

# Комплексное использование графических фигур при разработке метеорологических прогнозов

И. И. Ульшин, e-mail: ulshin@rambler.ru

А. В. Соловьев, e-mail: av-solovev@mail.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и  
Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

***Аннотация.** Представлен способ прогнозирования дальности видимости в районах с низкой плотностью гидрометеорологических станций с применением графических фигур фиксированной длины. Для повышения оправдываемости прогнозов выполнена процедура адаптация полученных фигур с учетом направления ведущего потока, синоптической ситуации, сезона года и явлений погоды. При неоднозначности выбора прогностического заключения применялась комплексация графических фигур дальности видимости и атмосферного давления. Проведен сравнительный анализ успешности прогнозирования предложенным и существующими способами.*

***Ключевые слова:** Графическая фигура фиксированной длины, элемент паттерна, временные ряды, прогностический исход, условная вероятность, дальность видимости, технический анализ, комбинаторика, теория вероятностей, комплексный подход.*

## Введение

Прогностическая информация о метеорологических условиях, в том числе о метеорологической дальности видимости (МДВ), требуется различным потребителям при осуществлении повседневной деятельности [1]. Особенно необходим ее учет при выполнении поисково-спасательных работ, производстве авиационных перелетов, организации наземного транспортного сообщения, судоходства и т.д. В условиях плохой видимости повышается время обнаружения терпящих бедствие, снижается безопасность полетов из-за потери ориентации в пространстве, увеличивается время реакции водителя, а также риск столкновения кораблей.

Стоит отметить, что для МДВ (  $x$  ) свойственны широкий диапазон изменчивости и короткие промежутки времени между переходами от максимальных к минимальным значениям (рис. 1). По этой причине данный атмосферный параметр сложно прогнозировать с

использованием существующих методов, особенно в районах с низкой плотностью гидрометеорологических станций [2, 3]. К подобному типу можно отнести территории Арктической зоны, Северного и Южного Урала, Сибири и Дальнего Востока.

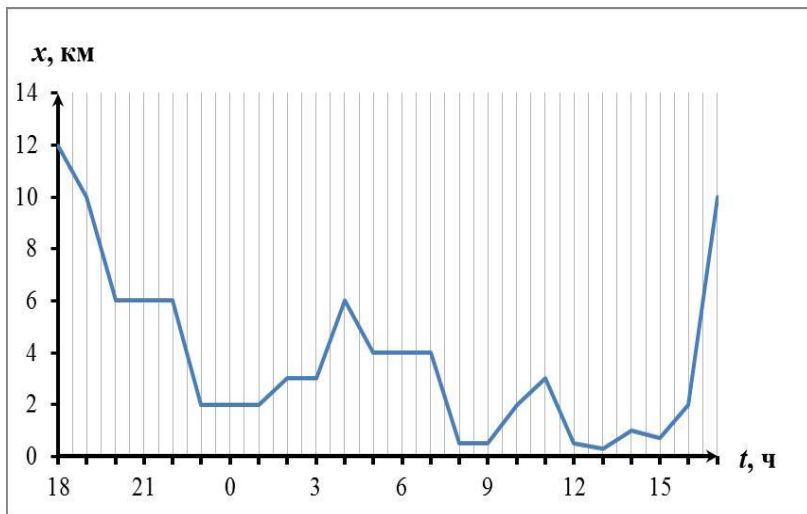


Рис. 1. График суточного хода дальности видимости в январе на аэродроме «Рогачево»

Для повышения оправдываемости прогнозов дальности видимости в районах с разреженной сетью гидрометеорологических станций предложен способ на основе графических фигур (паттернов) фиксированной длины.

### **1. Метеорологическая прогностическая модель на основе паттернов фиксированной длины**

Для использования в прогностических целях в работе были рассмотрены графические фигуры технического анализа [3]. Суть данного подхода заключается в выявлении и последующем использовании закономерностей поведения временных рядов исследуемых величин на основе исторического опыта. Пример типовых графических фигур представлен на рис. 2. Следует учитывать, что методы технического анализа разрабатывались для решения экономических задач и не могут быть использованы в явном виде при разработке метеорологических прогнозов [4].

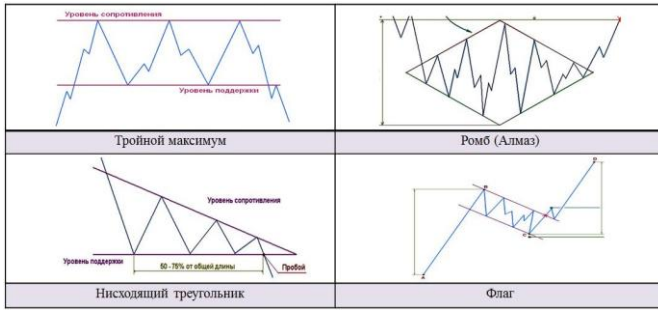


Рис. 2. Основные графические фигуры, используемые в финансовой аналитике

Поэтому в ходе исследования был реализован принципиально иной способ построения и использования паттернов с учетом метеорологической специфики, а также теоретических положений комбинаторики, теории вероятности и математической статистики, анализу временных рядов, теории больших чисел [5-9].

