

КРАТКОСРОЧНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ МЕТЕЛЕЙ

В.И. Бычкова, К.Г. Рубинштейн

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
Er-riad@mail.ru*

Введение

На значительной территории России и других северных стран метель является часто встречающимся опасным метеорологическим явлением. Значительная продолжительность холодного периода, наличие обширных снежных площадей, синоптических и орографических факторов, обуславливающих возникновение сильных ветров, создают условия для наличия метелевой деятельности на большей части России. По данным [1], на Европейской территории России (ЕТР) продолжительность метелей составляет в среднем около 30 дней в году.

Существует множество определений и близких терминов для метели, например «поземка», «низовая метель», «верховая метель», «буран», «вьюга», «пурга» и т.д. Многие из этих терминов отражают местные диалекты. В статье ограничимся следующими терминами для описания движения снежинок в атмосфере и над поверхностью Земли [2]:

- спокойный снегопад – выпадение снега из атмосферы без ветра;
- общая метель – выпадение снега при сильном ветре (7 м/с и более); структура ветра при этом не имеет особого значения;
- низовая метель – перенос сухого, ранее выпавшего снега, поднимаемого сильным ветром (примерно 10–12 м/с) с поверхности снежного покрова до высоты нескольких метров;
- поземок – перенос ранее выпавшего сухого снега в слое, непосредственно прилегающем к земной поверхности (не более 10–12 см) при скорости ветра обычно более 5 м/с.

Исследования метелей предпринимались еще во второй половине 18 века и были обусловлены необходимостью создавать защитные сооружения для развивающейся сети железных дорог. Одна из первых статей на эту тему в России была опубликована в 1878 году Э.Д. Золотницким [6].

В начале 19 века Н.Е. Долгов сформулировал основные принципы метелевого переноса [4]:

- метель начинается при вполне определенной для данных условий состоянии снежной поверхности скорости ветра;

- снежные частицы, принимающие участие в изменении микрорельефа поверхности, находятся в непосредственной близости к земле.

Н.А. Рынин [8] утверждал, что существует возможность перемещения больших масс метелевого снега и на больших высотах над снежной поверхностью.

В регулярных записях о метелях на станциях отсутствует строгая классификация этого явления, нет подразделения метелей на низовые метели и поземки. Можно выделить материал наблюдений Метеорологической обсерватории Московского университета с 1905 по 1913 годы [1]. По этим данным построено распределение метелей и поземок по месяцам года, выявлена связь метелей с отдельными метеорологическими элементами (температура, ветер, давление, влажность). В этом же сборнике произведен более подробный статистический анализ зависимости метелей от метеорологических элементов по 19 станциям ЕТР за период с 1890 по 1910 год.

В начале прошлого столетия большое внимание уделяется исследованию возникновения и эволюции метелей в различных барических системах. Анализ ежедневных синоптических карт для ЕТР позволил выявить наиболее часто встречающиеся при метелях барические положения, а также характерные черты изменения микробарической структуры при метелях [1].

Некоторые авторы выделяют такие явления, как буран, вьюга, пурга, ураган, вводя различия в соответствии с температурным режимом, составом переносимого вещества и скоростью ветра. В работе [2] приводится порог скорости ветра 7 м/с, с достижением которого и определяется общая метель. У других авторов скорость ветра варьируется от 5 до 10 м/с. Кроме представленных типов метели, Дановский [5] выделил верховую метель, отличающуюся переносом снега на значительной высоте.

При прогнозировании метелей ограничимся двумя типами – общая и низовая метель, разделив при этом существенно различающиеся явления по факту выпадения твердых атмосферных осадков. Поземок, как процесс происходящий в тонком приповерхностном слое и не способный оказать сильного воздействия на ощущения человека, рассматриваться не будет.

Существует множество градаций метелей. По признаку рельефа подстилающей поверхности различают:

- метели на равнинной и слабопересеченной местности;
- горные метели.

По признаку силы ветра, скорость которого измеряется на высоте флюгера метеорологических станций, выделяются следующие виды метелей:

- слабые, при скорости ветра менее 10 м/с;
- обычные, при скорости ветра от 10 до 20 м/с;
- сильные, при скорости ветра от 20 до 30 м/с;
- очень сильные, при скорости ветра от 30 до 40 м/с;
- сверхсильные, при скорости ветра свыше 40 м/с.

По насыщенности снегом различаются:

- насыщенные метели, когда ветровой поток переносит количество снега, соответствующее его максимальной транспортирующей способности;
- ненасыщенные метели, когда вес снега, переносимого ветром, меньше максимума, насыщающего ветровой поток.

Традиционно к прогнозу метелей было принято подходить с точки зрения синоптики. Прогноз метелей базируется на прогнозе развития синоптических процессов и сводится к прогнозу снегопада и сильного ветра при отрицательных температурах с учетом состояния снежного покрова. Для прогноза метелей необходим прогноз положения фронтов, атмосферных вихрей и учет последовательности синоптических событий. Общие метели связаны обычно с зонами фронтальных осадков преимущественно в системе углубляющихся циклонов. Главная роль принадлежит при этом теплым фронтам или фронтам окклюзии, более редко – холодным фронтам. Низовые метели и поземки наблюдаются преимущественно в тылу циклонов и на периферии антициклонов (особенно на юго-западной и западной) при больших горизонтальных градиентах давления, т. е. при сильных ветрах, после выпадения сухого снега.

