

Ю. И. Юсупов**К ВОПРОСУ ОБ ОПЕРАТИВНОМ ПРОГНОЗЕ ШКВАЛОВ**

Излагается способ оперативного прогноза зон, благоприятных для развития шквалов, основанный на расчете взаимодействия стратосферного потенциального вихря Эртеля с бароклинными зонами в нижней тропосфере. Дано описание программного средства, реализованного в технологии ГИС Метео. Представлен анализ результатов работы программного средства на примере конкретных случаев.

1. 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 условиями для возникновения большинства шквалов являются следующие [2]:

1. Холодный фронт вблизи вершины волнового возмущения при смещении волны со скоростью 30 – 40 км /ч и более;
2. Холодный фронт и фронт окклюзии со скоростью смещения 30 – 40 км /ч и более;
3. Небольшая барическая ложбина в теплом секторе циклона на приземных картах погоды;
4. Передняя часть высотной барической ложбины (на картах АТ₅₀₀, АТ₄₀₀, АТ₃₀₀ и АТ₂₀₀), передняя часть термической ложбины или очага холода в тропосфере (на картах ОТ500/1000 и ОТ300/1000).

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 – к расчету термодинамических параметров. Собственно, первый этап и представляет основную сложность для создания надежного алгоритма по оперативному прогнозу шквалов. В данной статье предлагается, для определения синоптического положения воспользоваться расчетами взаимодействия потенциального вихря с бароклинными зонами в тропосфере.

Б. Хоскинс, в работе [9] объясняет развитие неблагоприятных явлений погоды взаимодействием стратосферы с тропосферой. Для определения активности в стратосфере используется расчет потенциального вихря Эртеля.

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

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

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 ζ_{θ} по осям X , Y , 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

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

где u_{θ} , v_{θ} – составляющие скорости вдоль осей X , 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 нахождения 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 и существование в нижних слоях атмосферы бароклинной зоны, непосредственно под аномалией потенциального вихря. При адиабатическом движении, потенциальный вихрь сохраняет свое значение [4], таким образом, 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 бароклинной зоне, в свою очередь, приводит к образованию положительной температурной аномалии, т. е. к образованию потенциального вихря на нижних уровнях. Взаимодействие пары вихрей низкого и высотного уровней приводит к

взаимному усилению каждого из вихрей. Циркуляция, возникшая на нижнем уровне и сопровождающая ее конвергенция, приводит к образованию восходящих движений. 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 бароклинные зоны в тропосфере описана в многочисленных работах, например, в [8, 11 - 13]. Кроме того, холодный стратосферный воздух, вторгающийся в тропосферу и располагающийся над теплым насыщенным воздухом во фронтальной зоне, приводит к развитию конвекции [7].

2. Оперативный прогноз шквалов в технологии ГИС Метео

Исходя из вышеизложенного, прогноз места возникновения неблагоприятных явлений погоды, в том числе и зоны возможного возникновения шквалов, сводится к нахождению бароклинные зоны в тропосфере, расчету потенциального вихря и определению степени неустойчивости атмосферы.

В 1996 г. в технологии ГИС Метео [1] было создано программное средство для оперативного расчета фронтальных зон в нижней тропосфере по методике Венского института метеорологии и геодинамики [10].

Фронтальный оператор, по этой методике определяется так:

$$\Psi = \nabla / \nabla ZTE / \bullet n_{ZTE}, \quad (2)$$

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 использовалась эквивалентная “толщина”, определяемая следующим образом:

$$ZTE = \sum_{850}^{500} (R/g) T_e \ln(P_u / P_d) - \text{эквивалентная “толщина” слоя от 850 до 500}$$

гПа,

$T_e = (T_{e,u} - T_{e,d}) / \ln(T_{e,u} / T_{e,d})$ – средняя эквивалентная температура в слое.

$$T_e = T \exp(L q_m / C_p T),$$

где L – скрытая теплота конденсации,

q_m - отношение смеси,

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

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

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

где ZT – толщина слоя 850 – 500 гПа, $ZTES$ – значение эквивалентной толщины в состоянии насыщения.

