

Модель гидродинамико-статистического прогноза с заблаговременностью 12-48 ч сильных шквалов и смерчей по территории Сибири

Э.В. Переходцева

*ГУ Гидрометцентр России,
123242, Москва, Б. Предтеченский пер., 9-11,
E-mail: perekhod@mecom.ru*

В статье изложены результаты адаптации к территории Сибири разработанных ранее для территории Европейской части России методов прогноза шквалов и смерчей, основанных на использовании гидродинамико-статистической модели прогноза этих явлений. Приведены также примеры прогноза с заблаговременностью 12-48ч этих опасных явлений для территории Сибири.. На основании анализа ежедневно рассчитываемых прогнозов делается вывод об устойчивости разработанной модели гидродинамико-статистического прогноза шквалов, смерчей и ветра со скоростью $V > 24 \text{ м/с}$.

Ключевые слова: гидродинамико-статистическая модель, альтернативный прогноз, территория Сибири, опасные явления, шквалы и смерчи, заблаговременность прогноза, устойчивость модели.

Введение

Территория Западной и Восточной Сибири значительно превышает территорию европейской части России и состоит из большого числа различных по своим географическим условиям регионов. Ущерб, причиняемый сильными и штормовыми ветрами, включая шквалы и смерчи, очень велик. Заблаговременное успешное предупреждение таких ветров позволило бы заранее принять предохраниительные меры и значительно снизить экономические потери.

Прогнозирование этих явлений по территории Сибири до настоящего времени является актуальной и весьма трудной задачей синоптической практики. Сеть метеорологических станций по территории Сибири, данные с которых поступают в метеорологические центры России, Европы и Америки, существенно реже, чем в европейской части России и, тем более, в Европе, что особенно затрудняет разработку успешных гидродинамических прогнозов по этой территории как в России, так и за рубежом. В России пока не существует успешных гидродинамических прогнозов максимальных скоростей летнего ветра, превышающих 19м/с, и, тем более, прогнозов шквалов и смерчей с максимальными скоростями ветра, превышающими 24м/с. Существующие графические и расчетные методы прогноза шквалов (Руководство, ч. 2, 1985), использующие зависимость указанных явлений от двух-трех параметров, в значительной степени зависят от интуиции синоптика. Поэтому наиболее успешными методами объективизации прогноза таких явлений являются статистические методы, использующие зависимость возникновения сильных ветров, шквалов и смерчей от большого числа параметров атмосферы.

В связи с этим разработанные ранее для европейской части России модели физико-статистического и гидродинамико-статистического прогноза сильного ветра скоростью свыше 19м/с и свыше 24м/с, включая шквалы и смерчи (Переходцева, 1985), (Переходцева, 1992), (Веселова Г.К. и др., 1995), (Perekhodtseva E.V., 2002) были адаптированы нами для территории Сибири.

Модель альтернативного прогноза сильных шквалов и смерчей

Статистические решающие правила прогноза этих явлений были получены с использованием статистической модели прогноза на основе байесовского подхода распознавания векторов, принадлежащих многомерным выборкам двух классов (Андерсон Т., 1963). В статистической модели метеорологические ситуации, в которых возникли указанные явления шквалов, представлялись как множество n -мерных векторов $\{X=(x_1, x_2, \dots, x_n)\}$, составивших выборку наличия явления. Для той же европейской территории России и для тех же дат, но для пунктов, где не наблюдались указанные явления, но частично были отмечены грозы, была сформирована и выборка отсутствия явлений (также n -мерных векторов, компонентами которых служили значения n потенциальных физически обоснованных параметров атмосферы). С целью уменьшения размерности пространства признаков n без значительной потери информации был применен предложенный нами метод диагонализации средней матрицы корреляции R и выделения блоков зависимых предикторов (параметров атмосферы) с последующим отбором наиболее информативных из них в вектор-предсказатель, состоящий из наиболее информативных и слабо зависимых предикторов – представителей от каждого блока матрицы R (Переходцева, 1985).