Ранее, кроме синоптического метода, для прогноза метелей в качестве вспомогательного инструмента в оперативной практике использовался автоматизированный метод Таран и Купянской, разработанный в лаборатории синоптических исследований Гидрометцентра России [9]. Метод базируется на численных прогнозах температуры воздуха у поверхности Земли, скорости ветра, количества осадков. Дополнительно учитывается состояние подстилающей поверхности в исходный срок прогноза. Прогноз составляется по следующему алгоритму (рис. 1):

1. Рассчитываются прогностические значения температуры воздуха в узлах сетки. Узлы, в которых температура воздуха выше 0 °С, исключаются из дальнейшего расчета.
2. В остальных узлах по данным синоптических телеграмм определяется погода в исходный срок и оценивается состояние подстилающей поверхности.

3. Рассчитывается прогноз осадков и поле прогностического давления, по которому определяется скорость геострофического ветра.

4. Заключение о наличии и отсутствии в каждом узле сетки метели составляется в зависимости от прогностических значений указанных величин согласно данным табл. 1.

Метели, достигающие по интенсивности опасных метеорологических явлений и стихийных гидрометеорологических явлений, прогнозируются при скорости ветра более 12,4 и 15 м/с соответственно.

При наличии прогнозируемых осадков для прогноза метели используются два параметра: количество осадков и скорость ветра. В случаях, когда осадки не ожидались, оценивается возможность возникновения низовой метели по данным о скорости ветра и характеристике снежного покрова

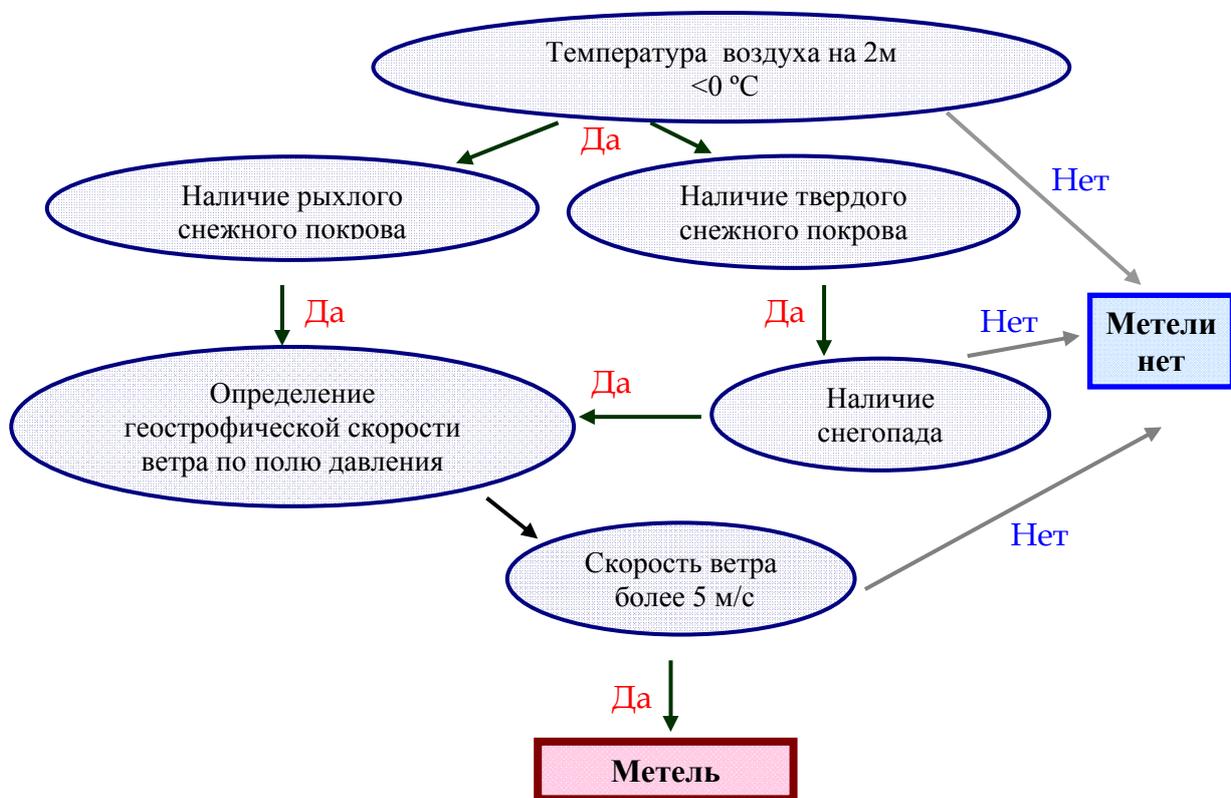


Рис. 1. Алгоритм численного прогноза метелей.