В процессе выполненного анализа метеорологического временного ряда  $\Delta X = \{ \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n \}$  (в рассматриваемом случае – МДВ) были получены графические фигуры фиксированной длины. Подобные паттерны представляют собой график изменения значений атмосферного параметра за несколько сроков наблюдений (рис. 3) [10].

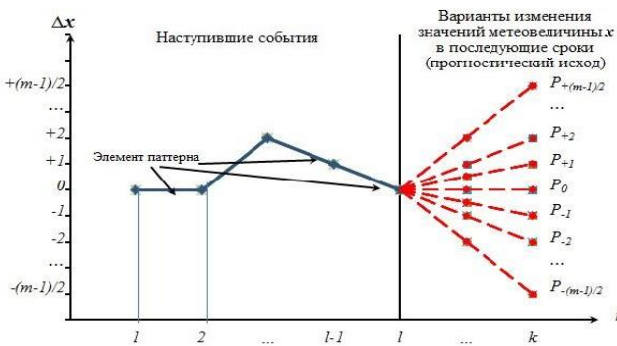


Рис. 3. Схема графической фигуры фиксированной длины метеорологической величины

При завершении формирования графической фигуры в момент времени  $l$  (длина графической фигуры) появлялась возможность

выработки прогностического заключения на период  $k$ . Для этого, исходя из соответствующих условных вероятностей  $P_{+(m-1)/2}, \dots, P_{+2}, P_{+1}, P_0, P_{-1}, P_{-2}, \dots, P_{-(m-1)/2}$ , выбирался один из  $m$  вариантов изменения значения атмосферного параметра  $\Delta x$ .

Поскольку ход метеорологических величин по времени является непрерывным, для возможности построения графических фигур выполнялась процедура дискретизации значений хронологического ряда на основе таблиц перехода от градаций элементов паттерна к номерным обозначениям. Пример подобного вида таблицы для метеорологической дальности видимости представлен в табл. 1.

Таблица 1

*Градации элементов графических фигур МДВ с их обозначениями*

№	Градации изменений МДВ между сроками	Примерная середина градации	Номерное обозначение
1	(-500;+500)	0	«z1=0»
2	[-500;-1500]	-1000	«z2=-1»
3	(-1500;-2500)	-2000	«z3=-2»
4	[-2500;-3500]	-3000	«z4=-3»
5	(-∞;-3500)	-4000	«z5=-4»
6	[+500;+1500]	+1000	«z6=+1»
7	(+1500;+ ∞)	+2000	«z7=+2»

Структурирование прогностической метеорологической модели на основе паттернов фиксированной длины выполнялось следующим образом. Первоначально с использованием введенной системы обозначений были сформированы (пример представлен в табл. 1) и сведены в матрицу (1) все теоретически возможные графические фигуры.

$$\mathbf{D} = [D_1 : \dots : D_s] = (d_{i,j})_{i,j=1}^{s,l} =$$

$$= \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1l} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{s1} & d_{s2} & \dots & d_{sl} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $d_{ij}$  – элемент паттерна;  $D_i$  –  $i$ -я теоретически возможная графическая фигура длины  $l$  при  $1 < i < s$ ;  $s$  – количество выявленных фигур на временном ряде.

Далее была выполнена процедура идентификации полученных фигур на фактическом ряде наблюдений, с последующим объединением в совокупность, представленной в виде выражения (2).

$$U = [U_1 : \dots : U_{n-l}] = \left( u_{i,j} \right)_{i,j=1}^{n-l,l} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1l} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{(n-l)1} & u_{(n-l)2} & \dots & u_{(n-l)l} \end{bmatrix} \quad (2)$$

где  $u_{ij}$  –  $j$ -й элемент  $i$ -го паттерна;  $U_i$  –  $i$ -я теоретически возможная графическая фигура длины  $l$  при  $1 < i < s$ .

По полученной матрице (2) определялась абсолютная частота появления выявленных графических фигур. Вычисление рассматриваемых ранее условных вероятностей выполнялось с использованием уравнения (3).

$$\forall (l - k) \geq 2, i = 1, 2, \dots, s \Rightarrow P(d_j | D_{Ti}) = \frac{P(D_i)}{P(D_{Ti})} = \frac{n_i}{n_{Ti}}, \quad (3)$$

где  $D_{Ti}$  –  $i$ -я прогностическая графическая фигура длины  $(l - k)$ ,  $n_i$  ( $n_{Ti}$ ) – абсолютная частота появления фигуры  $D_i$  ( $D_{Ti}$ ).