В качестве критериев информативности использовались следующие критерии: расстояние Махalanобиса (Андерсон Т., 1963) и критерий минимума энтропии Вапника-Червоненкиса (Вапник В.Н. и др., 1979).

Модель автоматизированного гидродинамико-статистического прогноза шквалов и смерчей

Разработанный метод прогноза шквалов скоростью свыше 19м/с, основанный на статистической модели альтернативного прогноза, в отличие от методов, изложенных в (Руководство, 1985), был уже объективным, не зависящим от интуиции синоптика (Переходцева Э.В., 1985), (Переходцева Э.В., 1992), однако расчет явления, прогнозируемого в заданном пункте и некоторой его окрестности, проводился вручную по разработанному автором статистическому решающему правилу.

С целью автоматизации метода прогноза шквалов и максимальных порывов ветра со скоростями свыше 19м/с и свыше 24м/с были разработаны новые гидродинамико-статистические модели прогноза. В качестве потенциальных физически обоснованных предикторов были взяты те параметры атмосферы, которые непосредственно прогнозируются гидродинамическими моделями и линейно от них зависят (впервые в автоматическом режиме в оперативной системе Гидрометцентра России использовались выходные поля полу-сферной неадиабатической модели (Беркович Л.В. и др., 1986).

После применения метода диагонализации средних матриц корреляции R для выборки шквалов со скоростью максимального ветра $V>19\text{м/с}$ и для выборки явлений со скоростью $V>24\text{м/с}$ соответственно были отобраны наиболее информативные векторы-предсказатели, и рассчитаны в зависимости от входящих параметров статистические решающие правила $F_1(X)$ и $F_2(X)$ для каждого класса явлений отдельно. Из 38-и приведенных в табл. 1 параметров атмосферы в векторы-предсказатели обеих выборок вошли 8 параметров, включающих значения геопотенциала на уровне 1000гПа, максимальной температуры и температуры точки росы у земли, скорости ветра и сдвига ветра в средней тропосфере, модуля гори-

зонтального градиента температуры на уровне 850 гПа, температуры на уровне максимального ветра в атмосфере (300 гПа), индекса неустойчивости Вайтинга.

Таблица 1. Перечень потенциальных предикторов гидродинамико-статистической модели прогноза шквалов и смерчей

	Обозначение	Параметры атмосферы
1	P	Давление на уровне моря.
2–6	H ₁₀₀₀ , H ₈₅₀ , H ₇₀₀ , H ₅₀₀ , H ₃₀₀	Геопотенциал на уровне 1000, 850, 700, 500, 300 гПа
7	T ₃	Температура у поверхности земли
8–12	T ₉₂₅ , T ₈₅₀ , T ₇₀₀ , T ₅₀₀ , T ₃₀₀	Температура на уровне 925, 850, 700, 500, 300 гПа
13	Td ₃	Температура точки росы у поверхности земли
14–18	D ₉₂₅ , D ₈₅₀ , D ₇₀₀ , D ₅₀₀ , D ₃₀₀	Дефицит точки росы на уровне 925, 850, 700, 500, 300 гПа
19–28	U ₉₂₅ и V ₉₂₅ , U ₈₅₀ и V ₈₅₀ , U ₇₀₀ и V ₇₀₀ , U ₅₀₀ и V ₅₀₀ , U ₃₀₀ и V ₃₀₀	Горизонтальная и вертикальная компоненты скорости ветра на уровне 925, 850, 700, 500, 300 гПа
29	W	Значение упорядоченных вертикальных движений
30	Iw	Значение индекса неустойчивости Вайтинга
31	U ₈₅₀ -U ₉₂₅	Разность горизонтальных компонент на уровнях 850 и 925 гПа
32	V ₈₅₀ -V ₉₂₅	Разность вертикальных компонент на уровнях 850 и 925 гПа
33	U ₅₀₀ -U ₇₀₀	Разность горизонтальных компонент на уровнях 500 и 700 гПа
34	V ₅₀₀ -V ₇₀₀	Разность вертикальных компонент на уровнях 500 и 700 гПа
35–37	∇ T ₃ , ∇ T ₉₂₅ ,	Модуль горизонтального градиента температуры у поверхности земли, на уровне 925, 850 гПа
38	ΔP ₃	Лапласиан давления у поверхности земли

