

В данной статье нарушен алфавитный порядок расположения работ в списке литературы, в связи с этим внесены следующие изменения: статья Шакиной и др. первоначально имела № 5 в списке литературы, теперь это № 7. Соответственно оба Руководства перенумерованы как № 5 и 6 (были № 6 и 7).

Ю. И. Юсупов

К ВОПРОСУ ОБ ОПЕРАТИВНОМ ПРОГНОЗЕ ШКВАЛОВ

Введение

Шквал — внезапное резкое усиление ветра — относится к опасным метеорологическим явлениям. Скорость ветра при шквале нередко достигает 18—25 м/с, а иногда и более. Наиболее известными в настоящее время способами прогноза шквалов являются методы Пескова и Снитковского, Решетова, Фобуша—Миллера [6]. Эти методы имеют высокую оправдываемость, близкую к 90 %, однако успешность прогноза в большой степени зависит от правильной оценки синоптического положения. Наиболее благоприятными для возникновения большинства шквалов являются следующие условия [2]:

- холодный фронт вблизи вершины волнового возмущения при смещении волны со скоростью 30—40 км /ч и более;
- холодный фронт и фронт окклюзии со скоростью смещения 30—40 км /ч и более;
- небольшая барическая ложбина в теплом секторе циклона на приземных картах погоды;
- передняя часть высотной барической ложбины (на картах АТ₅₀₀, АТ₄₀₀, АТ₃₀₀ и АТ₂₀₀), передняя часть термической ложбины или очага холода в тропосфере (на картах ОТ_{500/1000} и ОТ_{300/1000}).

Прогноз составляется в два этапа. На первом этапе производится совместный анализ карт погоды и спутниковых снимков и по этим материалам составляется прогноз ожидаемого синоптического положения. Если комплексный синоптический анализ дает указание на то, что в районе ожидаются условия, благоприятные для развития шквалов, то переходят ко второму этапу прогноза — расчету термодинамических параметров. Собственно, первый этап и представляет основную сложность для создания надежного алгоритма по оперативному прогнозу шквалов. В данной статье предложено для определения синоптического положения использовать расчеты взаимодействия потенциального вихря с бароклинными зонами в тропосфере.

Б. Хоскинс в работе [10] объясняет развитие неблагоприятных явлений погоды взаимодействием стратосферы с тропосферой. Для определения активности в стратосфере используется расчет потенциального вихря Эртеля.

$PV = (f + \zeta_\theta) \cdot (-g\partial\theta/\partial P)$, $\Psi = \nabla|\nabla ZTE| \cdot n_{ZTE}$, $A_g = -V \cdot \nabla ZTE$ — уточните, здесь знак умножения означает скалярное произведение векторов или это обычное произведение, для которого этот знак можно пропустить (как, например в формуле $E = mc^2$).

Потенциальный вихрь математически представляет собой произведение абсолютного вихря на изэнтропической поверхности на выражение, определяющее устойчивость атмосферы [4]:

$$PV = (f + \zeta_\theta) \cdot (-g\partial\theta/\partial P), \quad (1)$$

где f — параметр Кориолиса, ζ_θ — относительный вихрь скорости на изэнтропической поверхности, g — ускорение силы тяжести, θ — потенциальная температура, P — давление.

Составляющие относительного вихря в атмосфере по осям X , Y и Z отличны от нуля. Однако основной характеристикой вихревого движения является вертикальная составляющая вихря скорости. Две другие составляющие вихря скорости во внетропических широтах примерно в 10–100 раз меньше вертикальной составляющей. Поэтому значение вертикальной составляющей называют относительным вихрем скорости, который определяется по формуле

$$\zeta_\theta = \partial u_\theta / \partial x - \partial v_\theta / \partial y,$$

где u_θ и v_θ — составляющие скорости вдоль осей X и Y на изэнтропической поверхности.

Максимальные значения потенциальный вихрь приобретает в стратосфере, где устойчивость атмосферы максимальна. Значения потенциального вихря в тропосфере обычно на порядок меньше, поэтому потенциальный вихрь может служить индикатором для определения границы между стратосферой и тропосферой — динамической тропопаузы [3].

Нередко стратосферный воздух может опускаться до уровней 500 и даже 600 гПа. В таких случаях говорят об образовании аномалий потенциального вихря (положительных в северном полушарии). Тогда, при наличии определенных условий в тропосфере, возможно взаимодействие стратосферного потенциального вихря с нижними слоями атмосферы. Такими условиями являются:

- низкая устойчивость в тропосфере;
- существование в нижних слоях атмосферы бароклинной зоны, непосредственно под аномалией потенциального вихря.

При адиабатическом движении потенциальный вихрь сохраняет свое значение [4]. Поэтому при вторжении стратосферного воздуха в тропосферу, где устойчивость атмосферы меньше, чем в стратосфере, значение относительного вихря должно возрастать. Потенциальный вихрь в стратосфере имеет циклоническую направленность вращения, которую он передает в нижние слои атмосферы. Циркуляция в баро-

$$ZTE = - \sum_{850}^{500} R/g T_{me} \ln(P_u/P_l) - \text{уточните, что стоит в знаменателе дроби: только } g \text{ или } g T_{me} \ln(P_u/P_l), \text{ в обоих случаях вид формулы изменится, так как по-разному надо ставить скобки, ограничивающие знаменатель:}$$

$$ZTE = - \sum_{850}^{500} R/g T_{me} \ln(P_u/P_l) \text{ или } ZTE = - \sum_{850}^{500} R/[g T_{me} \ln(P_u/P_l)]$$

клинной зоне, в свою очередь, приводит к образованию положительной температурной аномалии, т. е. к образованию потенциального вихря на нижних уровнях. При взаимодействии пары вихрей с низкого и высотного уровней возникает взаимное усиление каждого из вихрей. Вследствие циркуляции, возникшей на нижнем уровне, и сопровождающей ее конвергенции образуются восходящие движения. Насыщенный воздух, поднимаясь вверх, освобождает большое количество скрытой теплоты конденсации, что вызывает нагрев гидростатического столба от земли до стратосферы. Это приводит к быстрому падению давления на поверхности, возникновению штормовых ветров и осадков. Такая схема взаимодействия стратосферы с бароклинными зонами в тропосфере описана в многочисленных работах (например, в работах [9, 12—14]). Кроме того, холодный стратосферный воздух, вторгающийся в тропосферу и располагающийся над теплым насыщенным воздухом во фронтальной зоне, вызывает развитие конвекции [8].

1. Оперативный прогноз шквалов в технологии ГИС Метео

На основе изложенного прогноз места возникновения неблагоприятных явлений погоды, в том числе и зоны возможного возникновения шквалов, сводится к поиску бароклинических зон в тропосфере, расчету потенциального вихря и определению степени неустойчивости атмосферы.

В 1996 г. в технологии ГИС Метео [1] создано программное средство для оперативного расчета фронтальных зон в нижней тропосфере по методике Венского института метеорологии и геодинамики [11].