Значения полученных вероятностей были сведены в таблицы для каждого прогностического периода.

Определение ожидаемого события выполнялось с помощью выражения (4).

$$P_k(d_{\text{пр } i}) = \max \{ (P_k(d_1 | D_{Ti}), P_k(d_2 | D_{Ti}), \dots, \dots, P_k(d_j | D_{Ti}), \dots, P_k(d_m | D_{Ti})) \} \Rightarrow d_{\text{пр } i} = d_j, \quad (4)$$

при  $i = 1, 2, \dots, s, j = 1, 2, \dots, m,$

где  $P_k(d_{\text{пр } i})$  – вероятность наступления исхода  $d_{\text{пр } i}$  в  $k$ -м периоде прогноза.

На основе полученного результата проводился расчет прогностического значения метеорологической величины  $x_k$  с использованием уравнения (5).

$$x_k = x_0 + (m_{\Delta x}^* + d_{np\ i} \cdot \sigma_{\Delta x}^*), \quad (5)$$

где  $x_0$  – значение метеовеличины в исходный срок наблюдения,  $(m_{\Delta x}^* + d_{np\ i} \cdot \sigma_{\Delta x}^*)$  – срединное значение прогностической градации,  $m_{\Delta x}^*$ ,  $\sigma_{\Delta x}^*$  – оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения ряда  $\Delta X = \{ \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n \}$ .

В дальнейших исследованиях использовались метеоданные по акватории Баренцева моря и прилегающей территории. Выбор этого района для проведения исследований обусловлен разреженной сетью гидрометеорологических станций и частым наступлением сложных метеоусловий, связанных с явлениями погоды, ухудшающих дальность видимости.

При определении оптимальной длины графической фигуры МДВ были рассчитаны общая оправдываемость прогнозирования и средняя абсолютная ошибка. Наилучшие результаты для прогнозов с заблаговременностью до 9 часов были получены при использовании паттернов длиной в 5 сроков наблюдений.

## **2. Адаптация и комплексация графических фигур фиксированной длины**

На следующем этапе работы рассматривалось разделение графических фигур на подгруппы с учетом направления ведущего потока, сезона и синоптической ситуации и явлений погоды непосредственно для территории Баренцева моря. При этом были рассмотрены западное, северо-западное, северное, северо-восточное направления ведущего потока, зимний, летний и переходный периоды года, циклоническая, антициклоническая активность и малоградиентное поле. Явления погоды были представлены в виде 4 основных групп: дымки (туманы); кристаллообразные осадки; осадки в жидкой форме; метель (поземок, бури).

Пример применения адаптации к графической фигуре МДВ изображен на рис. 4.

Выполнение данной процедуры позволяло более детализировано оценить особенности структуры метеорологических временных рядов, что способствовало повышению оправдываемости прогнозов значений МДВ.

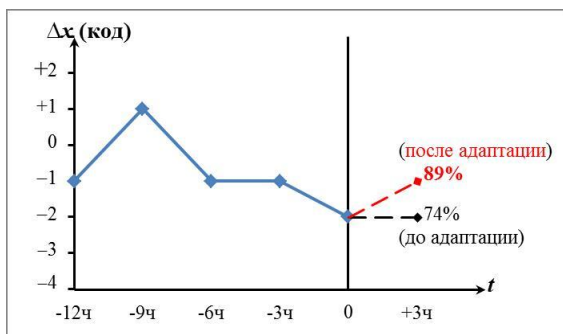


Рис. 4. Коррекция прогностического значения дальности видимости с использованием адаптации

При неоднозначности наступления ожидаемого события, определяемого по условной вероятности, решение принималось при помощи комплексации графических фигур с учетом тенденции атмосферного давления. Схема использования данной процедуры представлена на рис. 5.

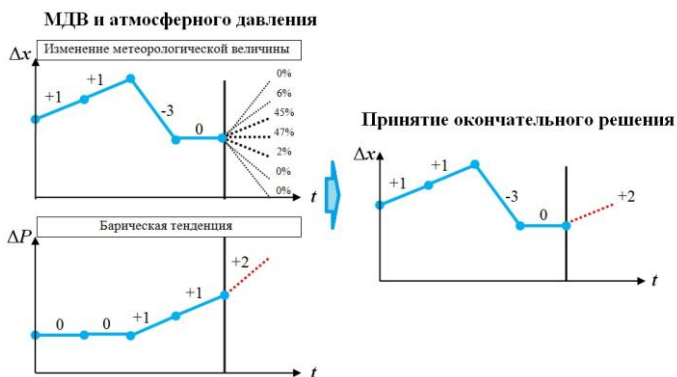


Рис. 5. Коррекция прогностического значения дальности видимости с использованием комплексации фигур с учетом барической тенденции

В этом случае параллельно формировались графические фигуры по результатам наблюдений за видимостью и атмосферным давлением. При этом условные вероятности возможных исходов определялись с учетом сопоставления графических фигур используемых атмосферных параметров. На момент разработки окончательного прогностического

заклучения производилась коррекция ожидаемого события, что повышало успешность разрабатываемых прогнозов.