В качестве прогностических значений предикторов с заблаговременностью 12–24–36 ч в F₁(X) и F₂(X) были использованы гидродинамические прогнозы полусферной модели атмосферы заданной заблаговременности (Беркович Л.В., 1986).

В узлах сетки 150x150 км, покрывающей Европейскую территорию России и СНГ, рассчитывались значения функций F₁(X) и F₂(X) и зависящие от них вероятности возникновения каждого из двух классов явлений по формулам:

$$P_1(X) = 100/(1+\text{EXP}(-F_1(X))) \quad (4)$$

$$P_2(X) = 100/(1+\text{EXP}(-F_2(X))) \quad (5)$$

Для прогноза явлений первого и второго классов, в связи с систематическими ошибками прогностических полей полусферной модели, для заблаговременности 12–24–36 ч были эмпирически найдены пороговые вероятности P_{пор.} (P_{пор.} > 50 %). По изолиниям пороговой вероятности в прогнозе выделяются области, где прогнозируется возникновение шквалов или порывов сильного ветра, соответственно, со скоростью V≥20 м/с и V≥25 м/с. Автоматизированный метод гидродинамико-статистического прогноза явлений шквалов и сильных ветров (V≥20 м/с) с заблаговременностью 12 и 24 ч, основанный на применении вышеописанной модели гидродинамико-статистического прогноза был внедрен в оперативную практику (Веселова Г.К. и др., 1995). В течение более десяти лет (с 1993 года до 2005 года) прогнозы оперативно передавались в региональные Управления по гидрометслужбе (УГМС)

Европейской территории России (ЕТР) по каналам связи в виде телеграмм. Автоматизированные прогнозы шквалов, смерчей и порывов ветра со скоростью $V \geq 25$ м/с с заблаговременностью 12–24–36 ч рассчитывались в оперативной системе Гидрометцентра России и передавались в УГМС по электронной почте с 2001 года (Perekhodtseva E.V., 2002). В трех территориальных Управлениях по гидрометслужбе – Северо-Западном УГМС, Верхне-Волжском УГМС, УГМС Татарстана была успешно проведена независимая верификация прогнозов этих явлений с заблаговременностью до 36ч. Средняя предупрежденность прогноза за три летних периода 2003-2005гг. явлений сильных шквалов скоростью $V > 24$ м/с составила $\bar{P}=92\%$, и критерий Пирси-Обухова T оказался равным $T=0,82$ (Переходцева Э.В., Золин Л.В., 2008). Методы прогноза по данной модели были рекомендованы Техсоветами трех УГМС, проводивших независимые испытания, к оперативному использованию.