Простота разработанного алгоритма и формы его представления позволяют использовать метод как в ручном, так и автоматизированных вариантах. Оперативные испытания проводились в автоматизированном варианте. Оперативные испытания данного метода проводились на ЕТР в период с октября 1992 г. по март 1993 года. Результаты показали, что общая оправдываемость прогнозов метелей заблаговременностью 12, 24 и 36 ч

составила 81, 76 и 72 % соответственно. При этом оправдываемость прогнозов с явлением метелей колебалась от 76 до 68 %, в то время как метели предупреждены удачно только в 47, 41 и 35 % случаев соответственно.

Таблица 1

Прогноз метелей по методу Таран и Купянской [9]

Прогнозируемое количество осадков в мм за 12 часов и состояние снежного покрова	Прогностическое значение скорости приземного ветра, м/с				
	< 4,9	5...9,9	10,0...12,4	12,5...14,9	>15
0,0-0,4 плотный снег	Метели нет				
0,0-0,4 рыхлый снег	Метели нет	Слабая низовая метель	Умеренная низовая метель	Сильная низовая метель	
> 0,5		Умеренная общая метель		Сильная общая метель	Очень сильная общая метель

В [5] метель рассматривается как двухфазный поток воздуха, пара и снежинок с другими примесями. Корректность определения твердого расхода метели, как ее главной характеристики, зависит от причины взвешивания твердой фазы в пограничном слое. Такой причиной, как было установлено в [5], может быть перепад давления. Если перепад давления отрицателен, то частицы должны как бы «всасываться» в поток, подсакивая вертикально вверх. Опыт показывает, что отрицательные перепады давления действительно встречаются в потоке непосредственно около поверхности.

В этой же монографии приводится формула скорости ветра, соответствующая началу метелевого переноса. Формула выведена из предположения о неподвижной скорости потока, которая не сможет изменить баланс массы. Поэтому скорость, соответствующая началу метелевого переноса, должна превосходить неподвижную скорость [5]:

$$v_{nh} < \sqrt{\frac{lg \frac{h}{\delta_u}}{a_s(\delta)}} * \sqrt{2\delta_{cp}s_0\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)g},$$

где δ_u – шероховатость поверхности, мм; δ_{cp} – средний размер снежных частиц, мм; ρ_s и ρ – массовая плотность снега и воздуха соответственно, гс²/м⁴; s_0 – объемная концентрация

твердой фазы метели, для начала метелевого переноса равная $0,4, \text{ г/м}^2$; h – высота, равная $0,05 \text{ м}$; $a_s(\delta)$ – коэффициент, равный 1.

По этой формуле можно определить скорость, соответствующую началу метелевого переноса. В [5] за средний размер снежных частиц принята величина $0,3 \text{ мм}$. Поскольку в выходной информации прогностических численных моделей такого параметра, как размер снежных частиц, нет, мы также приняли его равным $0,3 \text{ мм}$. Параметры ρ_s , ρ и δ_w вычислены по прогностическим полям плотности снега и воздуха, а также шероховатости поверхности.

Алгоритм прогноза метели на основе данных модели WRF-ARW

Как было показано выше, прогноз метели базируется на прогнозе твердых атмосферных осадков и сильных ветров при отрицательном температурном режиме и с учетом состояния снежного покрова. В выходных данных модели содержится большое количество прогностической информации о полях температуры (температура поверхности, почвы, воздуха и пр.), а также три компоненты скорости ветра и динамическая скорость. Такого набора параметров для прогноза метели вполне достаточно. Не вызывает также затруднений и информация об осадках. В качестве «снежных» переменных имеем параметры: факт наличия/отсутствия снега, плотность и водный эквивалент снега.

Как указано в [2], общая метель начинается при выпадении твердых осадков тогда, когда ветер достигнет скорости 7 м/с . Примем этот порог в качестве критического для прогнозирования общей метели. К прогнозу низовой метели следует подходить по-другому. В литературе не встречается точного порога скорости ветра, достижение которого необходимо для начала низовой метели. В случае с переносом ветром ранее отложенного снега большое значение имеют именно физические характеристики снежного покрова.

С учетом вышесказанного мы предлагаем следующий алгоритм для прогноза общей и низовой метели (рис. 2).

1. Анализируется поле температуры воздуха, рассчитанного моделью WRF-ARW. Если температура превышает $0 \text{ }^\circ\text{C}$, то принимается, что метелей (общих и низовых) в данной ячейке нет.

2. Анализируется факт выпадения осадков в твердом виде. Если осадки выпадают и скорость ветра на 10 м превышает 7 м/с , то прогнозируется общая метель.

3. Если твердых осадков нет и высота снежного покрова менее $0,1 \text{ см}$, то метель не прогнозируется.

4. При наличии снежного покрова, если скорость ветра превысит критическую, прогнозируется низовая метель.

В данной работе испытано два метода определения критической скорости ветра, достаточной для начала низового метелевого переноса.