Фронтальный оператор по этой методике определяется так:

$$\Psi = \nabla |\nabla ZTE| \cdot n_{ZTE}, \quad (2)$$

где ∇ — оператор градиента, $\nabla = i\partial/\partial x + j\partial/\partial y$; n_{ZTE} — единичный вектор, направленный в сторону уменьшения ∇ZTE .

В качестве фронтального параметра использована эквивалентная «толщина» слоя от 850 до 500 гПа, определяемая следующим образом:

$$ZTE = - \sum_{850}^{500} R/g T_{me} \ln(P_u/P_l),$$

$$T_{me} = (T_{e,u} - T_{e,l}) / \ln(T_{e,u}/T_{e,l}),$$

где T_{me} — средняя эквивалентная температура в слое, $T_{e,u}$ и $T_{e,l}$ — ????

$$T_e = T \exp[Lq_m/(C p T)],$$

Поясните, что такое T_e , $T_{e,u}$ и $T_{e,l}$

Поясните, что значит q_m — отношение смеси. Что к чему здесь относится?

L — скрытая теплота конденсации, q_m — отношение смеси, C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Для устранения тех участков гребней, которые не соответствуют активным фронтальным зонам, используется индекс влажности:

$$HIX = (ZTE - ZT)/(ZTES - ZT), \quad (3)$$

где ZT — толщина слоя 850—500 гПа, $ZTES$ — эквивалентная толщина слоя в состоянии насыщения.

Значения $HIX > 0,7$ и $\Psi > 2,5$ считаются необходимым условием для существования активных фронтальных зон [11]. Значения тем больше, чем больше бароклинность в слое 850—500 гПа, и этот параметр содержит информацию не только о положении, но и об интенсивности фронта [7].

В настоящее время в технологии ГИС Метео можно оперативно рассчитывать фронтальные зоны с определением холодных и теплых участков фронта (по значению адвективного изменения фронтального параметра):

$$A_g = -V \cdot \nabla ZTE, \quad (4)$$

где V — геострофический ветер, ZTE — градиент фронтального параметра.

При $A_g < 0$ определяется холодный фронт, при $A_g \geq 0$ — теплый. Действительно, A_g — взятое со знаком «минус» скалярное произведение двух векторов имеет отрицательное значение, когда угол между векторами менее 90° . Вектор градиента фронтального параметра направлен в сторону увеличения этого параметра, следовательно, при $A_g < 0$ будет происходить адвекция холодного воздуха, а при $A_g > 0$ — теплого.

Потенциальный вихрь рассчитан по формуле (1). Проведено множество экспериментов с целью найти наилучший способ определения аномалий потенциального вихря. Для этого создано программное средство, позволяющее оперативно создавать следующие карты изэнтропического анализа:

- значений влажности, скорости ветра и вертикальных скоростей на любой изэнтропической поверхности;
- значений абсолютного и потенциального вихрей на изэнтропических поверхностях;
- потенциального вихря на стандартных изобарических поверхностях;
- высоты динамической тропопаузы — поверхности, на которой значение потенциального вихря постоянно;
- значений абсолютного вихря на поверхности равного значения потенциального вихря.

См. текст: «...**Третье необходимое условие** активизации неблагоприятных явлений — неустойчивость в нижних слоях атмосферы.» А где первые два условия? Если при перечислении этих условий использованы числительные (в частности, «Третье»), то следует числительным выделить и предыдущие условия

Определение аномалий потенциального вихря имеет свои сложности из-за изменения высоты изэнтропической поверхности в зависимости от времени года. Поэтому, опираясь на исследования, проведенные К. Георгиевым [9], было принято решение использовать значение изэнтропического потенциального вихря, приведенное к уровню 500 гПа. В соответствии с работой [9] считается, что значение потенциального вихря на уровне 500 гПа, превышающее $0,6 PVU^*$, является определяющим для существования аномалии потенциального вихря в стратосфере.

Кроме того, пересечение зон потенциального вихря определялось только на холодных участках фронтальных зон, так как только в этом случае может образоваться положительная температурная аномалия в тропосфере, возникающая вследствие циклонической циркуляции в бароклинной зоне.

Третье необходимое условие активизации неблагоприятных явлений — неустойчивость в нижних слоях атмосферы. В данном случае неустойчивость атмосферы определялась при помощи расчета индекса неустойчивости TT [15]:

$$TT = (T_{d850} - T_{500}) + (T_{850} - T_{500}), \quad (5)$$

где T_{850} и T_{d850} — температура воздуха и температура точки росы на уровне 850 гПа, а T_{500} — температура воздуха на уровне 500 гПа.

При $TT > 44$ определялась неустойчивость в нижних слоях атмосферы.

Предлагается для прогноза зон, где ожидаются благоприятные для развития шквалов условия, рассчитывать функцию Fe , определяемую следующим образом:

$$Fe = \Psi \cdot PV, \quad (6)$$

при $\Psi < 2,5$ принимают $\Psi = 0$; при $PV < 0,6$ принимают $PV = 0$; при $TT < 44$ и $A_g > 0$ принимают $Fe = 0$.

Таким образом, работая в технологии ГИС Метео, можно оперативно изготавливать карты с нанесенными на них значениями функции Fe , рассчитанными в узлах регулярной сетки, строить изолинии или получать значения этой функции в виде закрашенных областей. Можно также рассчитать максимальную скорость ветра, используя способ Пескова—Снитковского:

$$U_{\max} = -4,00 \cdot 10^{-6} S^4 + 8,80 \cdot 10^{-4} S^3 - 6,18 \cdot 10^{-2} S^2 + 1,969 S, \quad (7)$$

где S — сумма скоростей ветра от поверхности земли до уровня 500 гПа.

* $1 PVU = 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ К кг}^{-1}$.

