

# Регрессионное моделирование дальности видимости с учетом дисконтирования метеорологических данных

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

И. С. Косован, e-mail: av-solovev@mail.ru

Н.В.Толстых, e-mail: av-solovev@mail.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «ВВА»

***Аннотация.** Рассматривается научно-математический аппарат краткосрочного прогнозирования метеорологической дальности видимости на основе регрессионной модели изменчивости метеорологической величины с учетом дисконтирования. Полученные прогностическая информация на основе данной модели позволяет повысить безопасность полетов летательных аппаратов в сложных метеорологических условиях при ограниченном объеме исходных данных.*

***Ключевые слова:** ограниченный объем исходной метеоинформации, прогнозирование, регрессионная модель, дисконтирование, метеорологическая дальность видимости, весовой коэффициент.*

## Введение

Учет метеорологической дальности видимости необходим при выполнении различного рода задач в различных сферах деятельности человека. Особенно важна хорошая видимость при организации полетов авиации. Ее значительное ухудшение существенно осложняет взлет-посадку для летательных аппаратов любого типа [1]. Заблаговременное предсказание метеорологической дальности видимости (МДВ) ниже установленных для воздушных судов и экипажей минимумов, либо ее улучшение позволит повысить уровень безопасности полетов.

Традиционные способы прогнозирования МДВ ( $v$ ) основываются на синоптических, физико-статистических и гидродинамических подходах, предполагающих использование в качестве исходных данных большого объема различного архивного материала [2]. В районах с разреженной сетью метеорологических станций получение необходимой информации для их реализации сложно выполнимо.

Исходя из вышесказанного, научные исследования, посвященные поиску более совершенных прогностических способов, использующих ограниченное количество метеоинформации, являются актуальными.

Целью данной работы является разработка регрессионной модели изменчивости метеорологической величины с учетом дисконтирования данных при использовании ограниченном количестве метеоинформации и проверка ее на адекватность.

### 1. Разработка регрессионной модели изменчивости метеорологической величины с учетом дисконтирования данных

Для решения задачи по краткосрочному прогнозированию МДВ с заблаговременностью до 3 часов при наличии ограниченного объема исходной информации, либо при отсутствии возможности получения квалифицированной консультации в метеорологическом подразделении было предложено использовать регрессионную модель изменчивости метеорологической величины с учетом дисконтирования данных. Эта модель основана на положениях теории анализа временных рядов и метода аналитического сглаживания.

Схематично порядок прогнозирования МДВ с использованием регрессионной модели с учетом дисконтирования изображен на рис. 1. В качестве исходных данных для предложенной модели используется временной ряд метеорологической величины  $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ . Согласно представленной схеме для прогнозирования с заблаговременностью  $p$  сроков необходимо  $l$  последовательно полученных значений  $v$ . По данным наблюдений  $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$  формируется выборочная совокупность  $v_1, v_2, \dots, v_k$ , при  $k < n$ . При этом индекс  $k$  соответствует номеру периода текущего времени.

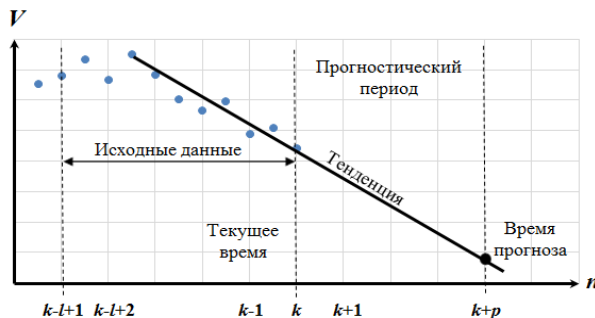


Рис. 1. Схема прогнозирования значений метеорологической величины при использовании регрессионной модели с учетом дисконтирования данных

В прогнозе метеорологической величины на срок  $(k + p)$  используются данные фактических наблюдений во временном интервале от  $(k - l + 1)$  до  $k$ . Стоит отметить, что при первом расчете параметр  $k$  равен номеру периода  $l$ . При дальнейшем прогнозировании  $k$  растет при фиксированном значении  $l$ . Для каждого полученного результата, достигшего критического значения (установленного минимума), выполняется расчет наступления данного события.

Для формализации модели изменчивости метеорологической величины с учетом дисконтированных данных использовалось в качестве основы уравнение линейной регрессии первого порядка следующего вида:

$$v_{k+p} = a_k (k + p) + b_k, \quad (1)$$

где  $v_{k+p}$  – прогностическое значение метеорологической величины;  $a_k$  и  $b_k$  – коэффициенты уравнения.