Критическая скорость, соответствующая началу низовой метели, зависит от состояния подстилающей поверхности, то есть от свойств снега. Первый предлагаемый метод основан на определении типа снега по его плотности. Одновременно в расчетах используется динамическая скорость ветра [3]:. Плотность снега определяется по прогностическим данным модели как отношение водного эквивалента снега к высоте снега. Таким образом, выделены четыре типа снега с учетом [7]:

1. Сухой свежесвыпавший снег плотность $0,01-0,05 \text{ г/см}^3$,
динамическая скорость $0,15 \text{ м/с}$;
2. Сухой снег, плотность $0,05-0,1 \text{ г/см}^3$,
отложившийся несколько часов назад динамическая скорость $0,22 \text{ м/с}$;
3. Уплотненный снег плотность $0,1-0,4 \text{ г/см}^3$,
динамическая скорость $0,4 \text{ м/с}$;
4. Старый затвердевший снег плотность $0,4-0,7 \text{ г/см}^3$,
динамическая скорость 1 м/с .

Соответственно, если динамическая скорость ветра, прогнозируемая моделью, превышает предложенные критические значения, прогнозируется низовая метель.

Второй метод основан на вычислении порогового значения скорости ветра на 10 м [5]. В его расчетах учитывается параметр шероховатости снежной поверхности, размер снежных частиц, объемные плотности снега и воздуха. Подробная формула приведена выше

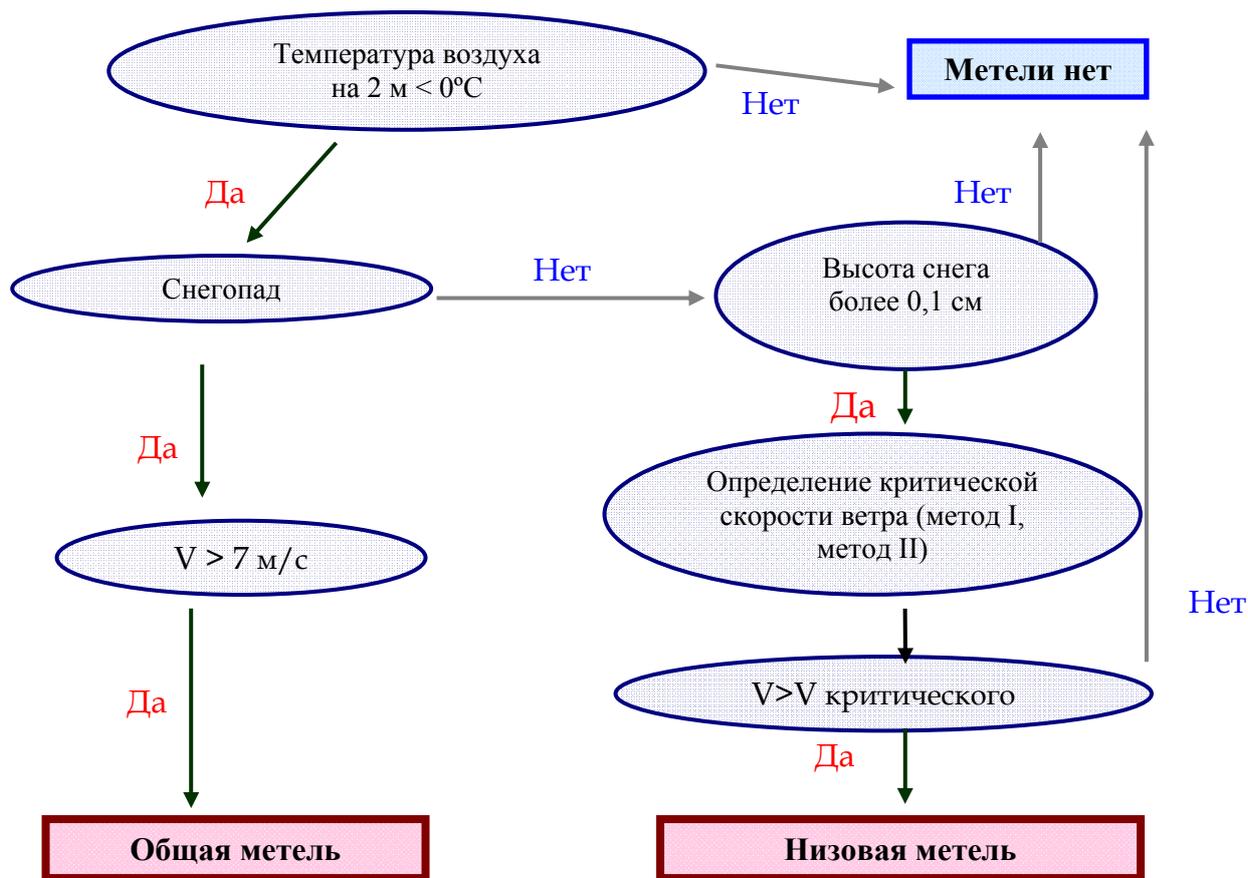


Рис. 2. Предлагаемый алгоритм прогноза общих и низовых метелей.

Следует отметить, что пороговые значения скорости ветра для определения общих метелей, достаточная высота снежного покрова при прогнозировании низовой метелевой деятельности могут быть изменены в целях улучшения прогноза. Подобные изменения могут быть связаны как с метеорологическими особенностями района, для которого подготавливается прогноз метелей, так и со систематическими ошибками прогнозирования численной моделью того или иного параметра.

