуют его классификации по типам подстилающей поверхности [5].

Следующим шагом в развитие таких методов является диагноз условий. Так, в работе [6] предлагается выделять зоны активной конвекции в области пересечения вихря Эртеля с бароклинными фронтальными зонами. Динамические методы основаны на создании физической модели возникновения порывов ветра и реализации ее в численном прогнозе. К несомненным достоинствам таких методов можно отнести то, что они дают возможность понять физические механизмы образования этого природного явления. Остановимся на данной группе методов подробнее.

Динамические методы прогноза порывов ветра

Методы динамического прогноза порывов ветра можно условно разделить на две группы. В первой группе методов исходят из того, что порывы ветра служат мерой атмосферной турбулентности, а значит, могут быть оценены на основании турбулентных

* Мария Михайловна Курбатова (marja1702@gmail.com); Константин Григорьевич Рубинштейн (k.g.rubin@gmail.com).

характеристик, определяемых в рамках параметризации атмосферного пограничного слоя в моделях динамики атмосферы. По определению турбулентная кинетическая энергия (ТКЕ – Turbulent Kinetic Energy) – это мера отклонения мгновенного ветра от среднего. Если рассматривать ТКЕ как дисперсию скорости ветра, а распределение скорости ветра считать нормальным, то можно предложить следующую формулу для оценки скорости порывов ветра (далее этот метод обозначен как ТКЕ):

$$wge = U + 3\sigma = U + 3\sqrt{q}, \quad (1)$$

где U – средняя скорость ветра; σ – дисперсия скорости ветра; q – ТКЕ.

Такой способ реализуем, если в используемой параметризации пограничного слоя ТКЕ выступает в роли прогностической переменной. В противном случае для оценки дисперсии можно использовать соотношение, предложенное в [7]:

$$wge = U + \alpha\sigma = U + \alpha \cdot 2,4u_*, \quad \alpha = 3, \quad (2)$$

где u_* – приземная скорость трения.

В некоторых вариантах данной методики рекомендуется брать среднюю скорость ветра с высоты 30 м над землей.

В предположении, что модельная величина ТКЕ является мерой максимального отклонения мгновенных значений скорости ветра от средних, в работе [8] предлагается следующая оценка (далее этот метод обозначен как ТКЕ-2):

$$wge = U + \sqrt{2q}. \quad (3)$$

На основании данных наблюдений возможна аппроксимация более сложной зависимостью от скорости ветра и ТКЕ, приведенная в [9] (далее этот метод обозначен как Schreur).

Во второй группе методов предполагается, что порывы ветра являются результатом отклонения частиц (порций) воздуха с более высоких уровней к земле и несут в себе скорость с этих уровней. В работе [10] предлагается использовать скорость ветра с высоты атмосферного пограничного слоя в качестве величины порывов приземного ветра (далее этот метод обозначен как PVLH). В случае глубокой конвекции необходимо также учитывать вертикальные движения воздуха [11] (далее этот метод обозначен как Nakamura). О. Brasseur [12] предлагает учитывать энергию частиц (далее этот метод обозначен как Brasseur):

$$wge = \max[U(z_p)] \quad (4)$$

из высотных уровней z_p , удовлетворяющих соотношению (5):

$$\frac{1}{z_p} \int_0^{z_p} q(z) dz \geq \int_0^{z_p} g \frac{\Delta\theta_v(z)}{\theta_v(z)} dz, \quad (5)$$

где θ_v – виртуальная потенциальная температура.

Численная модель прогноза

Различные методы расчета порывов ветра были реализованы на результатах прогнозов модели WRF-ARW [13] версии 3.7.1, имеющей хорошие оценки прогноза метеорологических величин в атмосферном пограничном слое [14]. Прогноз осуществлялся для области, покрывающей европейскую территорию России, с пространственным разрешением 18 км на 2 сут на основе начальных и граничных условий из анализа NCEP [15, 16] с пространственным разрешением 0,5°. Конфигурация модели выбиралась на основе исследований, в которых важно точное описание скорости ветра [17–19]. Были использованы следующие параметризации: микрофизика облаков по работе [20], длинноволновая и коротковолновая радиация RRTMG [21], модель процессов в почве, разработанная центром НОАН [22], конвекция по схеме Бэтса–Миллера [23], процессы в атмосферном пограничном слое, согласно модификации схемы Меллора–Ямады, предложенной М. Nakanishi и Н. Niino [24]. По вертикали был задан 41 σ -уровень, из которых 15 уровней находятся в нижнем слое до 1 км.