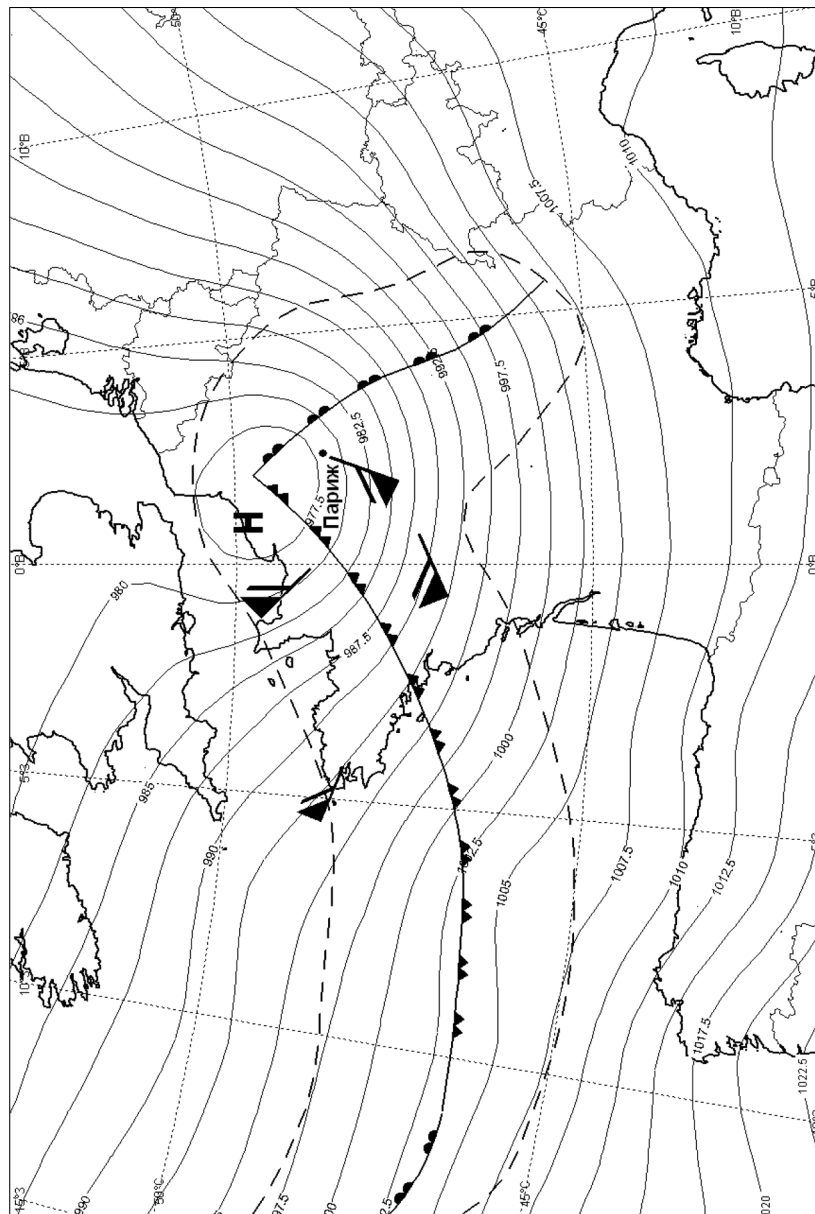


Рис. 1. Поле давления на уровне моря и фронтальные зоны (пунктир) 26 декабря 1999 г., 6 ч ВСВ.

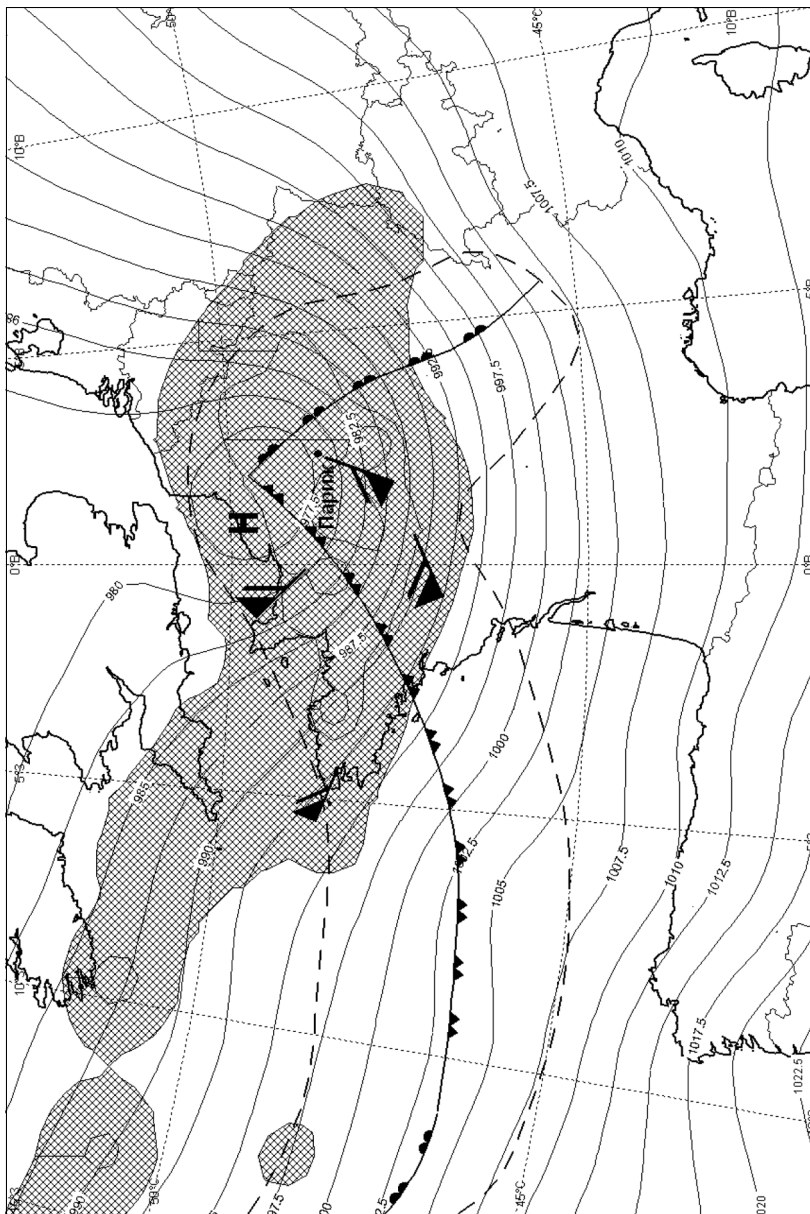


Рис. 2. Поле потенциального вихря на уровне 500 гПа 26 декабря 1999 г., 6 ч ВСВ.