Результаты прогнозов общих и низовых метелей по предложенному алгоритму для Мурманской области

В лаборатории моделирования общей циркуляции и климата разрабатывается система прогноза опасных метеорологических явлений для Мурманской области [10]. Кроме прогноза экстремальных величин ветра, осадков и температуры планируется прогнозировать

метели. В качестве региона для тестирования алгоритма прогноза была выбрана Мурманская область.

На выбранной территории находятся 30 станций, по данным которых были определены случаи метелевой деятельности. Станционная информация использовалась в качестве эталонных значений для валидации результатов. На рис. 3 показана расчетная область модели.

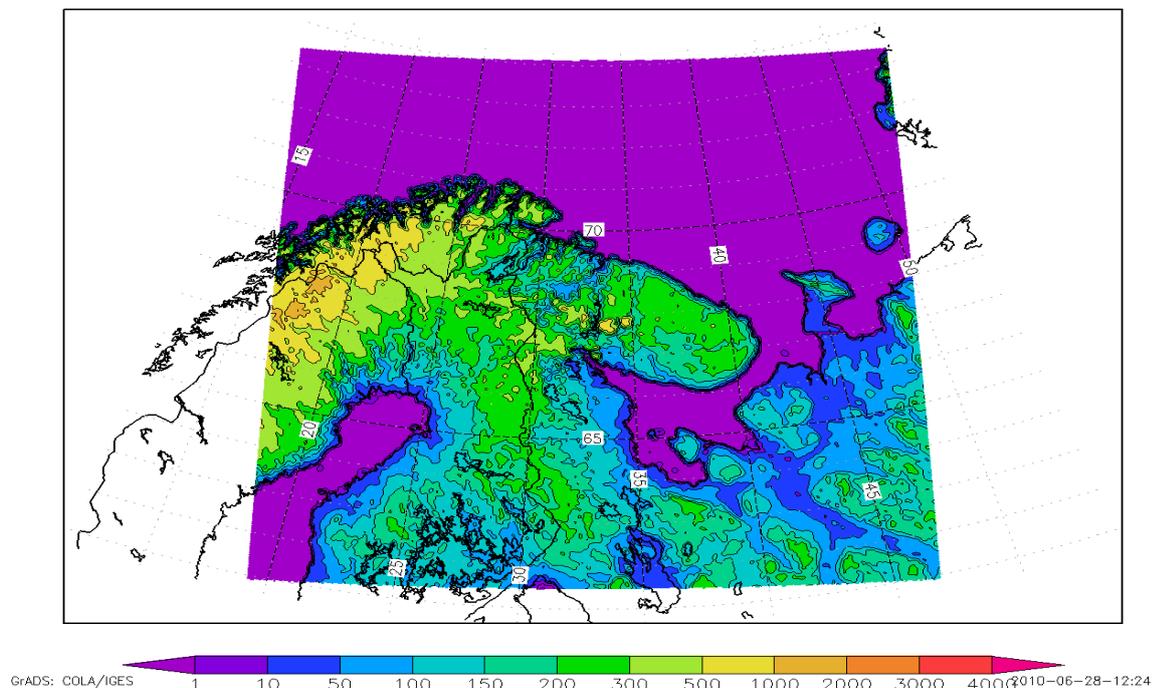


Рис. 3. Расчетная область прогнозов для Мурманской области и использованная орография.

В данной работе для прогнозов реализована полярная версия модели WRF версия 3.3.1 с пространственным разрешением 5 км. В качестве начальных и краевых условий использовался реанализ NSEP/NCAR с 6-часовым временным шагом. За период с 2000 по 2010 год на территории Мурманской области наблюдалось более 50 случаев низовых метелей. Из всего ряда явлений выделено два наиболее ярких, при которых метелевая деятельность наблюдалась более, чем на трех синоптических станциях: с 11 по 13 января 2003 г. и с 26 по 28 января 2007 г.. Для этих случаев получены численные значения характеристик снега, ветра и осадков.

В целях улучшения качества прогноза численные эксперименты были проведены с усвоением станционных данных (система 3DVAR).

Для указанных случаев метелевой деятельности посчитан прогноз низовой метели по предложенной выше методике и общей метелевой деятельности. Расчет критической

скорости ветра, необходимой для начала метелевого переноса, производился по двум методам, описанным выше.

Прежде чем оценивать прогноз факта наличия или отсутствия метелей, оценивались базовые метеорологические поля температуры, скорости ветра и твердых осадков. В качестве эталона использованы данные синоптических станций, находящихся на рассматриваемой территории.

Таким образом, мы получили базовый уровень качества прогнозов региональной модели. Стандартный уровень ошибок прогноза температуры для данного региона составил: 2,5 °С для 2003 г., 3,1 °С для 2007 г.; с системой усвоения данных 3,1 и 2,5 °С соответственно. Ошибки скорости ветра для двух рассматриваемых периодов составили 2,4–2,8 м/с. Примечательно, что прогностическая температура воздуха занижается по сравнению со стационарными данными, а скорость ветра, наоборот, завышается примерно на 2 м/с. Это говорит о том, что при прогнозировании метелей с использованием этих данных будет велико количество «ложных» метелей, при том, что число не предсказанных метелей будет невелико.