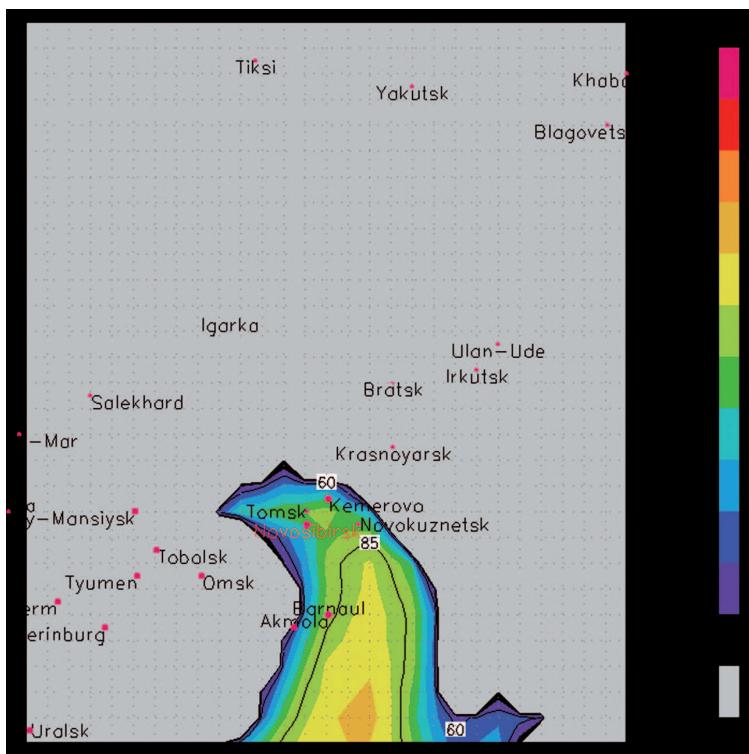


Рис.1. Расчет прогноза шквалов и ветра ($V > 24$ м/с) на текущий день 24 июня 2005 г.

В 2004-2005гг разработанная ранее для ЕТР статистическая модель диагноза и прогноза шквалов и смерчей различной интенсивности была адаптирована автором к метеорологическим условиям, способствующим возникновению сильных шквалов и смерчей на территории Сибири. Повторяемость этих явлений в Сибири несколько ниже, чем в европейской части России, однако среди них более значительную часть составляют явления со скоростью ветра $V > 24$ м/с. Для прогноза шквалов, смерчей и штормовых ветров по территории Сибири в 2004-2005гг использовались прогностические поля полусферной гидродинамической модели Гидрометцентра России с заблаговременностью 12, 24, 36ч. Были предупреждены практически все шквалы и штормовые ветры, например, такие явления, как сильные шквалы 24 июня 2005 года со скоростью ветра $V=37$ м/с в Новосибирской области и на Алтае (рис.1) (Perekhodtseva E. V., 2002), сильный шквал 4 июля 2005 года со скоростью $V=26$ м/с – в Туруханске и многие другие. Однако, на той территории, где в атмосфере быстро развивалась неустойчивая стратификация, и гидродинамическая модель не прогнозировала эти процессы, явления не были предупреждены. При та-

ких условиях даже за 12ч не были предупреждены шквалы в Иркутске и Улан-Удэ. Предупрежденность прогноза за два года явлений сильных шквалов и порывов летнего ветра со скоростью $V>24\text{м/с}$ и заблаговременностью 12-36ч составила 86% ($a=0,14$). Надо отметить, что число «ложных тревог» (в) при прогнозировании по данной гидродинамико-статистической модели с использованием выходных полей полусферной модели оказалось не слишком велико, поэтому значение критерия Пирси-Обухова (T) ($T=1-a-v$, где a – ошибка первого рода, и v – ошибка второго рода) составило $T=0,78=1-0,14-0,08$ для заблаговременности 36ч и $T=0,75=1-0,14-0,11$ для заблаговременности 12ч (Perekhodtseva E.V., 2006), (Perekhodtseva E.V., 2010).