Значения $NIX > 0.7$ и $\Psi > 2.5$ считаются необходимым условием для существования активных фронтальных зон [10].

В настоящее время в технологии ГИС Метео возможен оперативный расчет фронтальных зон с определением холодных и теплых участков фронта (по значению адвективного изменения фронтального параметра).

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

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.

Расчет потенциального вихря производился по формуле (1). Было проведено множество экспериментов с целью наилучшего способа определения аномалий потенциального вихря. Для этого было создано программное средство, позволяющее оперативно создавать 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.

Нахождение аномалий потенциального вихря имеет свои сложности в виду изменения высоты изэнтропической поверхности в зависимости от времени года. Поэтому, опираясь на исследования, проведенные К. Георгиевым [8], было принято решение использовать значение изэнтропического потенциального вихря, приведенное к уровню 500 гПа. В соответствие с [8], считается, что значение потенциального вихря на уровне 500 гПа, превышающее 0.6 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ К кг}^{-1}$), 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 возможно

образование положительной температурной аномалии в тропосфере, возникающей вследствие циклонической циркуляции в бароклинной зоне.

Как уже отмечалось выше, необходимым условием для активизации неблагоприятных явлений является также неустойчивость в нижних слоях атмосферы. В данном случае неустойчивость атмосферы определялась с помощью вычисления индекса неустойчивости (Total Totals [15]):

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

где T_{850} и T_{d850} – температура и температура точки росы на уровне 850 гПа, а T_{500} – температура 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:

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

причем:

при $\Psi < 2.5$, $\Psi = 0$;

при $PV < 0.6$, $PV = 0$;

при $TT < 44$ и $A_g > 0$, $Fe = 0$.

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, воспользовавшись способом Пескова – Снитковского:

$$U_{\max} = -4 \cdot 10^{-6} \cdot S^4 + 8.8 \cdot 10^{-4} \cdot S^3 - 0.0618 \cdot S^2 + 1.969 \cdot S, \quad (7)$$

где S – сумма скоростей ветра от Земли до 500 гПа.

На Рис.1 представлена карта давления на уровне моря за 26 декабря 1999 г. В 06 ч. МСВ. На этом же рисунке приведены бароклинные зоны в тропосфере (пунктир) и фронтальные линии, рассчитанные по данным ГРИБ Брекнелл за 25 декабря 1999 г. 12 ч. МСВ, с заблаговременностью 18 ч. На Рис.2 представлено поле потенциального вихря на уровне 500 гПа (заштрихованная область представляет значения $PV \geq 0.6$ PVU). 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. МСВ.

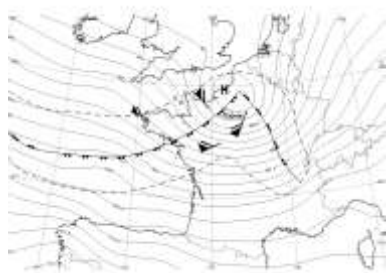


Рис.1

26 декабря 1999 г. Давление на уровне моря и фронтальные зоны, рассчитанные по данным ГРИБ Брекнелл за 25 декабря 1999 г. 12 ч., заблаговременность 18 ч.

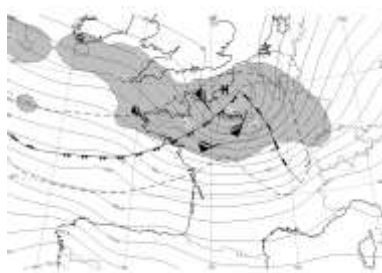


Рис.2

Поле потенциального вихря на уровне 500 гПа. Заштрихованная область соответствует значениям $PV \geq 0.6$ PVU.

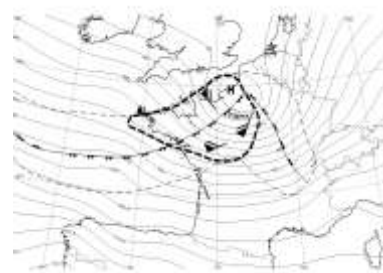


Рис.3

Итоговая зона шквалов, рассчитанная по данным ГРИБ Брекнелл за 25 декабря 1999 г. 12 ч., заблаговременность 18 ч.