### 3. Результаты исследования и сравнительный анализ

Для оценки успешности предложенного подхода к прогнозированию значений МДВ был выполнен сравнительный анализ. В качестве опорных методов рассматривались авторегрессионный и инерционный способы. При проведении анализа использовались архивные данные наблюдений за погодой на метеостанции 22095 (о. Колгуев). Для оценки успешности прогнозов применялись такие критерии как общая оправдываемость и средняя абсолютная ошибка, полученные с помощью выражений, представленных в «Методических указаний по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов» (РД 52.27.284-91) [11]. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

*Значения критериев успешности прогнозирования для анализируемых способов*

Способ прогноза	Критерий успешности	
	Общая оправдываемость	Средняя абсолютная ошибка, м
С заблаговременностью до 3 часов		
Графические фигуры фиксированной длины	84%	863
Инерционный подход	75%	1076
Авторегрессия	78%	972
С заблаговременностью до 6 часов		
Графические фигуры фиксированной длины	82%	889
Инерционный подход	63%	1242
Авторегрессия	68%	1036
С заблаговременностью до 9 часов		
Графические фигуры фиксированной длины	81%	974
Инерционный подход	49%	1750
Авторегрессия	52%	1681

Критерии успешности прогнозов, разработанных с применением графических фигур и линейной тенденции с учетом дисконтирования,



свидетельствуют о преимуществах предложенных методов. Общая оправдываемость повысилась на 9-32%, а средняя абсолютная ошибка уменьшилась на 109-776 м (в зависимости от заблаговременности прогнозов) по сравнению с существующими методами.

### **Заключение**

В ходе проведенного исследования был практически реализован новый подход к предсказанию дальности видимости в районах с низкой плотностью метеорологических станций. В основу данного подхода положено использование графических фигур фиксированной длины как прогностического инструмента. Для снижения неопределенности выбора ожидаемого события были выполнены процедуры адаптации и комплексации полученных паттернов МДВ и атмосферного давления.

Использование адаптированных и прошедших комплексацию графических фигур позволяет существенно улучшить критерии успешности прогнозирования метеорологических величин по сравнению с существующими способами.

### **Список литературы**

2. Пиловец, Г.И. Метеорология и климатология: учеб. пособие / Г.И. Пиловец. – Москва: ИНФА-М, 2017. – 399 с.
3. Панин, Б.Д. Численные методы прогноза погоды / Б.Д. Панин, П.Н. Белов, Е.П. Борисенков. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 376 с.
4. Линькова, М.В. Технический анализ: понятие, сущность и аксиомы // Территория науки, 2016. – № 3. – С. 179–182.
5. Алейникова, Н.А. Разработка стохастических моделей прогнозирования на основе количественной интерпретации методов технического анализа : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 05.13.18 / Алейникова Н.А.; [Место защиты: Воронеж. гос. технол. акад.]. – Воронеж, 2003. – 123 с.
6. Математическое моделирование и дифференциальные уравнения : учебное пособие для магистрантов всех направлений подготовки / М.Е. Семенов [и др.]. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2017. – 149 с.
7. Монсик, В.Б. Вероятность и статистика: учеб. пособие / А.А. Скрынников; В.Б. Монсик.– 4-е изд. (эл.). – Москва : Лаборатория знаний, 2020. – 384 с.
8. Айвазян, С.А. Эконометрика-2: продвинутый курс с приложениями в финансах: учебник / С.А. Айвазян, Д. Фантаццини. – Москва: Магистр: Инфра-М, 2014. – 944 с.

9. Forbes, C. *Statistical Distributions*. 4th ed./ C. Forbes, M. Evans, N. Hastings, B. Peacock.– N. Y.: John Wiley & Sons, 2011. – 231 p.

10. Матвеев, М.Г. Верификация процесса конвективной диффузии на основе анализа многомерных временных рядов / М.Г. Матвеев, Е.А. Сирота, М.Е. Семенов // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных: сборник научных трудов XIX Международной конференции DAMDID / RCDL'2017 (10–13 октября 2017 года, г. Москва, МГУ, Россия). – Москва, 2017. – С. 433-437.

11. Соловьев, А. В. Использование инструментов технического анализа при разработке агрометеорологических прогнозов / И. И. Ульшин, А. Г. Буховец // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – № 2 (69). – С. 149-155. DOI:10.17238.

12. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов (РД 52.27.284-91) / под ред. В.И. Кузьменко. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. – 151 с.