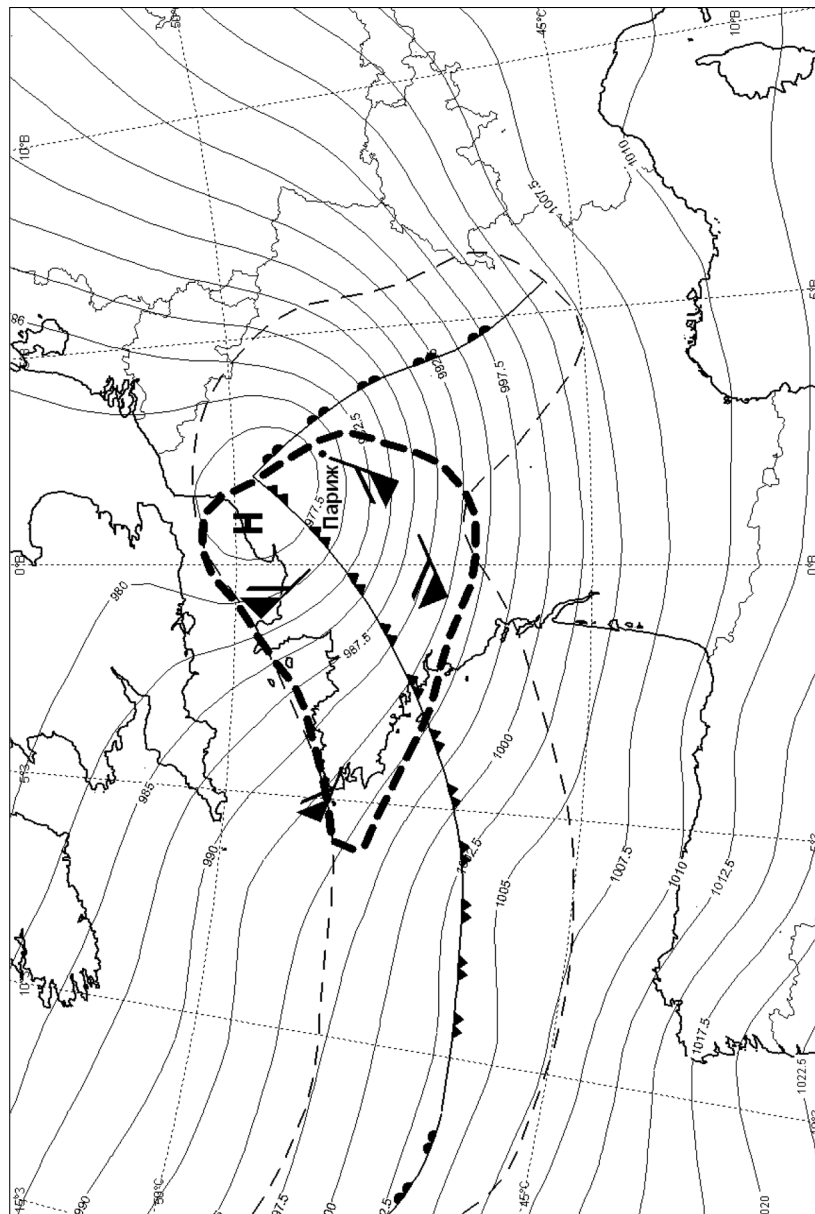


Рис. 3. Рассчитанная зона шквалов (пунктир) на 26 декабря 1999 г., 6 ч ВСВ.

На рис. 1 приведена карта давления на уровне моря за 26 декабря 1999 г. в 06 ч ВСВ. На ней приведены бароклинные зоны в тропосфере (пунктир) и фронтальные линии, рассчитанные по данным ГРИБ УКМО (Exeter) за 25 декабря 1999 г., 12 ч ВСВ, с заблаговременностью 18 ч. На рис. 2 приведено поле потенциального вихря на уровне 500 гПа (заштрихованная область соответствует значениям $PV \geq 0,6PVU$). На рис. 3 жирным пунктиром обозначена итоговая зона опасных явлений, совпадающая с фактической зоной штормовых ветров во Франции 26 декабря 1999 г. в 6 ч ВСВ.

2. Исходные данные и результаты расчетов

В качестве исходных использованы данные в коде ГРИБ, распространяемые по глобальной сети телесвязи Всемирной метеорологической организации (ВМО). Разрешение этих данных по горизонтали составляет $1,25^\circ$, т. е. примерно 140×140 км.

Для расчета потенциального вихря необходимо наличие данных о температуре воздуха, скорости и направлении ветра на стандартных уровнях атмосферы от 850 до 300 гПа, кроме того, для определения фронтальных зон — данные о влажности и геопотенциале в слое от 850 до 500 гПа. Шаг по времени прогнозов в коде ГРИБ составляет 6 ч.

Исследования проводились с использованием архивных данных Научно-производственного центра (НПЦ) «Мэп Мейкер». В качестве исходных привлечены данные моделей УКМО (Exeter) и NCEP (Washington). Исследованы 40 случаев шквалов в Европе с июня 1998 г. до июля 2002 г. Результаты приведены в табл. 1.

Конкретные случаи для проверки работоспособности программы расчета выбирались по сообщениям средств массовой информации, в которых эти случаи представлялись стихийными бедствиями из-за ветров, порой достигавших ураганной силы, многие из них сопровождались человеческими жертвами и большими материальными потерями. Такой принцип отбора использован из-за того, что исследуемые явления часто характеризуются небольшим масштабом (десятки километров) и скоротечностью (иногда от 30 мин до 1–2 ч), а также потому, что существующая сеть метеорологических станций регистрирует всего 5–10 % шквалов [6].

По этой же причине трудно проверить работу программы, когда явление отсутствует, и оценить «ложные» случаи, которые могут проявляться при работе программного средства. Для примера рассмотрим случай № 1 в табл. 1. Это широко известный случай штормового ветра

Таблица 1

Случаи шквалов в Европе										
Номер	Зафиксированный случай шквала	Индекс ближайшей метеостанции	Барическая тенденция, гПа/3 ч	Изменение давления за 12 ч	Порывы ветра м/с	Осадки мм/12 ч	Исходные данные ГРИБ	Заболевательность, ч	Определение зоны опасного явления	
1	21 июня 1998 г., 0 ч Москва (Россия)	27612	-2,8	-4,1	15	26	УКМО	Анализ 12 24 36	+	
2	26 декабря 1999 г. 6 ч, Париж (Франция)	7149	-19,0	-29,5	47	13	УКМО	18 30	+	
3	26 декабря 1999 г. 12 ч, юг Германии, Австрия	10836 11146	-9,0 -5,2	-29,5 21,8	45 42	11 17	УКМО	Анализ 12 24	+	
4	27 декабря 1999 г., 18 ч, юг Франции, север Испании	7434 8021	-9,0 -2,5	-27,1 -10,5	34 47	4 18	УКМО	18 30	+	
5	28 декабря 1999 г., 0 ч, юг Франции	7460	-4,0	-28,5	43	15	УКМО	Анализ 12 24	+	
6	28 мая 2000 г., 12 ч, Франция, Бельгия	7005 6431 6310	-7,8 -6,5 -7,4	-16,0 -15,5 16,6	28 30 33	6 13 14	УКМО	Анализ 12 24	+	
7	10 июня 2000 г., 0 ч, Каталония (Испания)	8160	-2,1	-3,2	17	20	УКМО	Анализ 12 24	+	
8	12 июня 2000 г., 18 ч, Новгородская обл.	26179	-3,9	-9,9	28	26	УКМО	18 30	+	

9	19 июня 2000 г., 12 ч, Самара, Тольятти	28807 27890	-1,6 -1,0	-2,6 -3,9	16 21	1	UKMO	Анализ 12 24	+
10	19 июня 2000 г., 18 ч, Татарстан	27693	-1,9	-3,3	22	6	UKMO	18 30	+
11	6 июля 2000 г., 0 ч, Николаевская обл. (Украина)	33862	-1,5	-3,1	21	5	UKMO	Анализ 12 24	+
12	15 июля 2000 г., 18 ч, Ленинградская обл.	22925	-0,8	-3,0	21	14	UKMO	18 30	-
13	26 июля 2000 г., 6 ч, Башкирия	28711	-0,8	-12,3	17	12	UKMO	18 30	+
14	2 августа 2000 г., 18 ч, Саратовская обл.	34085 34186	-1,3 -1,8	-4,3 -6,3	21 21	15 21	UKMO	18 30	+
15	22 августа 2000 г., 18 ч, Белоруссия	26763 26878	-3,7 -4,5	-7,4 -10,4	22 22	19 31	UKMO	18 30	+
16	8 сентября 2000 г., 18 ч, Ульяновская обл.	27786	-0,8	+0,5	16	17	UKMO	18 30	+
17	30 октября 2000 г., 6 ч, Южная Англия	3746	-11,1	-19,5	32	10	NCEP	18	-
18	30 октября 2000 г., 12 ч, Франция, Бельгия	7015 6310	-4,3 -4,8	-17,7 -14,1	29 34	16 17	UKMO	Анализ 12 24	+
19	19 января 2001 г., 18 ч, Мурманск и Кольский залив	22133	-1,6	-8,9	25	5	UKMO	18 30	+
							NCEP	6 18 30	+