3. Исходные данные и результаты расчетов

В качестве исходных данных использовались данные в коде ГРИБ, распространяемые по глобальной сети телесвязи ВМО. Разрешение этих данных по горизонтали составляет градус с четвертью, т. е. примерно 140×140 км. Для расчета потенциального вихря необходимо наличие данных о температуре, скорости и направлении ветра на стандартных уровнях атмосферы от 850 до 300 гПа, кроме того, для нахождения фронтальных зон – данные о влажности и геопотенциале в слое от 850 до 500 гПа. Шаг по времени прогнозов в коде ГРИБ составляет 6 час до заблаговременности 48 ч, и далее - 12 ч до заблаговременности 72 ч.

Исследования проводились с использованием архивных данных НПЦ Мэп Мейкер, причем, когда это было возможно, в качестве исходных данных привлекались данные разных моделей (Брекнелл и Вашингтон) и разной заблаговременности (до 48 ч.).

Были исследованы 40 случаев шквалов в Европе с июня 1998г. до июля 2002 г. Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

№	Зафиксированный случай шквала	Индекс ближ. метеостанции	Барическая тенденция (гПа/3 ч)	Изменение давления за 12 ч.	Порывы ветра (м/с)	Осадки (мм/12 ч)	Исходные данные ГРИБ	Заблаговр. (ч.)	Определенные зоны опасного явления
1	21 июня 1998 г. 0 ч. Россия, Москва	27612	-2.8	-4.1	15	26	Брекнелл	Анализ 12 24 36	+ + -
2	26 декабря 1999 г. 6 ч., Париж	7149	-19	-29.5	47	13	Брекнелл	18, 30	+ +
3	26 декабря 1999 г. 12 ч., Юг Германии, Австрия	10836 11146	-9 -5.2	-29.5 21.8	45 42	11 17	Брекнелл	Анализ 12 24	+ + +
4	27 декабря 1999 г. 18 ч., Юг Франции, Север Испании	7434 8021	-9 -2.5	-27.1 -10.5	34 47	4 18	Брекнелл	18, 30	+ +
5	28 декабря 1999 г., 0 ч., Юг Франции	7460	-4	-28.5	43	15	Брекнелл	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	Брекнелл	Анализ , 12, 24	+ + +
7	10 июня 2000 г., 0 ч., Каталония	8160	-2.1	-3.2	17	20	Брекнелл	Анализ , 12, 24	+ - +
8	12 июня 2000 г., 18 ч., Россия, Новгородская область	26179	-3.9	-9.9	28	26	Брекнелл	18 30	+ +
9	19 июня 2000 г., 12 ч., Россия, г. Самара, Тольятти	28807 27890	-1.6 -1.0	-2.6 -3.9	16 21	1 3	Брекнелл	Анализ 12 24	+ + +
10	19 июня 2000 г., 18 ч., Россия, Татарстан.	27693	-1.9	-3.3	22	6	Брекнелл	18 30	+ +
11	6 июля 2000 г., 0 ч., Украина, Николаевская обл.	33862	-1.5	-3.1	21	5	Брекнелл	Анализ 12, 24	+ + -
12	15 июля 2000 г., 18 ч., Россия, Ленингр. обл.	22925	-0.8	-3.0	21	14	Брекнелл	18 30	+ +
13	26 июля 2000 г., 6 ч., Россия, Башкирия	28711	-0.8	-12.3	17	12	Брекнелл	18 30	+ +
14	2 августа 2000 г., 18 ч., Россия, Саратовск. обл.	34085 34186	-1.3 -1.8	-4.3 -6.3	21 21	15 21	Брекнелл	18, 30	+ +
15	22 августа 2000 г., 18 ч., Белоруссия	26763 26878	-3.7 -4.5	-7.4 -10.4	22 22	19 31	Брекнелл	18 30	+ +
16	8 сентября 2000 г., 18 ч., Россия, Ульяновская обл.	27786	-0.8	+0.5	16	17	Брекнелл Вашингто н	18 30 6 18	+ - + +
17	30 октября 2000 г., 6 ч., Южная Англия	3746	-11.1	-19.5	32	10	Брекнелл	18 30	+ +
18	30 октября 2000 г., 12 ч., Франция, Бельгия	7015 6310	-4.3 -4.8	-17.7 -14.1	29 34	16 17	Брекнелл	Анализ 12 24	+ + +
19	19 января 2001 г., 18 ч., Россия, Мурманск и Кольский залив	22133	-1.6	-8.9	25	5	Брекнелл Вашингто н	18 30 6 18 30	+ + + + +
20	24 февраля 2001 г., 0 ч., Россия, Кубань, Армавирский район	37018	-2.5	-6.5	27	13	Брекнелл Вашингто н	Анализ 12 24 Анализ , 12, 24	- - - - -
21	21 мая 2001 г., 12 ч., Россия, Самарская обл.	28807	-3.0	-6.1	20	18	Брекнелл	Анализ 12 24	+ + +
22	22 мая 2001 г., 12 ч., Россия, Пермь	28224	-1.2	-5.0	16	7	Брекнелл	Анализ 24 36	- + +
23	6 июля 2001 г., 0 ч., Россия, г.Тольятти	36035	-0.4	-	12	3	Брекнелл	Анализ 12 24	+ + -
24	7 июля 2001 г., 0 ч., Франция, Страсбург	7190	-4.7	-10.3	26	20	Брекнелл	Анализ 12 24	+ + +
25	16 июля 2001 г., 18 ч., Россия, Ленингр. обл., Польша	22892 12360	-0.7 -1.2	-3.4 -3.5	23 24	18 21	Брекнелл	18 30	+ +
26	19 июля 2001 г., 6 ч., Эстония	26045	-1.9	-3.8	21	23	Брекнелл Вашингто н	18 30 18 30	+ - + +