Данные измерений

По сети синоптических станций в рамках телеграмм передаются данные о порывах ветра в виде максимального значения скорости ветра за 10-минутный интервал по измерениям анеморумбометра в сроки наблюдений. В работе используются данные 2189 станций, расположенных на европейской территории России и территории сопредельных государств.

К сожалению, данных, позволяющих изучить динамику образования порывов ветра, довольно мало. В настоящей работе используются результаты высокочастотных (50 Гц) измерений скорости ветра, проводимых на физическом факультете МГУ в Москве, с помощью термоанемометра USA-1 (Metek), расположенного на высоте 10 м над крышей здания. В этой же точке измеряются профили температуры с помощью микроволнового профилера МТП-5 [25]. Такое сочетание может помочь выявить взаимосвязи между порывами и устойчивостью атмосферного пограничного слоя. В качестве порыва ветра принималось значение 99,5 перцентиля распределения скорости ветра за 10 мин в районе срока прогноза. Такое определение соответствует усреднению в 3 с, согласно рекомендациям ВМО [26], но менее чувствительно к возможным пропускам или ошибкам измерений. Использование 10-минутного интервала вызвано желанием соотнести наши данные с измерениями на синоптических станциях.

Методы сравнения

Для сравнения с данными высокочастотных измерений в каждом узле модельной сетки осуществлялась оценка значения порыва ветра, которая

в дальнейшем билинейно интерполировалась в точку с координатами измерений. На основании этих значений рассчитывались систематическая (средняя разность между модельным значением и наблюдением), абсолютная (средний модуль разности между модельным значением и наблюдением) и относительная (среднее отношение модуля разности между модельным значением и наблюдением к наблюдению) ошибки прогноза порывов ветра.

Для сравнения с данными сети синоптических станций вся область прогноза разбивалась на ячейки $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе. В качестве значения в ячейке использовалась максимальная величина порывов ветра из всех станций, попавших в ячейку, и из всех узлов расчетной сетки модели, попавших в нее. Если в ячейке не было ни одного наблюдения, то она не учитывалась в анализе. Далее за фактическое событие принималось превышение порывом ветра заданного порогового значения. На основании составления таблиц сопряженности рассчитывались общая оправдаемость A_c (6) и предсказуемость прогноза W (7), процент ложных тревог Fa (8), коэффициент Пирси–Обухова PSS (9):

$$A_c = \frac{m_{11} + m_{22}}{m_{00}} \cdot 100\%; \quad (6)$$

$$W = \frac{m_{11}}{m_{01}} \cdot 100\%; \quad (7)$$

$$Fa = \frac{m_{12}}{m_{10}} \cdot 100\%; \quad (8)$$

$$PSS = \frac{m_{11}}{m_{01}} - \frac{m_{12}}{m_{02}}, \quad (9)$$

где m_{11} — число оправдавшихся прогнозов порывов ветра; m_{12} — число неоправдавшихся прогнозов порывов ветра; m_{22} — число оправдавшихся прогно-

зов отсутствия порывов ветра; m_{01} — число наблюдавшихся случаев порывов ветра; m_{02} — число наблюдавшихся случаев отсутствия порывов ветра; m_{10} — число прогнозов порывов ветра; m_{00} — общее число пар сравнения для данной выборки.

Сравнение с данными высокочастотных наблюдений

На рис. 1 представлены характерный пример прогноза скорости ветра и его порывов, рассчитанных приведенными выше шестью методами, и временной ход высокочастотных измерений скорости ветра. Видно, что измеряемая скорость ветра достаточно хорошо укладывается в интервал $U \pm 3\sqrt{q}$. Метод Brasseur дает завышенное значение порывов ветра и практически не повторяет временной ход среднего ветра в отличие от остальных. Большинство методов дают близкие значения для одинокого резкого порыва ветра в 15:00 20.07.2016 г., но имеют значительный разброс в остальное время.