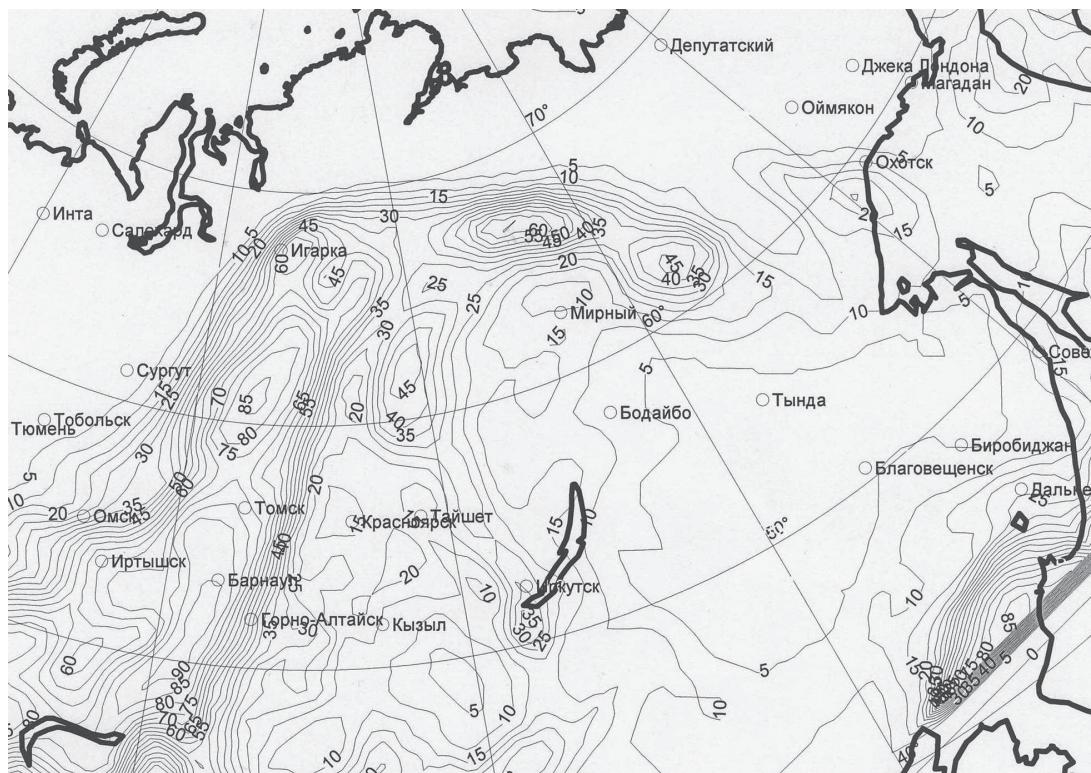
**Модель гидродинамико-статистического прогноза шквалов и смерчей,
использующая выходные прогностические поля региональной модели
Гидрометцентра России**

В связи с заменой в Гидрометцентре России первой оперативной полусферной гидродинамической модели прогноза и внедрением в 2006 году в оперативную практику Гидрометцентра России региональной гидродинамической модели прогноза в сигма-системе координат с горизонтальным разрешением $75\times75\text{км}$, в новом варианте гидродинамико-статистической модели прогноза шквалов и смерчей для территории ЕТР в 2007-2008гг использовались выходные прогностические поля региональной модели с заблаговременностью 12-48ч. Было выполнено приспособление статистической модели прогноза шквалов к новой региональной гидродинамической модели прогноза (Лосев В.М., 2010) с учетом систематических ошибок гидродинамического прогноза метеоэлементов разной заблаговременности. Оценки прогноза по новой модели сильных шквалов и смерчей для территории ЕТР с заблаговременностью 12-48ч, проведенные в летний период 2008-2009гг оказались достаточно успешными, что свидетельствует об устойчивости разработанной автором статистической модели прогноза шквалов и смерчей относительно используемых в ней значений прогностических параметров различных гидродинамических моделей (Переходцева Э.В., 2010).