27	24 июля 2001 г., 12 ч., Россия, Москва	27612	-1.4	-0.8	28	35	Брекнелл Вашингтон	Анализ 12 24 Анализ 12 24	- + + - -
28	4 августа 2001 г., 0 ч., Чехия	11636	-1.0	-3.2	21	23	Брекнелл Вашингтон	Анализ 12 24 Анализ 12 24	+ + + + +
29	16 августа 2001 г., 0 ч., Франция	7265	-1.0	-3.4	28	19	Брекнелл Вашингтон	Анализ 12 24 Анализ 12 24	+ + + + +
30	20 августа 2001 г., 12 ч., Россия, г.Саратов	34172	-0.9	-1.6	10	-	Брекнелл Вашингтон	Анализ 12 24 Анализ 12 24	- - - - -
31	28 августа 2001 г., 0 ч., Россия, Калининград	26701	-0.7	-4.3	20	16	Брекнелл Вашингтон	Анализ 12 24 Анализ 12 24	+ + + + +
32	26 сентября 2001 г., 6 ч., Россия, Адлер	37171	-0.6	-3.2	21	9	Брекнелл Вашингтон	18 30 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	Брекнелл Вашингтон	Анализ 12 24 36 Анализ 12 24 36	+ + - - + + + +
34	25 декабря 2001 г., 0 ч., Ульяновская обл., Россия	27782	-1.1	-13.0	20	11	Вашингтон	Анализ 12 24	+ + +
35	28 января 2002 г., 12 ч., Шотландия	3171	-2.2	-10.8	31	30	Вашингтон	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	Вашингтон	Анализ 12 24	+ + +
37	29 января 2002 г., 06 ч., Россия, г. Калининград	26701	-3.7	-3.3	28	5	Вашингтон	6 18 30	+ + -
38	29 мая 2002 г., 18 ч., Кемеровская обл.	29645	-1.8	-10.1	25	18	Вашингтон Брекнелл	6 18 30 18 30	+ + + + +
39	4 июля 2002 г., 18 ч., Калининградская обл.	26702	0.5	-7.9	-	19	Вашингтон	18 30	+ +
40	11 июля 2002 г., 0 ч., Германия, г. Берлин	10382	-2.2	-5.6	33	27	Вашингтон	12 24	+ +

Во второй колонке Таблицы 1 указано место опасного явления и время ближайшего синоптического срока наблюдений.