При оценке метелевой деятельности в качестве эталона используется информация о характере погоды с синоптических станций. Оценивается только факт наличия метели, рассчитанной с использованием двух методов определения критической скорости ветра.

Как говорилось выше, за десятилетний период с 2000 года по Мурманской области были выбраны случаи низовой метели, при которых факт низовой метели отмечен наблюдателями более чем на двух синоптических станциях. Несмотря на то, что в данном регионе находятся 30 станций, за этот период было зафиксировано 4 низовых метели. По этим четырем случаям и были оценены численные прогнозы (табл. 2). Из данных, приведенных в таблице, видно, что оправдываемость прогноза низовых метелей не превышает 25 %. Во всех случаях велико количество лишних тревог и пропусков цели. По приведенным данным не удастся сделать вывод о том, какой из методов определения критической скорости представляется более надежным. В условиях слишком малого количества синоптических данных, приведенные оценки нельзя назвать объективными.

Метелевая деятельность общего характера начинается тогда, когда при выпадении твердых осадков ветер на 10 м достигает отметки в 7 м/с. Однако для предсказания метелей по модельным данным, в целях улучшения качества прогноза, эти критерии могут быть изменены. Оценки скорости ветра, полученной в ходе расчетов (табл. 3), показали, что прогнозы завышают наблюдаемую скорость ветра. Поэтому подбор критериев для ветра

осуществлялся путем увеличения порогового значения. Так, лучшие результаты показал вариант прогнозирования метелей при скорости ветра более 9 м/с и осадках более 0,1 см.

Таблица 2.

Качество прогноза низовой метели (в долях единицы)

Статистический показатель	Первый метод определения критической скорости ветра	Второй метод определения критической скорости ветра
11–13 января 2003 года		
Оправдываемость	0,23	0,25
Предупрежденность	0,6	0,2
Лишние тревоги	0,77	0,75
Пропуск цели	0,4	0,8
Предупрежденность отсутствия явления	0,33	0,8
Критерий Пирси-Обухова	–0,06	0
26–28 января 2007 года		
Оправдываемость	0,25	0,2
Предупрежденность	0,06	0,16
Лишние тревоги	0,75	0,8
Пропуск цели	0,9	0,8
Предупрежденность отсутствия явления	0,9	0,52
Критерий Пирси-Обухова	–0,03	–0,3

Таблица 3

Качество прогноза общей метели (в долях единицы)

Статистический показатель	Модель WRF	Модель WRF с 3DVAR
11–13 января 2003 года		
Оправдываемость	0,32	0,44
Предупрежденность	0,8	0,28
Лишние тревоги	0,67	0,5
Пропуск цели	0,2	0,7
Предупрежденность отсутствия явления	0,5	0,9
Критерий Пирси-Обухова	0,35	0,18
26–28 января 2007 года		
Оправдываемость	0,23	0,1
Предупрежденность	0,56	0,3
Лишние Тревоги	0,8	0,9
Пропуск Цели	0,4	0,7
Предупрежденность отсутствия явления	0,5	0,3
Критерий Пирси-Обухова	0,08	–0,4

Как и в случае прогнозирования низовых метелей, оправдываемость прогнозов невелика. В случае прогнозирования метеорологических полей без использования системы усвоения данных 3DVAR показатели предупреденности наличия или отсутствия метели можно считать удовлетворительными. Практически по всем статистическим критериям вариант прогноза WRF 3DVAR оказался менее надежным. Основные ошибки в обоих случаях связаны с ошибочным предсказанием наличия метелевой деятельности. Эта ошибка возникает из-за неправильных расчетов области выпадения осадков. Более правильным подходом к оценке таких опасных явлений, как метели, в условиях недостатка станционных данных будет подход, изложенный в статье [10], в основе которого лежит оценка опасных явлений по выделенным административно-географическим районам (рис. 4).

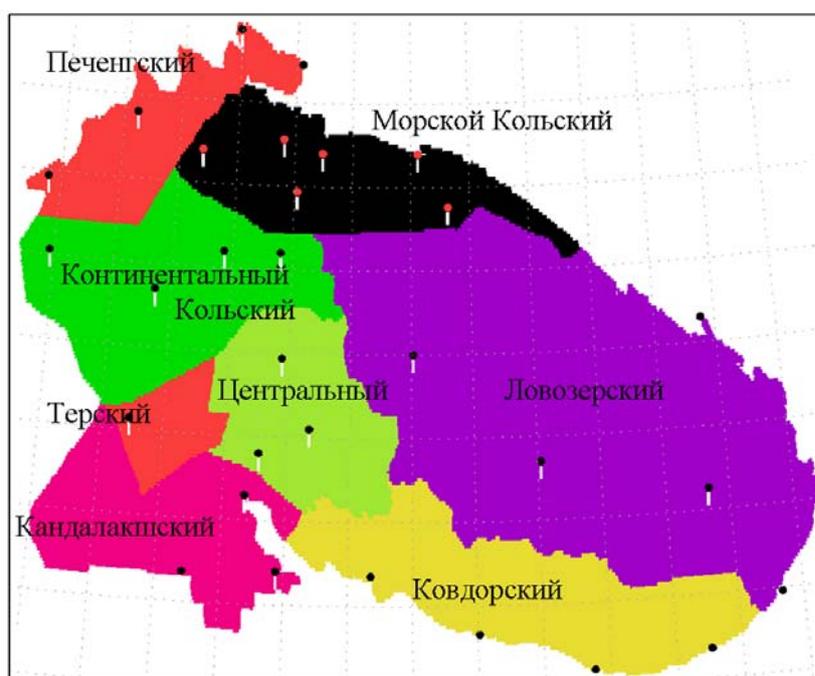


Рис. 4. Районирование Мурманской области по административно-географическому признаку и расположенные на ней синоптические станции.