Порывы ветра могут иметь разный механизм образования. Проанализируем взаимосвязь порывов ветра с устойчивостью атмосферы. На рис. 2 показаны временной ход порывов ветра и градиент температуры в нижнем слое по данным измерений в этой же точке. Несмотря на то что более сильные порывы образуются при неустойчивой стратификации атмосферы, наличие температурной неустойчивости не ведет однозначно к образованию порывов ветра.

Для обобщения полученных результатов в табл. 1 приведены оценки рассчитанных четырьмя методами порывов ветра для трех центральных месяцев сезонов 2011 г. (зимний был исключен из-за отсутствия данных измерений). В этой же таблице приведены оценки средней скорости ветра, так как от нее отталкиваются все использованные методы прогноза

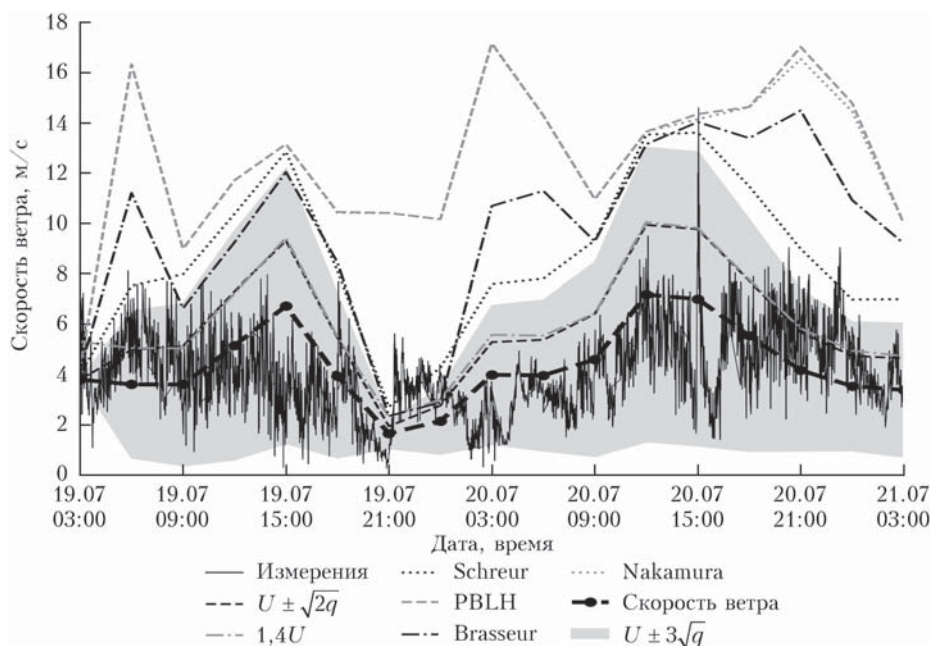


Рис. 1. Временной ход высокочастотных измерений скорости ветра и прогноза порывов ветра с помощью различных методов 19–20.07.2016 г.