Конкретные случаи для проверки работоспособности программного средства выбирались по средствам массовой информации, в которых все они представлялись стихийными бедствиями из-за ветров, порой достигавших ураганной силы, многие из них сопровождалась человеческими жертвами и большими материальными потерями. Такой принцип отбора использовался из-за того, что исследуемые явления часто характеризуются небольшим масштабом (десятки километров) и скоротечностью (иногда от 30 минут 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 на

отсутствие явления и оценить “ложные” случаи, которые могут проявляться при работе программного средства. Для примера, рассмотрим случай № 1 в Таблице 1. Это широко известный случай штормового ветра в Москве, в ночь с 20 на 21 июня 1998 г., когда от разгула стихии погибли 11 человек, было повалено более 45 тысяч деревьев. Результаты расчетов устойчиво указывали на то, что в этом месте возможно развитие шквалов. Однако, по данным метеонаблюдений на станции 27612, давление за предшествующие 24 ч. практически не изменилось, величина барической тенденции в 0 ч. составила -2.8 гПа/3 ч., максимальные значения порывов ветра не превысили 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, 39.

На Рис. 4 приведены синоптические условия, наблюдавшиеся при развитии шквалов в Москве 21 июня 1998 г. Представлена карта с полем давления, приземной наноской по данным наблюдений за 21 июня 1998 г. 0 ч. МСВ. На этой же карте изображены фронтальные зоны (пунктир), рассчитанные по вышеизложенной методике по данным ГРИБ Брекнелл за 20 июня 1998 г. 0 ч. МСВ с заблаговременностью 24 ч. На Рис.5 представлено поле потенциального вихря, приведенное к уровню 500 гПа (заштрихованная область – значения $PV \geq 0.6$ PVU). Над Москвой видна аномалия потенциального вихря, которая перекрывает находящуюся под ней бароклинную зону. На Рис.6 показана итоговая расчетная зона шквалов (жирным пунктиром). Расчетная скорость ветра составила 29 м/с.



Рис.4

Синоптическая ситуация 21 июня 1998 г. 0 ч. МСВ. Пунктиром показаны рассчитанные фронтальные зоны по данным ГРИБ Брекнелл за 20 июня 1998 г. 0 ч., заблаговременность 24 ч.

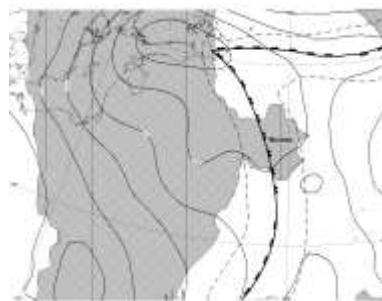


Рис.5

Поле потенциального вихря, приведенного к уровню на 500 гПа, по данным ГРИБ Брекнелл за 20 июня 1998 г. 0 ч., заблаговременность 24 ч.



Рис.6

Итоговая зона шквалов 21 июня 1998 г. 0 ч. МСВ (жирный пунктир). Обозначено расчетное значение порывов ветра.

Из 40 случаев опасных явлений, представленных в Таблице 1, только в двух случаях ни по одной из моделей не удалось идентифицировать зону возможного возникновения штормовых ветров.