Продолжение табл. 1

Номер	Зарегистрированный случай шквала	Индекс ближайшей метеостанции	Барическая тенденция, гПа/3 ч	Изменение давления за 12 ч	Порывы ветра м/с	Осадки мм/12 ч	Исходные данные ГРИБ	Заблаговременность, ч	Определение зоны опасного явления
20	24 февраля 2001 г., 0 ч, Кубань, Армавирский район	37018	-2,5	-6,5	27	13	УКМО	Анализ 12 24	-
21	21 мая 2001 г., 12 ч, Самарская обл.	28807	-3,0	-6,1	20	18	УКМО	Анализ 12 24	+
22	22 мая 2001 г., 12 ч, Пермь	28224	-1,2	-5,0	16	7	УКМО	Анализ 24 36	+
23	6 июля 2001 г., 0 ч, Тольятти	36035	-0,4	-	12	3	УКМО	Анализ 12 24	+
24	7 июля 2001 г., 0 ч, Страсбург (Франция)	7190	-4,7	-10,3	26	20	УКМО	Анализ 12 24	+
25	16 июля 2001 г., 18 ч, Ленинградская обл., Польша	22892 12360	-0,7 -1,2	-3,4 -3,5	23 24	18 21	УКМО	18	+
26	19 июля 2001 г., 6 ч, Эстония	26045	-1,9	-3,8	21	23	УКМО	30 18 30 18 30	+
							НСЕР	18 30	-
								30	+

27	24 июля 2001 г., 12 ч, Москва (Россия)	27612	-1,4	-0,8	28	35	УКМО	Анализ 12 24	-
							НСЕР	Анализ 12 24	+
									+
28	4 августа 2001 г., 0 ч, Чехия	11636	-1,0	-3,2	21	23	УКМО	Анализ 12 24	-
							НСЕР	Анализ 12 24	-
									+
29	16 августа 2001 г. 0 ч, Франция	7265	-1,0	-3,4	28	19	УКМО	Анализ 12 24	+
							НСЕР	Анализ 12 24	+
									+
30	20 августа 2001 г., 12 ч, Саратов	34172	-0,9	-1,6	10	-	УКМО	Анализ 12 24	-
							НСЕР	Анализ 12 24	-
									-
31	28 августа 2001 г., 0 ч, Калининград	26701	-0,7	-4,3	20	16	УКМО	Анализ 12 24	+
							НСЕР	Анализ 12 24	+
									+
									+

Окончание табл. 1

Номер	Зафиксированный случай шквала	Индекс ближайшей метеостанции	Барическая тенденция, гПа/3 ч	Изменение давления за 12 ч	Порывы ветра м/с	Осадки мм/12 ч	Исходные данные ГРИБ	Заблаговременность, ч	Определение зоны опасного явления
32	26 сентября 2001 г., 6 ч, Адлер	37171	-0,6	-3,2	21	9	УКМО	18 30	+
							НСЕР	6 18 30	+
33	2 ноября 2001 г., 12 ч, юг Финляндии, Эстония	2988 26115	-1,0 -0,5	-10,8	21 24	5 7	УКМО	Анализ 12 24 36	+
							НСЕР	Анализ 12 24 36	-
34	25 декабря 2001 г. 0 ч, Ульяновская обл.	27782	-1,1	-13,0	20	11	НСЕР	Анализ 12 24	+
35	28 января 2002 г. 12 ч, Шотландия	3171	-2,2	-10,8	31	30	НСЕР	Анализ 12 24	+
36	29 января 2002 г. 0 ч, юг Швеции, Север Дании	2512 10020	-3,2 -3,4	-6,0 -4,0	22 36	10 6	НСЕР	Анализ 12 24	+
37	29 января 2002 г., 06 ч, Калининград	26701	-3,7	-3,3	28	5	НСЕР	6 18 30	+
									-

38	29 мая 2002 г., 18 ч, Кемеровская обл.	29645	-1,8	-10,1	25	18	NCEP	6	+
							УКМО	18 30	+
39	4 июля 2002 г., 18 ч, Калининградская обл.	26702	0,5	-7,9	-	19	NCEP	18 30	+
40	11 июля 2002 г., 0 ч, Германия, Берлин	10382	-2,2	-5,6	33	27	NCEP	12 24	+

в Москве, в ночь с 20 на 21 июня 1998 г., когда от разгула стихии погибли 11 человек, было повалено более 45 тыс. деревьев. Результаты расчетов устойчиво указывали на то, что в этом месте возможно развитие шквалов. Однако по данным метеонаблюдений на станции в Москве (индекс 27612) давление за предшествующие 24 ч практически не изменилось, барическая тенденция в 0 ч составила $-2,8$ гПа/3 ч, максимальная скорость ветра при порывах не превысила 15 м/с. По всем признакам, это был бы «ложный» случай, если бы не информация очевидцев. То же самое относится и к случаям 13, 16, 22, 23, 30 и 39.

На рис. 4 приведены синоптические условия, наблюдавшиеся при развитии шквалов в Москве 21 июня 1998 г. Приведена карта с полем давления, **приземной наноской** по данным наблюдений за 21 июня 1998 г. в 0 ч ВСВ. На ней же пунктиром изображены фронтальные зоны, рассчитанные по изложенной методике по данным ГРИБ УКМО (Exeter) за 20 июня 1998 г. 0 ч ВСВ с заблаговременностью 24 ч. На рис. 5 приведено поле потенциального вихря, приведенное к уровню 500 гПа (заштрихованная область соответствует значениям $PV \geq 0,6PVU$). Над Москвой видна аномалия потенциального вихря, которая перекрывает находящуюся под ней бароклинную зону. На рис. 6 жирным пунктиром показана итоговая расчетная зона шквалов. Исходные данные — ГРИБ УКМО (Exeter) за 0 ч 20 июня 1998 г., прогноз на 24 ч. Расчетная скорость ветра составила 29 м/с.

Из 40 случаев опасных явлений, приведенных в табл. 1, только в 2 случаях не удалось идентифицировать зону возможного возникновения штормовых ветров.