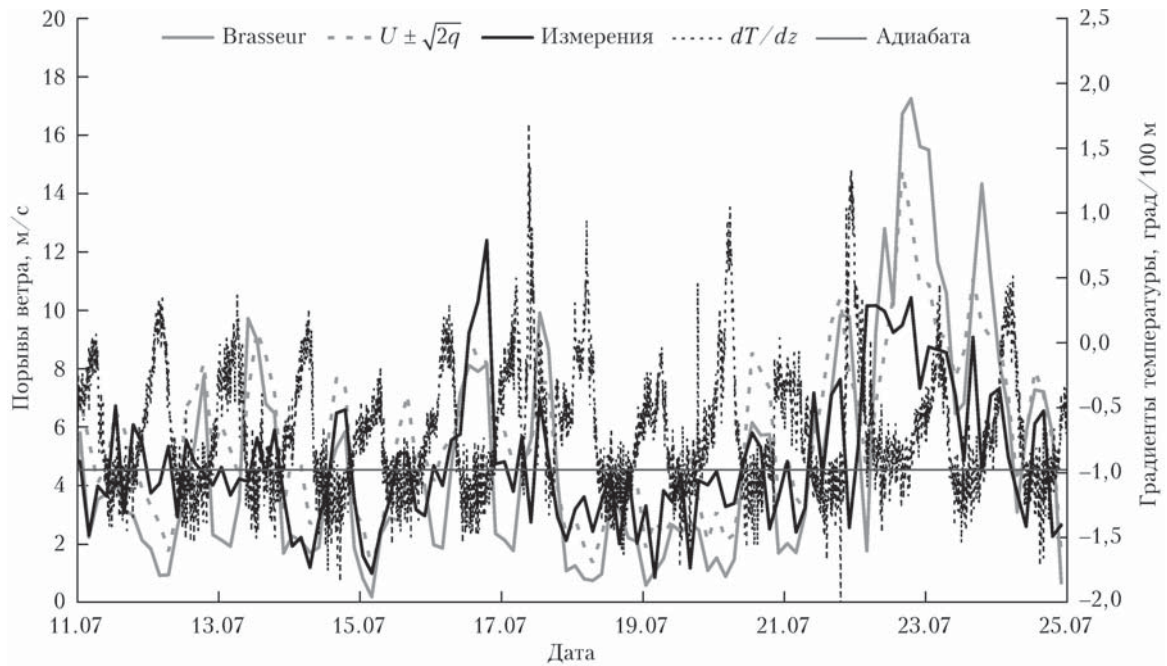


Рис. 2. Измеренные порывы ветра, градиент температуры в нижнем 100-метровом слое и прогноз порывов ветра с помощью двух методов

Таблица 1

Оценки прогноза скорости и порывов ветра с помощью различных методов по данным высокочастотных измерений

Ошибка	Месяц	Количество случаев	Скорость ветра	Скорость порывов ветра			
				1,4U	Brasseur	ТКЕ	ТКЕ-2
Систематическая	апрель	234	0,82	0,86	1,02	2,88	0,91
	июль	240	0,53	0,50	-0,06	2,72	0,77
	октябрь	231	0,76	0,72	1,87	2,83	0,73
Абсолютная	апрель	234	1,46	1,89	2,45	3,21	1,77
	июль	240	1,31	1,74	2,13	3,15	1,68
	октябрь	231	1,43	1,73	2,73	3,14	1,62
Относительная	апрель	234	0,59	0,48	0,54	0,77	0,45
	июль	240	0,55	0,47	0,51	0,82	0,46
	октябрь	231	0,49	0,38	0,53	0,69	0,37

Примечание. Полужирным выделены наилучшие за месяц значения, курсивом – вторые по качеству значения.

порывов. Высокую эффективность показал простой эмпирический метод с использованием фактора порывов (обозначен как $1,4U$). Значение коэффициента определялось эмпирически и соответствует значению, рекомендуемому для холмистой местности [13]. ТКЕ дает лучшие или сравнимые результаты в весенний и осенний месяцы. В июле хорошие оценки продемонстрировал метод Brasseur.

Гибридный метод прогноза порывов ветра

Как уже сказано выше, метод ТКЕ имеет преимущество в осенний период, а метод Brasseur – в летний. Это может быть обусловлено тем, что порывы ветра летом часто связаны с развитием конвекции, а осенью – с турбулентностью механического

происхождения. Для разделения типов неустойчивости атмосферного пограничного слоя может быть использовано число Ричардсона

$$Ri = \frac{g}{\theta} \cdot \frac{\partial\theta/\partial z}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}. \quad (10)$$

Методы, использующие ТКЕ, неприменимы для прогноза порывов, связанных с сильными ливнями и шквалами, но хорошо работают при турбулентности механического происхождения. В то же время методы, использующие принцип отклонения с более высоких уровней, хорошо зарекомендовали себя в прогнозах конвективных порывов.

С учетом вышесказанного предлагается гибридный метод прогноза порывов ветра (далее этот метод обозначен как Hybrid):

$$wge = \begin{cases} U + 3\sqrt{q}, & Ri > 0, \\ \max[U(z_p)], & Ri \leq 0, \end{cases} \quad (11)$$

где z_p удовлетворяет (5).

Такое сочетание должно привести к объединению достоинств обоих методов.