Сопоставление результатов, полученных по исходным данным разных моделей и заблаговременностей, показывает, что качество исходных данных оказывает существенное влияние на конечный результат. В работах [7, 8, 11] предлагается 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, прошедшего в г. Москве в июле 2001 г. (см. № 27 в Таблице 1). В этом случае расчет по данным, полученным по модели Вашингтона, показал худшие результаты, по сравнению с расчетом по данным из Брекнелла. В случае же штормовых ветров на Балтике, прошедших в июле 2001 г. (№26, Рис. 5) и в ноябре 2001 г. (№ 33), лучшие результаты были по исходным данным, полученным по модели Вашингтона. Максимальная заблаговременность, при которой удавалось идентифицировать место опасного явления, обычно не превышала 30 часов. Хотя, в некоторых случаях устойчивый результат достигался и в прогнозе до 36 часов. 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 определились 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 составляет 6 часов, а исследуемые явления, как уже говорилось выше, в большинстве случаев имеют локальный и скоротечный характер. В данном случае, шквал в Саратове начался в 12:30 и продолжался 30 минут.

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 имеется наиболее густая 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 18 - 0 и 6 - 12. Ложным считался случай, если фактические максимальные значения порывов скорости ветра в указанных зонах были менее 15 м/с. В противном случае полагалось, что программа правильно определила зону шквалов (т. е. на ближайших станциях была зафиксирована скорость порывов ветра 15 м/с или более). За указанный срок было 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 фактическое значение скорости ветра – (т. е. рассчитанные зоны попадали в неосвещенные районы или на территории стран, не передающих значения порывов ветра в международный обмен). Таким образом, вероятность ложных случаев составила менее 30%, при условии учета всех случаев и, если не принимать во внимание 59 неподтвержденных случаев – менее 16%.

Было также проведено сравнение вышеизложенного метода с известными методами прогноза шквалов. Наиболее близкими аналогами были приняты методы прогноза шквалов – два метода Решетова [5, 6] и метод Фобуша – Миллера [6]. Для первого метода Решетова [6], предикторами являются разность между максимальной температурой ($T_{\text{макс}}$) 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. Основным 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 Таблицы 1 были выбраны 27 случаев опасных явлений, происшедших в теплый период года и для них были произведены расчеты по исходным данным ГРИБ Брекнелл. Результаты сведены в Таблицу 2.

Таблица 2.

№, в скобках - № Из Таблицы 1	Зафиксированный случай шквала	Заблаговр. (ч.)	Метод Решетова 1	Метод Решетова 2	Метод Фобуша - Миллера	Предлагаемый алгоритм
1 (1)	21 июня 1998 г., 0 ч., Россия, 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., Россия, Новгородская область	18 30	- -	+ +	- -	+ +
5 (9)	19 июня 2000 г., 12 ч., Россия, г. Самара, Тольятти	Анализ 12 24	- - -	- - -	+ + -	+ + +
6 (10)	19 июня 2000 г., 18 ч., Россия, Татарстан.	18 30	+ +	+ +	+ +	+ +
7 (11)	6 июля 2000 г., 0 ч., Украина, Николаевская обл.	Анализ 12, 24	- - -	- - +	+ + +	+ + -
8 (12)	15 июля 2000 г., 18 ч., Россия, Ленингр. обл.	18 30	- -	+ -	+ -	+ +
9 (13)	26 июля 2000 г., 6 ч., Россия, Башкирия	18 30	+ +	+ +	+ +	+ +
10 (14)	2 августа 2000 г., 18 ч., Россия, Саратовск. обл.	18, 30	- -	+ +	+ +	+ +
11 (15)	22 августа 2000 г., 18 ч., Белоруссия	18 30	- -	+ -	- -	+ +
12 (16)	8 сентября 2000 г., 18 ч., Россия, Ульянов. обл.	18 30 6 18	- - - -	+ - - -	+ + - -	+ - + +
13 (21)	21 мая 2001 г., 12 ч., Россия, Самарская обл.	Анализ 12 24	+ + -	+ + -	+ + -	+ + +