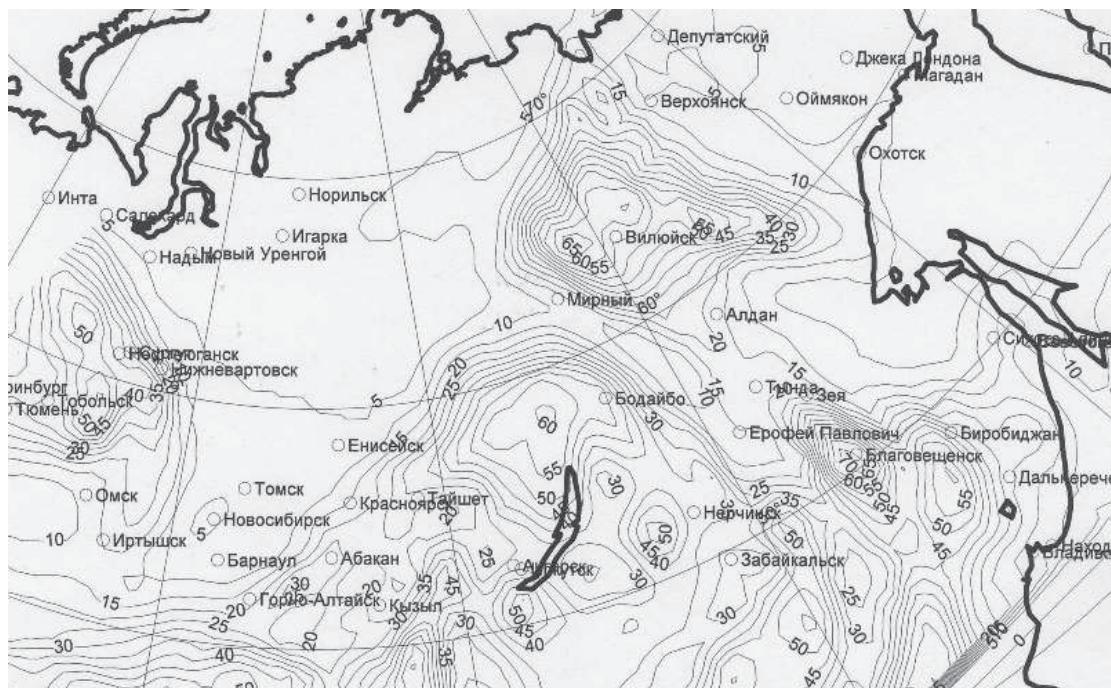
В 2009 году новый вариант гидродинамико-статистической модели прогноза был адаптирован к территории Сибири. В летний период 2010г новый вариант модели прогноза сильных шквалов и сильных осадков с заблаговременностью 12-24-36-48ч для территории Сибири рассчитывался практически ежедневно два раза в сутки. В Сибири летом 2010 года не наблюдалось такой высокой положительной аномалии температуры, как в европейской части России, в некоторых районах температура была даже ниже нормы. Вместе с тем сильные шквалы наблюдались по территории Сибири в течение всего летнего периода, начиная с июня месяца до середины сентября.

Прогноз сильных шквалов на следующий день с заблаговременностью 36ч и даже 48ч оказался достаточно успешным. Были, в частности, за двое суток предсказаны сильные шквалы в Томской и Новосибирской областях 26 июня 2010 года и 22 августа 2010 года (рис.2), спрогнозирована небольшая область возникновения очень сильного ветра в Хабаровском крае 3 июля 2010 года (рис.3), где наблюдалось прохождение смерча, был дан прогноз шквалов и сильного ветра на 8 сентября 2010 года и на 9 сентября 2010 года в обширной области, захватывающей Алтайский и Красноярский края (рис.4), где, действительно, в это осеннее время года были отмечены по всей территории шквалы и усиления ветра скоростью $V=20-26\text{м/с}$. Полученные результаты были одобрены на международной конференции по моделированию

ENVIROMIS-2010 (Perekhodtseva E.V., 2010), и автору было предложено продолжить работу по моделированию и прогнозу сильных шквалов по территории Сибири в тесном контакте с сибирскими территориальными управлениями по гидрометслужбе.