Сравнение с данными синоптических станций

На рис. 3 представлена повторяемость порывов ветра за три года по данным сети синоптических станций на европейской территории России и территории сопредельных государств и результатам моделирования. Небольшие порывы (15–18 м/с) ветра чаще возникают в южной части области прогноза (расчетов) и вдоль побережья Северного ледовитого океана, в Мурманской обл. Значительные порывы (свыше 24 м/с) ветра встречаются более

равномерно по всей территории, за исключением отдельных станций, имеющих локальные особенности расположения. В результатах модели порывы ветра встречаются в целом чаще, чем в наблюдениях. Воспроизводятся некоторые особенности распределения повторяемости по территории. Заметны отличия на территории Кавказа, что может быть связано с относительно низким разрешением модели.

На рис. 4 показаны оценки успешности семи методов прогноза порывов ветра больше 15 м/с для трех зимних и трех летних месяцев 2016 г. Видно, что ни один из методов не показывает хорошего качества прогноза, особенно в летние месяцы. Методы, использующие принцип отклонения с более высоких уровней, показывают лучшую предсказуемость порывов ветра, но и большее число ложных тревог. Несмотря на то что гибридный метод не показывает лучших оценок, его успешность стабильна в течение года, что делает его более предпочтительным. Предсказуемость гибридного метода выше, чем методов,