14 (22)	22 мая 2001 г., 12 ч., Россия, Пермь	Анализ 24 36	+	+	+	-
15 (23)	6 июля 2001 г., 0 ч., Россия, г.Тольятти	Анализ 12 24	+	+	-	+
16 (24)	7 июля 2001 г., 0 ч., Франция, Страсбург	Анализ 12 24	-	-	-	+
17 (25)	16 июля 2001 г., 18 ч., Россия, Ленингр. обл., Польша	18 30	-	+	-	+
18 (26)	19 июля 2001 г., 6 ч., Эстония	18 30	-	+	-	+
19 (27)	24 июля 2001 г., 12 ч., Россия, 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	-	+	-	+
22 (30)	20 августа 2001 г., 12 ч., Россия, г.Саратов	Анализ 12 24	+	-	-	-
23 (31)	28 августа 2001 г., 0 ч., Россия, Калининград	Анализ 12 24	+	+	+	+
24 (32)	26 сентября 2001 г., 6 ч., Россия, Адлер	18 30	-	+	+	+
25 (38)	29 мая 2002 г., 18 ч., Кемеровская обл.	18 30	-	-	-	+
26 (39)	4 июля 2002 г., 18 ч., Калининградс кая обл.	18 30	-	-	-	+
27 (40)	11 июля 2002 г., 0 ч., Германия, г. Берлин	12 24	-	-	-	+

Анализ результатов показывает, что примерно в 25% случаев, рекомендованные методы прогноза шквалов не смогли выявить зоны возможных опасных явлений. Исключениями являются 3 случая – N 7, когда метод Фобуша-Миллера показал лучшие результаты, N 14, когда лучше был второй метод Решетова и N 22, когда лучшие результаты показал первый 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.

3. Заключение

Осуществлен эксперимент по определению зоны возможного возникновения шквалов с использованием расчета взаимодействия потенциального вихря Эртеля с бароклинными 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 относится 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 Научно-Производственном Центре Мэп Мейкер и предназначена для работы на обычных персональных компьютерах в среде WINDOWS в составе технологии ГИС Метео.

Литература

1. Акулиничева А. А., Беркович Л. В., Соломахов А. Ю., Шмелькин Ю. Л., Юсупов Ю. И. Геоинформационная система "Метео" и состояние её 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. – С-П., Гидрометеиздат, - 1992, с. 72.
3. Борисова В. В., Шакина Н. П. Использование потенциального вихря для расчета высоты и температуры тропопаузы. Труды Гидрометцентра 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., Гидрометеиздат, - 1986, с. 527 – 536.
6. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. – Л., Гидрометеиздат, 1985, с. 152 – 161.
7. Browning K. A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development. Meteorol. Appl.- 1997, N 4:-P. 317-324.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Mansfield D. A. The use of potential vorticity as an operational tool. Meteorol. Appl.,-1996, N 3: -P. 195-210.
12. Parfiniewicz J. W. Rapid cyclogenesis over Poland on 28 March 1997. Meteorol. Appl., -1999, N 6: -P. 363-370.
13. 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.
14. Sturtevant, J. S. The Severe Local Storm Forecasting Primer, 1995, -P. 197.

Подписи к рисункам.

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

Рис. 2. 26 декабря 1999 г., 6 ч. МСВ. Поле потенциального вихря на уровне 500 гПа. Зоны, где значения $PV \geq 0.6 PVU$, заштрихованы.

Рис. 3. 26 декабря 1999 г., 6 ч. МСВ. Рассчитанная зона шквалов (пунктир). Исходные данные – ГРИБ Брекнелл за 12 ч. 25 декабря 1999 г., прогноз на 18 ч.

Рис. 4. 21 июня 1998 г., 0 ч. МСВ. Поле давления на уровне моря и приземная наноска. Рассчитанные фронтальные зоны (пунктир) по данным ГРИБ Брекнелл за 20 июня 1998 г. 0 ч. МСВ, заблаговременность 24 ч.

Рис. 5. 21 июня 1998 г., 0 ч. МСВ. Поле потенциального вихря на уровне 500 гПа. Зоны, где значения $PV \geq 0.6 PVU$, заштрихованы.

Рис. 6. 21 июня 1998 г., 0 ч. МСВ. Рассчитанная зона шквалов (пунктир). Исходные данные – ГРИБ Брекнелл за 0 ч. 20 июня 1998 г., прогноз на 24 ч.