*Рис.2. Расчет прогноза шквалов и ветра ($V>24\text{м/с}$) на 22 августа 2010 г. (на 36 ч).
Область прогноза ограничена изолинией $P=60\%$*



*Рис.3. Расчет прогноза шквалов и ветра ($V>24\text{м/с}$) на 3 июля 2010 г.
Область прогноза ограничена $P=60\%$.
Область возможного возникновения смерчей ограничена изолинией $P=70\%$*

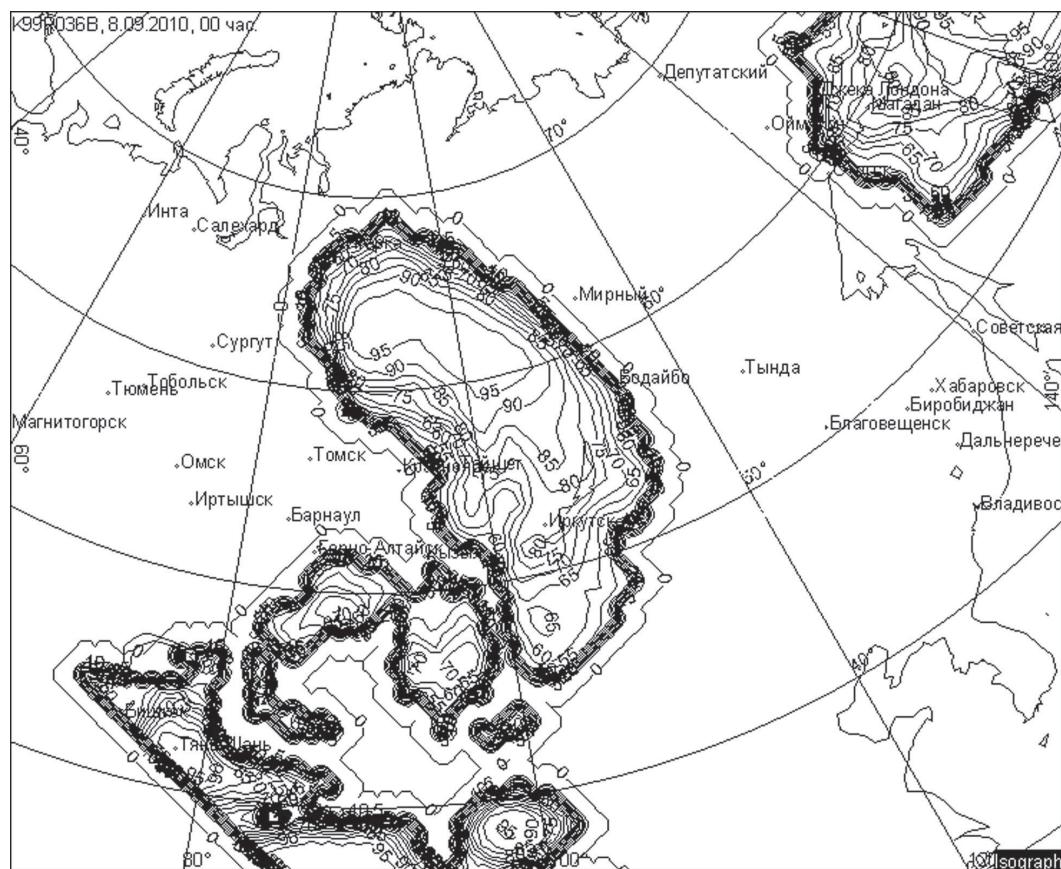


Рис.4. Расчет прогноза шквалов и ветра ($V>20\text{м/с}$) на 9 сентября 2010 г. (на 36 ч)

Область прогноза ограничена изолинией $P=55\%$

Заключение

Проведен анализ оперативных прогнозов на следующие сутки сильных шквалов, смерчей и порывов ветра со скоростью $V>24\text{м/с}$, наблюдавшихся в летний период 2010 года на территории Сибири. Полученные результаты свидетельствуют об успешности и устойчивости нового варианта гидродинамико-статистической модели прогноза шквалов и опасного ветра ($V\geq25\text{ м/с}$) в летний период, адаптированного к территории Сибири.

Поскольку отечественные мезомасштабные гидродинамические модели краткосрочного прогноза погоды, за исключением отдельных случаев, в настоящее время пока не дают успешного прогноза сильных шквалов и смерчей со скоростью ветра $V>24\text{ м/с}$, наиболее перспективным для территории Сибири является прогнозирование этих явлений на основе использования статистической модели прогноза и выходной продукции современных гидродинамических моделей.