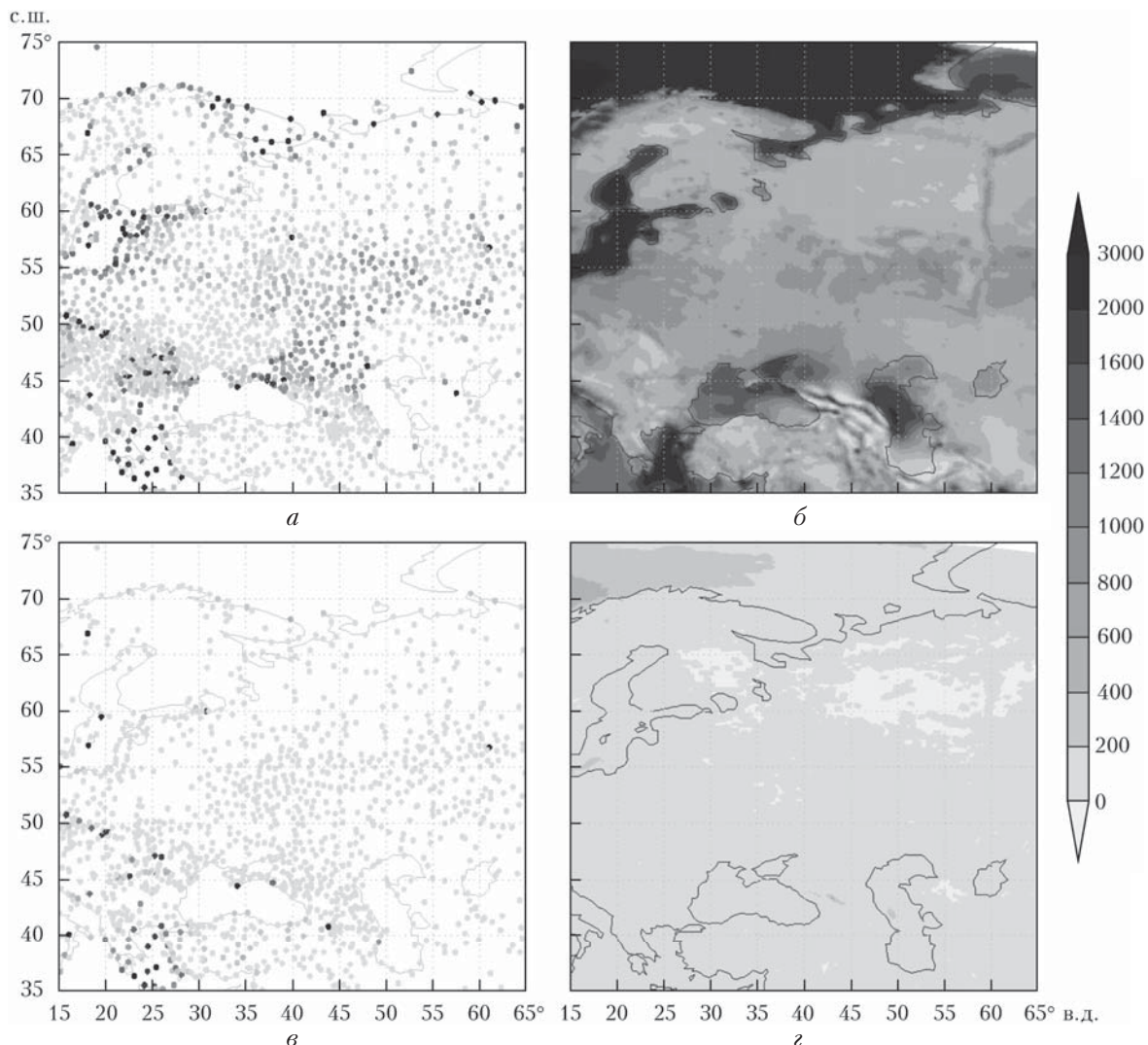


Рис. 3. Повторяемость порывов ветра за 2014–2016 гг. на европейской территории России и территории сопредельных государств по данным синоптических станций (а, в) и результатам гибридного метода прогноза (б, з): а, б – скорость ветра свыше 12 м/с; в, з – свыше 24 м/с