Низовые метели в указанные сроки 2003 и 2007 гг. наблюдались в Печенгском и Мурманском районах. Проведена попытка оценивать полученный прогноз метели по этим районам (другие районы в связи с отсутствием станционной информации не рассматривались). Результаты представлены в табл. 4, 5.

Как и ожидалось, оценки общих и низовых метелей для регионов заметно улучшились. Практически во всех случаях предупреденность факта наличия метелевой деятельности близка к единице. Статистические показатели ошибок прогноза низовых метелей лучше при использовании второго метода определения критической скорости.

Таблица 4

Качество прогноза низовой метели по отдельным районам Мурманской области
(в долях единицы)

Статистический показатель	Первый метод определения критической скорости ветра	Второй метод определения критической скорости ветра
11–13 января 2003 года		
Оправдываемость	0,4	0,3
Предупрежденность	1,0	0,8
Лишние тревоги	0,6	0,6
Пропуск цели	0,0	0,2
Предупрежденность отсутствия явления	0,4	0,5
Критерий Пирси-Обухова	0,4	0,3
26–28 января 2007 года		
Оправдываемость	0,23	0,45
Предупрежденность	0,6	0,9
Лишние Тревоги	0,7	0,5
Пропуск Цели	0,5	0,08
Предупрежденность отсутствия явления	0,13	0,35
Критерий Пирси-Обухова	–0,4	0,3

Таблица 5

Качество прогноза общей метели по отдельным районам Мурманской области
(в долях единицы)

Статистический показатель	Модель WRF	Модель WRF с 3DVAR
11–13 января 2003 года		
Оправдываемость	0,38	0,51
Предупрежденность	0,97	0,87
Лишние тревоги	0,62	0,49
Пропуск цели	0,03	0,13
Предупрежденность отсутствия явления	0,14	0,57
Критерий Пирси-Обухова	0,11	0,44
26–28 января 2007 года		
Оправдываемость	0,32	0,42
Предупрежденность	0,96	0,89
Лишние Тревоги	0,68	0,58
Пропуск Цели	0,04	0,11
Предупрежденность отсутствия явления	0,11	0,47
Критерий Пирси-Обухова	0,07	0,36

Следует отметить, что статистические оценки качества прогноза метелей (первый метод) рассчитаны по большому ряду данных, тогда как оценки второго метода посчитаны для единичных случаев прогноза метелей, осредненных за 2003 и 2007 гг. Во всех случаях

показатели оправдываемости выше у методики определения метели, описанной в работе [9], тогда как предупреденность заметно выше у алгоритма прогноза, представленного в данной статье (табл. 6).

Таблица 6

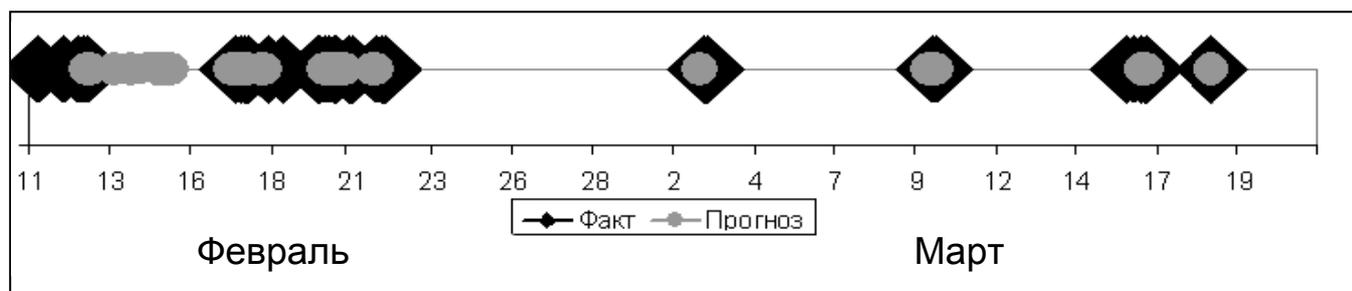
**Сравнение качества прогнозов общих метелей
по методу Таран-Купьянской [9] (1) и представленному в данной работе (2)**

Заблаговременность, ч	Оправдываемость		Предупреденность	
	Метод 1	Метод 2	Метод 1	Метод 2
12	0,81	0,5	0,47	1
24	0,76	0,65	0,41	1
36	0,72	0,47	0,35	0,87

Подробный анализ прогностических карт низовых метелей показал, что хуже всего прогнозируются метели на побережье – на двух северных станциях Печенгского района. Эта ошибка связана с тем, что в модели снег на побережье «сдувается» сильными ветрами, хотя на станциях его высота превышает порог в 0,1 см.