Сопоставление результатов, полученных по исходным данным разных моделей и заблаговременностей, показывает, что качество исходных данных существенно влияет на конечный результат. В работах [8, 9, 12] предложено использовать результаты расчета потенциального вихря, сопоставляя их со снимками с ИСЗ для выявления ошибок в прогностических моделях. Различия в полях метеоэлементов, полученных по разным моделям, иногда приводили к различиям в определении зоны опасного явления. Особенно это проявилось при расчете зоны шквальных ветров для случая № 27, отмеченного в Москве в июле 2001 г. (см. табл. 1). Для него расчет по данным, полученным по модели NCEP, показал худшие результаты по сравнению с расчетом по данным из УКМО. Для случаев штормовых ветров на Балтике, имевших место в июле (№ 26) и в ноябре 2001 г. (№ 33), лучшие результаты рассчитаны по исходным данным, полученным по модели NCEP. Максимальная заблаговременность, при которой удавалось идентифицировать место опасного явления, обычно не превышала 30 ч. Хотя иногда устойчивый результат

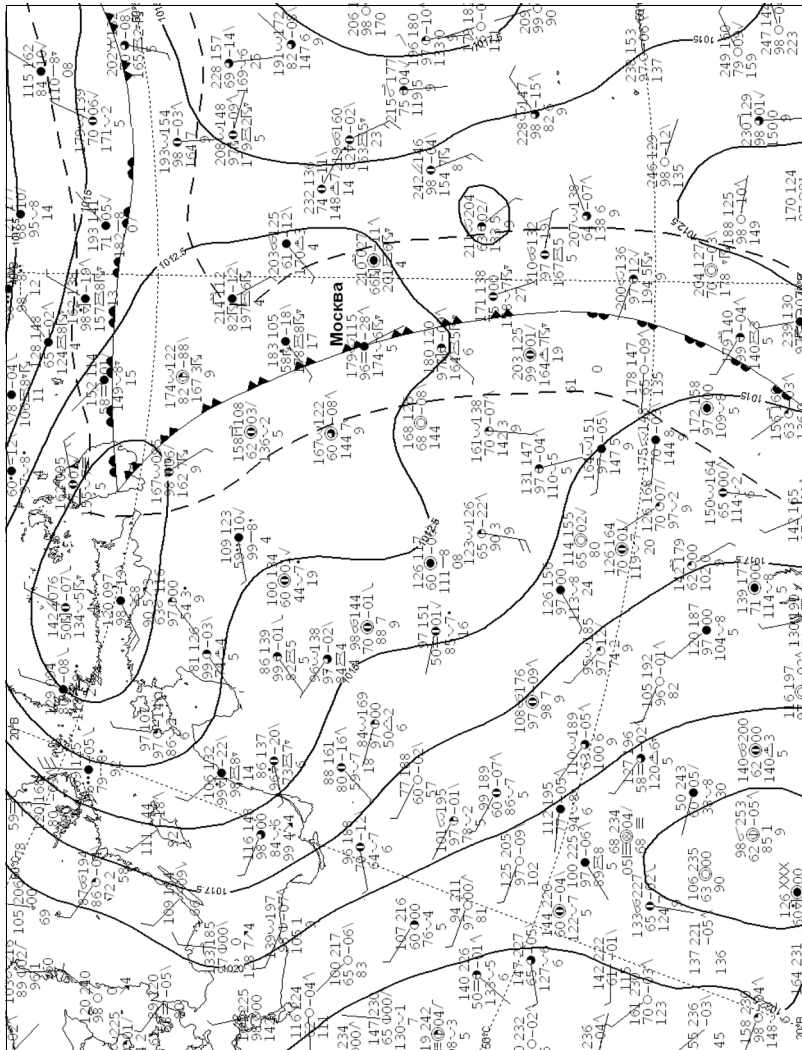


Рис. 4. Поле давления на уровне моря и приземная наноска 26 декабря 1999 г, 6 ч ВСВ.

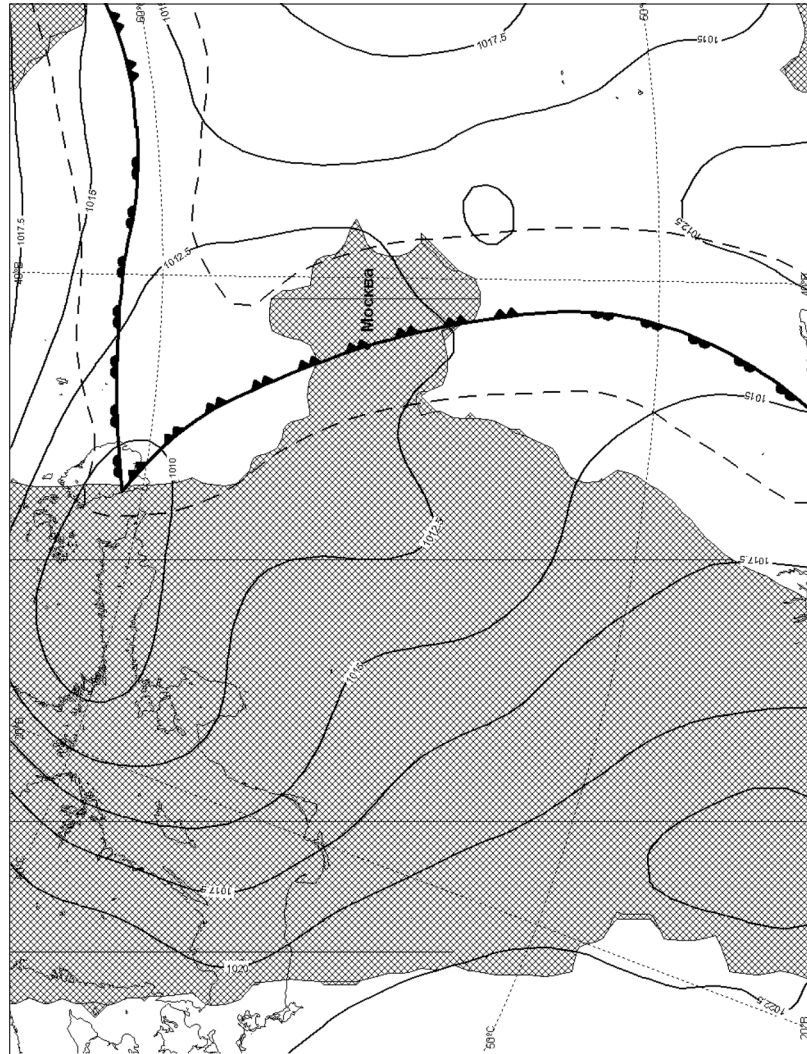


Рис. 5. Поле потенциального вихря на уровне 500 гПа 21 июня 1998 г., 0 ч ВСВ.