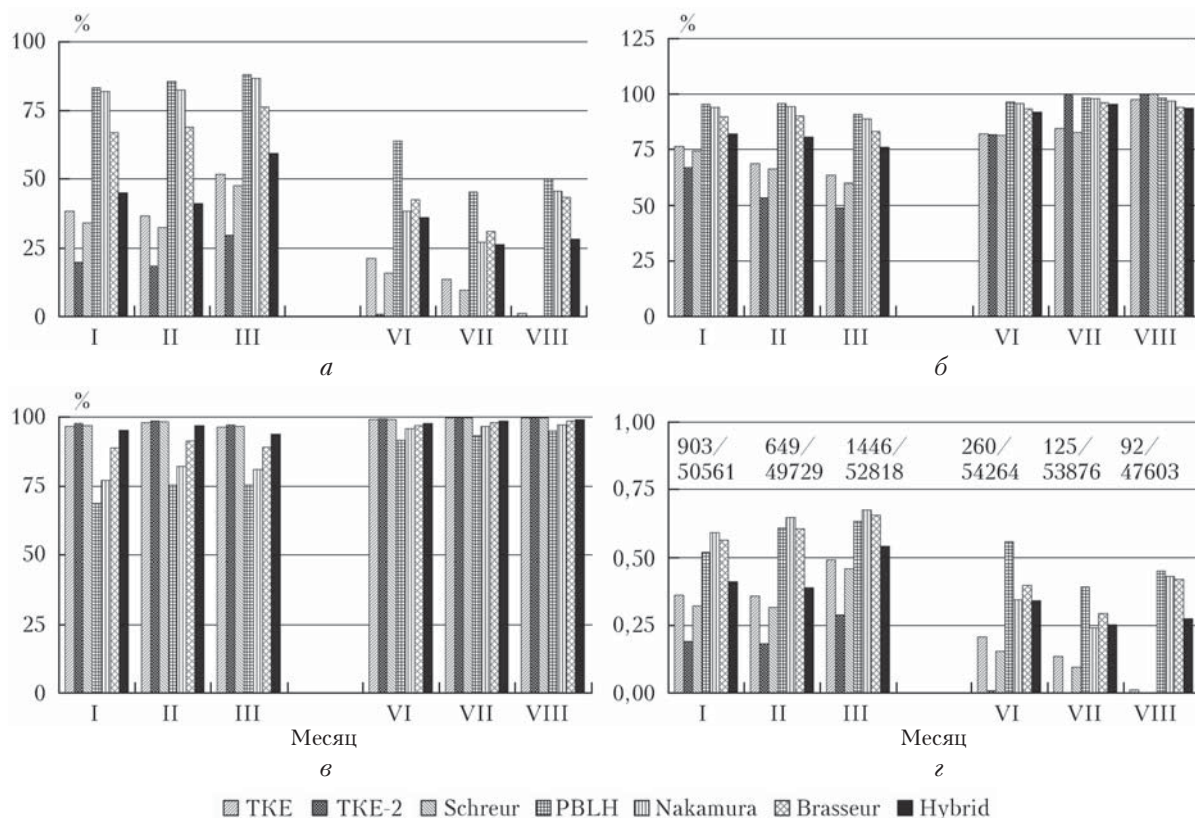


Рис. 4. Оценки прогноза порывов ветра больше 15 м/с: *а* – предсказуемость; *б* – процент ложных тревог; *в* – общая оправдаемость; *г* – коэффициент Пирси–Обухова; цифрами показано количество наблюдавшихся случаев порывов / общее количество пар сравнения

использующих только ТКЕ, а процент ложных тревог меньше, чем у методов Brasseur, Nakamura и PBLH.

Порывы летом наиболее часто связывают с развитием конвекции, которая может не разрешаться численной моделью с шагом 18 км, поэтому так же были рассчитаны прогнозы для вложенной сетки

с разрешением 6 км для Мурманской обл. Сравнение оценок прогнозов с разными разрешениями приведено в табл. 2. Вопреки ожиданиям увеличение разрешения модели с 18 до 6 км не дало улучшения качества прогноза порывов ветра: увеличилось число предсказанных явлений, но и сильно возросло число ложных тревог.

Таблица 2

Оценки прогноза порывов ветра с помощью гибридного метода по данным сети синоптических станций для областей с разрешением 18 и 6 км

Месяц	Предсказуемость		Процент ложных тревог		Коэффициент Пирси–Обухова		Число наблюдавшихся порывов	Общее число пар сравнения
	18 км	6 км	18 км	6 км	18 км	6 км		
Январь	50	60	68	76	0,45	0,51	318	6662
Февраль	43	60	82	87	0,38	0,50	166	6578
Март	62	69	75	79	0,50	0,52	447	7339
Апрель	74	79	67	73	0,62	0,62	525	7150
Май	62	65	78	84	0,59	0,59	122	7426
Июнь	46	63	77	81	0,43	0,59	107	7206
Июль	36	58	91	92	0,35	0,54	33	7287
Август	19	22	95	97	0,17	0,19	32	7261
Сентябрь	65	71	77	81	0,56	0,58	290	6923
Октябрь	45	55	77	82	0,40	0,47	235	7135
Ноябрь	62	71	73	78	0,54	0,60	312	7052
Декабрь	58	69	69	77	0,50	0,56	373	7090
Весь год	59	68	74	80	0,53	0,58	2960	85109

Примечание. Курсивом выделены меньшие ошибки.

Заключение

В данной работе предложен новый гибридный метод прогноза порывов ветра, являющийся комбинацией двух методов (ТКЕ и Brasseur), в зависимости от типа неустойчивости атмосферного пограничного слоя. Проведен анализ успешности метода в сравнении с шестью другими на основе данных высокочастотных измерений и синоптических станций.

Учет возникновения значительных порывов ветра в областях конвективной неустойчивости ведет к увеличению предсказуемости явления по сравнению с учетом только турбулентных характеристик. Исключение же областей, в которых прогнозируется только сдвиговая неустойчивость, ведет к уменьшению количества ложных тревог. Вопрос критериев для такого разделения требует дополнительных исследований.

Результаты проведенного исследования позволяют говорить о необходимости дальнейшего изучения механизмов образования и способов прогноза порывов ветра.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грантов № 16-05-00822, 16-05-00704, 18-35-00044).