Во всех случаях прогнозирования метелей велико значение лишних тревог. При прогнозе общей метелевой деятельности ошибка в этом элементе обусловлена значительным увеличением границ выпадающих осадков. При использовании системы усвоения данных 3DVAR количество лишних тревог уменьшается благодаря более корректному описанию полей твердых осадков.

Описанная система прогнозирования общей и низовой метелевой деятельности внедрена в регулярный счет. Ниже представлен график (рис. 5) наличия общих метелей на станции 22324 «Умба» с 11 февраля по 22 марта 2012 года. Эта станция выбрана в связи с высокой повторяемостью в этой местности метелей. По графику видно, что признак наличия метелей, посчитанный по данным модели WRF-ARW, хорошо согласуется с наблюдениями. Только в начале рассматриваемого периода наблюдается расхождение между прогностическими и фактическими сроками начала метелей.



**Рис. 5. Наблюдавшиеся метели и их прогноз на станции 22324 «Умба»
с 11 февраля по 22 марта 2012 года.**

По четырем станциям Мурманской области (22324 – Умба, 22334 – Кашкаранцы, 22339 – Чаванга, 22349 – Палицы), наиболее подверженным метелевой деятельности, посчитано качество оперативного прогноза общих метелей в период с 11 февраля по 22 марта 2012 года (табл. 7).

Таблица 7

Качество оперативного прогноза общей метели по четырем станциям Мурманской области с 11 февраля по 22 марта 2012 года (в долях единицы)

Статистический показатель	Модель WRF
Оправдываемость	0,52
Предупрежденность	0,28
Лишние тревоги	0,48
Пропуск цели	0,72
Предупрежденность отсутствия явления	0,95
Критерий Пирси-Обухова	0,22

Заключение

В работе представлен алгоритм прогноза общих и низовых метелей с использованием модели WRF-ARW. При анализе качества прогноза метелевой деятельности более корректно оценивать факт наличия метели не по точкам расположения синоптических станций, фиксирующих текущую погоду, а по районам. В качестве районов было использовано деление на округа по административно-географическому признаку, предложенное в [10].

Лучшие результаты показал метод определения пороговой скорости ветра, достижение которой необходимо для начала низовой метели, в котором учитывается плотность снега и воздуха, а также шероховатость поверхности. При прогнозе общих метелей использование системы усвоения данных 3DVAR привело к значительному улучшению качества прогнозов. В обоих случаях прогноза метелевой деятельности велик процент лишних тревог.

Прогноз низовых и общих метелей по Мурманской области внедрен в оперативную практику. По представленной методике рассчитан прогноз метелей с 11 февраля по 22 марта 2012 года. Оценка по отдельно выбранным станциям, отличающимся большой повторяемостью общих метелей, показала относительно высокий процент оправдываемости прогнозов и меньший, по сравнению с экспериментами 2003 и 2007 гг., процент лишних тревог.

Работа над предложенной методикой в дальнейшем будет продолжена с целью улучшения качества прогноза и уменьшения ложных тревог метелевой деятельности.

Работа выполнена с частичной поддержкой гранта РФФИ 10-08-00493-а и FP7-IRSES-«Climseas».

Список использованных источников

1. *Бончаковский В.Ф.* Метели и поземки // Труды Центрального аэрогидродинамического института. – 1925. – Вып. 11. – 78 с.
2. Вельтишев Н.Ф. Руководство по краткосрочным прогнозам. – Гидрометеоиздат, 1986. – 299.
3. *Грей Д.М., Мэйл Д.Х.* Снег. – Л.: Гидрометеиздат 1986. – 737 с.
4. *Долгов Н.Е.* Борьба со снегом на русских железных дорогах. Вып. 1. – Екатеринбург, 1909.
5. *Дюнин А.К.* Механика метелей. – Новосибирск: Сибирское отделение АН СССР, 1963. – 376 с.
6. *Золотницкий Э.Д.* О снежных заносах // Журнал Министерства путей сообщения (часть неофициальная). – Т. 4, кн. 1.– 1878.
7. *Рихтер Г.Д.* Снежный покров, его формирование и свойства. – М.: Издательство академии наук СССР, 1945. – 120 с.
8. *Рынин Н.А.* Заметка по поводу изучения работы снеговых защит // Сборник Института инженеров путей сообщения. Вып. 89. – Петроград, 1915
9. *Таран И.В., Купянская Т.П.* Прогноз метели различной интенсивности, включая стихийные для Европейской территории СССР // Труды Гидрометцентра СССР. – 1989. – Вып. 299. – С. 22–24.
10. *Ширяев М.В., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Бычкова В.И.* Предварительные оценки результатов работы экспериментальной системы прогноза опасных метеорологических явлений для Мурманской области на базе модели WRF-ARW // Труды Международной молодежной школы и конференции CITES-2011 «Computational information technologies for environmental sciences», Томск, Россия, 3-13 июля 2011 г., – С. 22–26.

Поступила в редакцию 25.04.2012 г.