Представленный новый гидродинамико-статистический метод прогноза указанных явлений в течение летнего периода 2011 года будет оперативно рассчитываться в системе АСООИ Гидрометцентра России. С помощью сервера FTP синоптики территориальных УГМС Сибири смогут использовать данный метод прогноза с заблаговременностью 12–48 ч при составлении оперативных прогнозов сильных шквалов и штормового ветра на текущий день и следующие сутки.

Литература

1. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. – М.: Физматгиз, 1963. –500с.
2. Беркович Л.В., Ткачева Ю.В. Развитие неадиабатической полушарной прогностической модели атмосферы // Тр. ГМЦ СССР. Вып. 277. С. 3-29.
3. Веселова Г.К., Гайфутдинова Р.Г., Гостева И.П., Дурова Т.В., Овечкина Г.П., Пригодич Н.Ф., Татарова Н.И. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза дневных максимальных скоростей ветра (не менее 20 м/с), связанных с активной конвекцией, заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 23. 1995. С. 7–12.
4. Лосев В.М. Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России. – В кн. «80 лет Гидрометцентру России». – М.: Триада ЛТД, 2010. С. 36–58.
5. Переходцева Э.В. Прогноз шквалов статистическими методами классификации на основании диагностических и прогностических синхронных связей // Труды Гидрометцентра СССР, 1985. Вып. 271. С.37-60.
6. Переходцева Э.В. Объективный физико-статистический метод прогноза шквалов (20м/с и более) на текущий день для Европейской территории. Методические указания // М.: 1992. 11с.
7. Переходцева Э.В., Золин Л.В. Гидродинамико-статистический прогноз и экспертная система прогноза смерчей на Европейской территории России // Труды Гидрометцентра России. 2008. Вып. 342. С. 45. – 54.
8. Переходцева Э.В. Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей // Труды Гидрометцентра России.-2010. Вып. 344. С. 265-279.
9. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть 2. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 488 с.
10. Perekhodtseva E.V. Hydrodynamic-statistical model of forecast to 36h ahead of dangerous convective phenomena –squalls, tornadoes and rainfalls// Research Activities in Atmospheric and Oceanic modeling. 2002. Rep. 32. Part 2. P. 21–23.
11. Perekhodtseva E.V. Hydrodynamic-Statistical Model of Operative Forecast to 12-36h Ahead of Storm Wind, including Squalls and Tornadoes at the territory of Siberia //Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. 2006. Rep. 36. Part 5. P. 43-45.
12. Perekhodtseva E.V. Stability of the statistical model of the hydrodynamic-statistical forecast of the dangerous summer wind over the territory of Siberia // Abstract. International Conference ENVIROMIS-2010. Tomsk, (5.07.10-11.07.10).

The model of hydrodynamic-statistical forecast of the strong squalls and tornadoes over the territory of Siberia with the earliness 12-48 h

E.V. Perekhodtseva

Hydrometcenter of Russia,
B. Predtechenskii line, 9-11, Moscow, 123242.
E-mail: perekhod@mecom.ru

The results of the adaptation to the territory of Siberia of the forecast methods of the squalls and tornadoes, developed for the territory of European part of Russia and based on the hydrodynamic-statistical model, are submitted at this paper. The examples of these dangerous phenomena forecast with the earliness 12-48h over the territory of Siberia are given at this paper too. The conclusion about the stability of the developed model of hydrodynamic-statistical forecast is maid on the base of the analysis of the daily calculating forecast of the squalls, tornadoes and the wind velocity $V>24\text{m/s.m/c}$.

Keywords: the hydrodynamic-statistical model, the alternative forecast, the territory of Siberia, dangerous phenomenon, the squalls and tornadoes, the forecast earliness 12-48 h, the model stability.