1. *Brabson B.B., Palutikof J.P.* Tests of the generalized Pareto distribution for predicting extreme wind speeds // *J. Appl. Meteorol.* 2000. V. 39, N 9. P. 1627–1640.
2. *Staid A., Pinson P., Guikema S.D.* Probabilistic maximum-value wind prediction for offshore environments // *Wind Energy.* 2015. V. 18, N 10. P. 1725–1738.
3. *Алексеева А.А.* Метод прогноза сильных шквалов // *Метеорол. и гидрол.* 2014. № 9. С. 5–15.
4. *Переходцева Э.В.* Гидродинамико-статистический метод прогноза шквалов и очень сильного ветра в градации опасных явлений в летний период с заблаговременностью 12–36 ч по выходным данным региональной модели для Европейской территории России // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов.* 2013. № 40. С. 170–181.
5. *Forecasters' Reference Book.* London: Met. Office, 1993. 191 p.
6. *Юсупов Ю.И.* Метод прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 11. С. 55–63.
7. *Born K., Ludwig P., Pinto J.G.* Implementation and evaluation of wind gust estimate methods in COSMO-CLM // *EGU General Assembly Conf. Abstr.* 2010. V. 12. P. 9925.
8. *Born K., Ludwig P., Pinto J.G.* Wind gust estimation for Mid-European winter storms: Towards a probabilistic view // *Tellus A.* 2012. V. 64, iss. 1. 18 p.
9. *Schreur B.W., Geertsema G.* Theory for a TKE based parameterization of wind gusts // *HIRLAM Newslett.* 2008. N 54. P. 177–188.
10. *Bradbury W.M.S., Deaves D.M., Hunt J.C.R., Kershaw R., Nakamura K., Hardman M.E., Bearman P.W.* The importance of convective gusts // *Meteorol. Appl.* 1994. V. 1, N 4. P. 365–378.
11. *Nakamura K., Kershaw R., Gait N.* Prediction of near-surface gusts generated by deep convection // *Meteorol. Appl.* 1996. V. 3, N 2. P. 157–167.
12. *Brasseur O.* Development and application of a physical approach to estimating wind gusts // *Mon. Weather Rev.* 2001. V. 129, N 1. P. 5–25.
13. *Sckamarock W.C., Klemp J.B.* A time-split non-hydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications // *J. Comput. Phys.* 2008. V. 227. P. 3465–3485.
14. *Смирнова М.М., Рубинштейн К.Г., Юшков В.П.* Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы // *Метеорол. и гидрол.* 2011. № 12. С. 5–16.
15. *Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A., Caplan P.M., Deaven D.G., Iredell M., Katz B., Pan H.-L., Sela J., White G.H.* Recent changes implemented into the global forecast system at NMC // *Weather Forecast.* 1991. V. 6, N 3. P. 425–435.
16. *URL:* <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php> (last access: 13.06.2018).
17. *Giannakopoulou E.M., Nhili R.* WRF model methodology for offshore wind energy applications // *Adv. Meteorol.* 2014. V. 2014. 14 p.
18. *Coniglio M.C., Correia J., Marsh P., Kong F.* Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations // *Weather Forecast.* 2013. V. 28, N 3. P. 842–862.
19. *Бычкова В.И., Смирнова М.М.* Анализ поля ветра и температуры при низовой метели по эмпирическим данным // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 1. С. 21–33.
20. *Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis // *Mon. Weather Rev.* 2014. N 132. P. 519–542.
21. *Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shepard M.W., Clough S.A., Collins W.D.* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2008. V. 113, N D13. P. D13103.
22. *Tewari M., Chen F., Wang W., Dudhia J., LeMone M.A., Mitchell K., Ek M., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H.* Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model // 20th conference on weather analysis and forecasting; 16th conference on numerical weather prediction. 2004. V. 1115. 6 p.
23. *Janjić Z.I.* The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes // *Mon. Weather Rev.* 1994. V. 122, N 5. P. 927–945.
24. *Nakanishi M., Niino H.* An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2006. V. 119, N 2. P. 397–407.
25. *Кадыров Е.Н., Кузнецова И.Н.* Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профилимерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.
26. *Guide to meteorological instruments and methods of observation / WMO.* Geneva, Switzerland: Chairperson, Publications Board, 2008. 714 p.

M.M. Kurbatova, K.G. Rubinstein. Hybrid method for wind gust forecast.

Various methods for predicting wind gusts speed based on numerical atmospheric models are considered. On the basis of different methods' skill scores a new hybrid method for forecasting gusts is proposed. This method takes into account wind gusts of different formation mechanisms. Seven methods for forecasting wind gusts are evaluated based on the data of high-frequency measurements and the network of synoptic stations are given. The hybrid method gives more stable results throughout the year.