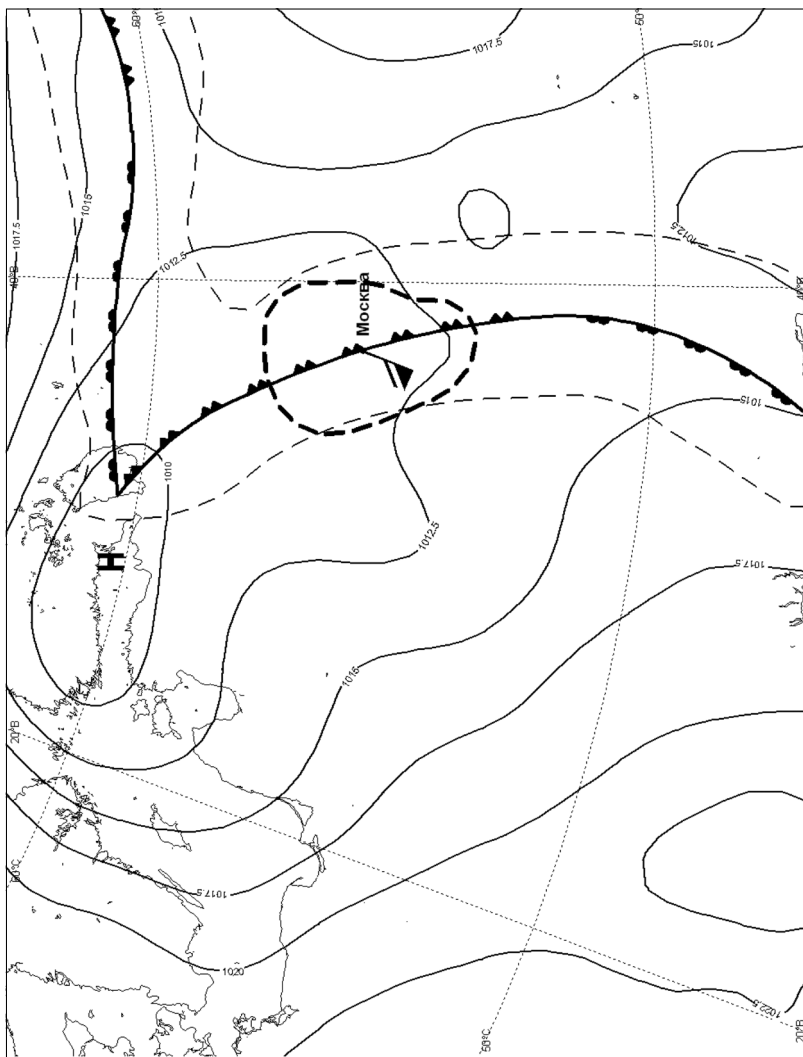


Рис. 6. Рассчитанная зона шквалов (пунктир) на 21 июня 1998 г., 0 ч ВСВ.

достигался и в прогнозе до 36 ч. Были случаи, когда не удалось определить место опасного явления, как в случае шквалов 24 февраля 2001 г. на Кубани (№ 20) и 20 августа 2001 г. в г. Саратове (№ 30). В случае № 20 можно было бы предположить, что присутствовали ошибки в прогностических данных моделей. Но для случая № 30 фронтальные зоны определены правильно, а в их вычислениях присутствует комплекс термогигрометрических характеристик в слое от 850 до 500 гПа. Неудачу можно объяснить, например, тем, что шаг по времени исходных данных составлял 6 ч, а исследуемые явления, как уже отмечено, в большинстве случаев имеют локальный и скоротечный характер. В данном случае шквал в Саратове начался в 12 ч 30 мин и продолжался полчаса.

Для проверки работы программного средства на срабатывание в ложных случаях был поставлен следующий эксперимент. В течение мая—июня 2002 г., ежедневно строились карты европейской территории (где наиболее густа сеть метеостанций), на которые наносились рассчитанные зоны возможных шквалистых ветров. Заблаговременность составляла 12 ч. На эти же карты наносились фактические данные о максимальных порывах ветра, произошедших между синоптическими сроками 21—0 и 9—12 ч. Ложным считался случай, если фактическая максимальная скорость ветра при порывах в указанных зонах была менее 15 м/с. В противном случае полагалось, что программа правильно определила зону шквалов (т. е. на ближайших станциях была зафиксирована скорость ветра при порывах 15 м/с или более). За указанный срок рассчитано 368 зон возможного возникновения шквалистых ветров. Из них в 49 случаях на ближайших метеостанциях фактическая скорость порывов ветра оказалась менее 15 м/с. Еще в 59 случаях не удалось определить фактическую скорость ветра (т. е. рассчитанные зоны попадали в районы, где отсутствуют метеорологические станции или на территории стран, не передающих значения скорости ветра при порывах в международный обмен). Таким образом, вероятность ложных случаев составила менее 30 % при условии учета всех случаев, а если не принимать во внимание 59 неподтвержденных случаев, то менее 16 %.

Проведено также сравнение изложенного метода с известными методами прогноза шквалов. Наиболее близкими аналогами приняты методы прогноза шквалов:

- два метода Решетова [5, 6],
- метод Фобуша—Миллера [5].

Для первого метода Решетова [6] предикторами являются разность между максимальной температурой воздуха ($T_{\text{макс}}$) у поверхности земли и нулевой температурой смоченного термометра, приведенной адиабатически к давлению у поверхности земли, а также разность между

$T_{\text{макс}}$ и температурой на уровне 500 гПа. Для второго метода Решетова [5] предикторами являются сумма отклонений кривой стратификации от кривой состояния на поверхностях 850—500 гПа и разность между $T_{\text{макс}}$ и температурой на уровне 500 гПа.

Метод Фобуша—Миллера служит для прогноза внутримассовых шквалов. Основной предиктор для этого метода — разность между максимальной температурой воздуха и нулевой температурой смоченного термометра. Следует заметить, что эти методы применимы только для теплого времени года (с мая по сентябрь) и только в том случае, когда синоптическое положение благоприятно для возникновения шквалов. Из табл. 1 выбраны 27 случаев опасных явлений, происшедших в теплый период года и для них произведены расчеты по исходным данным ГРИБ УКМО (Exeter). Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Случаи опасных явлений, происшедшие в теплый период года

Номер (номер из табл. 1)	Зафиксированный случай шквала	Заблаго- времен- ность	Метод Решетова		Метод Фобуша— Миллера	Предлага- емый алгоритм
			1-й	2-й		
1 (1)	21 июня 1998 г., 0 ч, Москва	Анализ	—	—	—	+
		12	—	—	—	+
		24	—	—	—	+
		36	—	—	—	—
2 (6)	28 мая 2000 г., 12 ч, Франция, Бельгия	Анализ	—	—	—	+
		12	—	—	—	+
		24	—	—	—	+
3 (7)	10 июня 2000 г., 0 ч, Каталония	Анализ	+	+	+	+
		12	—	—	—	—
		24	+	—	—	+
4 (8)	12 июня 2000 г., 18 ч, Новгородская обл.	18	—	+	—	+
		30	—	+	—	+
5 (9)	19 июня 2000 г., 12 ч, Самара, Тольятти	Анализ	—	—	+	+
		12	—	—	+	+
		24	—	—	—	+
6 (10)	19 июня 2000 г., 18 ч, Татарстан	18	+	+	+	+
		30	+	+	+	+
7 (11)	6 июля 2000 г., 0 ч, Николаевская обл. (Украина)	Анализ	—	—	+	+
		12	—	—	+	+
		24	—	+	+	—
8 (12)	15 июля 2000 г., 18 ч, Ленинградская обл.	18	—	+	+	+
		30	—	—	—	+

Продолжение табл. 2

Номер (номер из табл. 1)	Зафиксированный случай шквала	Заблаго- времен- ность	Метод Решетова		Метод Фобуша— Миллера	Предлага- емый алгоритм
			1-й	2-й		
9 (13)	26 июля 2000 г., 6 ч, Башкирия	18	+	+	+	+
		30	+	+	+	+
10 (14)	2 августа 2000 г., 18 ч, Саратовская обл.	18	–	+	+	+
		30	–	+	+	+
11 (15)	22 августа 2000 г., 18 ч, Белоруссия	18	–	+	–	+
		30	–	–	–	+
12 (16)	8 сентября 2000 г., 18 ч, Ульяновская обл.	18	–	+	+	+
		30	–	–	+	–
		6	–	–	–	+
		18	–	–	–	+
13 (21)	21 мая 2001 г., 12 ч, Самарская обл.	Анализ	+	+	+	+
		12	+	+	+	+
		24	–	–	–	+
14 (22)	22 мая 2001 г., 12 ч, Пермь	Анализ	+	+	+	–
		24	–	+	–	+
		36	–	–	–	+
15 (23)	6 июля 2001 г., 0 ч, Тольятти	Анализ	+	+	–	+
		12	–	+	–	+
		24	–	–	–	–
16 (24)	7 июля 2001 г., 0 ч, Страсбург (Франция)	Анализ	–	–	–	+
		12	–	–	–	+
		24	–	–	–	+
17 (25)	16 июля 2001 г., 18 ч, Ленинградская обл., Польша	18	–	+	–	+
		30	–	–	–	+
18 (26)	19 июля 2001 г., 6 ч, Эстония	18	–	+	–	+
		30	–	–	–	–
19 (27)	24 июля 2001 г., 12 ч, Москва	Анализ	–	–	–	–
		12	+	–	+	+
		24	+	–	+	+
20 (28)	4 августа 2001 г., 0 ч, Чехия	Анализ	–	–	–	+
		12	–	–	–	+
		24	–	–	–	+
21 (29)	16 августа 2001 г. 0 ч, Франция	Анализ	–	+	–	+
		12	–	+	–	+
		24	–	–	–	+

Окончание табл. 2

Номер (номер из табл. 1)	Зафиксированный случай шквала	Заблаго- времен- ность	Метод Решетова		Метод Фобуша— Миллера	Предлага- емый алгоритм
			1-й	2-й		
22 (30)	20 августа 2001 г., 12 ч, Саратов	Анализ	+	—	—	—
		12	+	—	—	—
		24	—	—	—	—
23 (31)	28 августа 2001 г., 0 ч, Калининград	Анализ	+	+	+	+
		12	+	+	+	+
		24	+	+	+	+
24 (32)	26 сентября 2001 г., 6 ч, Адлер	18	—	+	+	+
		30	—	+	+	+
25 (38)	29 мая 2002 г., 18 ч, Кемеровская обл.	18	—	—	—	+
		30	—	—	—	+
26 (39)	4 июля 2002 г., 18 ч, Калининградская обл.	18	—	—	—	+
		30	—	—	—	+
27 (40)	11 июля 2002 г., 0 ч, Берлин (Германия)	12	—	—	—	+
		24	—	—	—	+

Анализ результатов показал, что примерно в 25 % случаев рекомендованные методы прогноза шквалов не смогли выявить зоны возможных опасных явлений. Исключениями являются три случая:

- 1) № 7, когда метод Фобуша—Миллера показал лучшие результаты;
- 2) № 14, когда лучше был 2-й метод Решетова;
- 3) № 22, когда лучшие результаты показал 1-й метод Решетова.

Следует также отметить, что в холодное время года метод, изложенный в данной статье, не теряет свою работоспособность в отличие от известных методов прогноза шквалов.

Заключение

Осуществлен эксперимент по определению зоны возможного возникновения шквалов с использованием расчета взаимодействия потенциального вихря Эртеля с бароклиническими зонами в нижней тропосфере. Проведено сравнение предлагаемого метода с известными методами прогноза шквалов, которое позволяет сделать предположение о возможности его использования для прогноза неблагоприятных явлений погоды. Построенный алгоритм и технология расчетов допускают ряд дальнейших обобщений и усовершенствований. К их числу отно-

сится использование данных более высокого пространственного и временного разрешения, модификация расчета фронтальных зон (например, использование в качестве фронтального параметра потенциальной температуры смоченного термометра) и др.

Работа выполнена в НПЦ «Мэп Мейкер» и предназначена для работы на обычных персональных компьютерах в среде WINDOWS в составе технологии ГИС Метео.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулиничева А. А., Беркович Л. В., Соломахов А. Ю., Шмелькин Ю. Л. и др. Геоинформационная система «Метео» и состояние ее использования в метеослужбах России и стран ближнего зарубежья // *Метеорология и гидрология*. — 2001. — № 11. — С. 90—98.
2. Богаткин О. Г., Еникеева В. Д. Анализ и прогноз погоды для авиации. — СПб: Гидрометеоздат, 1992. — С. 72.
3. Борисова В. В., Шакина Н. П. Использование потенциального вихря для расчета высоты и температуры пропоязузы // *Тр. ГМЦ СССР*. — 1989. — Вып. 305. — С. 98—117.
4. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. — М.: Физматгиз, 1963 г. — С. 174.
5. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. — Л.: Гидрометеоздат, 1986, с. 527—536.
6. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. — Л.: Гидрометеоздат, 1985, с. 152—161.
7. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н., Иванова А. Р. Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // *Метеорология и гидрология*. — 2000. — № 7. — С. 5—16.
8. Browning K. A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development // *Meteorol. Appl.* — 1997. — N 4. — P. 317—324.
9. Georgiev C. G. Quantitative relationship between Meteosat WV data and positive potential vorticity anomalies: a case study over the Mediterranean // *Meteorol. Appl.* — 1999. — N 6. — P. 97—109.
10. Hoskins B. J., McIntyre M. E., Robertson A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* — 1985. — N 111. — P. 877—946.
11. Huber-Pock F., Kress Ch. An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products // *Meteorol. Atmos. Phys.* — 1989. — Vol. 40. — N 2. — P. 170—180.
12. Mansfield D. A. The use of potential vorticity as an operational tool // *Meteorol. Appl.* — 1996. — N 3. — P. 195—210.
13. Parfiniewicz J. W. Rapid cyclogenesis over Poland on 28 March 1997 // *Meteorol. Appl.* — 1999. — N 6. — P. 363—370.
14. Prezerakos N. G., Flokas H. A. The formation of a dynamically unstable ridge at 500 hPa as a precursor of surface cyclogenesis in the central Mediterranean // *Meteorol. Appl.* — 1996. — N 3. — P. 101—111.
15. Sturtevant J. S. *The Severe Local Storm Forecasting Primer*, 1995, — P. 197. **???Уточните, 1995 — этот год относится к названию или это год выхода работы в свет? Укажите издательство или издающую организацию, и город, в котором работа издана.**