С использованием метода наименьших квадратов были получены уравнения коэффициентов линейной модели (1), адаптированные под задачи проводимого исследования [3-6]:

$$a_k = \frac{l \cdot \left( \sum_{j=k-l+1}^k j \cdot v_j \right) - \left( \sum_{j=k-l+1}^k j \right) \left( \sum_{j=k-l+1}^k v_j \right)}{l \cdot \left( \sum_{j=k-l+1}^k j^2 \right) - \left( \sum_{j=k-l+1}^k j \right)^2}, \quad (2)$$

$$b_k = \frac{1}{l} \sum_{j=k-l+1}^k v_j - \frac{a_k}{l} \left( \sum_{j=k-l+1}^k j \right)$$

где  $v_j$  – значение метеорологической величины  $j$ -го периода наблюдения.

После применения правил о суммах прогрессии, для которых справедливы равенства:

$$\sum_{j=k-l+1}^k j = l \left( k - \frac{l-1}{2} \right) \quad \text{и}$$

$$\sum_{j=k-l+1}^k j^2 = \frac{l(l-1)(2l-1)}{6} + (k+1)kl - kl^2, \quad \text{и выполнения математических}$$

преобразований были получены конечные формулы для определения  $a_k$  и  $b_k$  :

$$a_k = \frac{\left( \sum_{j=k-l+1}^k j \cdot v_j \right) - \left( k - \frac{l-1}{2} \right) \left( \sum_{j=k-l+1}^k v_j \right)}{6l(2l^2 - 3l + 1) - \frac{(2k - l + 1)^2}{4l^2} + kl(k - l + 1)} \cdot \quad (3)$$

$$b_k = \frac{1}{l} \sum_{j=k-l+1}^k v_j - a_k \left( k - \frac{l-1}{2} \right)$$

При этом в формуле (3) переменная  $j$  выступает аналогом весового коэффициента (дисконтом). Чем выше порядковый номер  $j$ , тем более информативно значимым считается значение величины  $x_j$ .

В конечном виде регрессионная модель изменчивости атмосферного параметра с учетом дисконтирования метеоданных выглядит следующим образом:

$$v_{k+p} = \frac{\left( \sum_{j=k-l+1}^k (j \cdot v_j) \right) - \left( k - \frac{l-1}{2} \right) \left( \sum_{j=k-l+1}^k v_j \right)}{l^3 - l} \cdot \quad (4)$$

$$\cdot (12p + 6l - 6) + \frac{1}{l} \sum_{j=k-l+1}^k v_j$$

Полученная модель может быть использована для краткосрочного прогнозирования МДВ в сложных метеорологических условиях.

## 2. Оценивание адекватности прогностической модели

Для проверки адекватности предложенной модели (4) при решении прогностических задач было выполнено ряд экспериментов. В качестве исходных данных рассматривались результаты 15-минутных, 30-минутных и ежечасных наблюдений за МДВ при сложных метеорологических условиях (ВНГОхМДВ – 300х3 и менее) на станции 22113 (г. Мурманск) за период с 2016 по 2021 г. Пример результатов вычислений при уровне значимости  $\alpha=0,05$  показан на рис. 2.

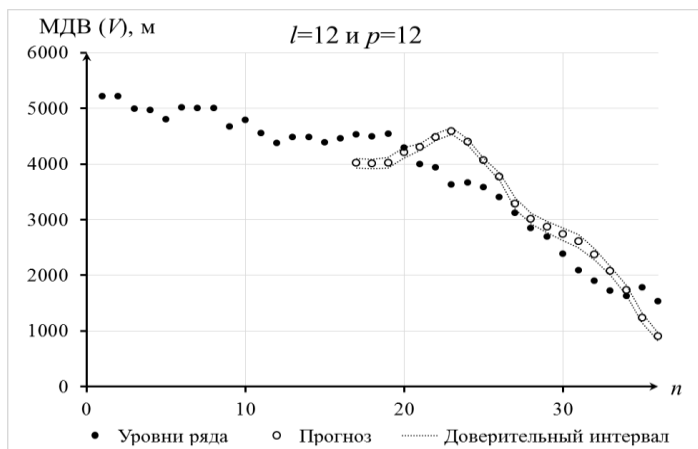


Рис. 2. Пример прогнозирования значений МДВ с использованием регрессионная модель изменчивости атмосферного параметра с учетом дисконтирования метеоданных

В ходе проведенных вычислительных экспериментов было проанализировано влияние параметров  $l$  и  $p$  на результаты, получаемые с помощью выражения (4). При увеличении числа сроков наблюдений  $l$  прослеживалось уменьшение абсолютной ошибки прогнозирования, но при этом предложенная модель медленнее адаптировалась к сменившейся тенденции. Уменьшение  $l$  приводило к снижению точности прогностических результатов и повышению скорости реагирования на качественные изменения, возникающие на хронологических рядах МДВ. Параметр  $p$  характеризует заблаговременность периода предсказания. При росте данного параметра наблюдалось повышение абсолютной ошибки прогнозируемых значений, особенно при большой нестабильности значений временного ряда. Однако при устойчивой тенденции увеличение  $p$  не оказывало влияния на точность получаемых результатов прогнозирования.

На основе выполненного анализа определялось оптимальное число необходимых сроков наблюдений и их интенсивность, а также заблаговременность прогнозирования. В качестве показателей успешности рассматривались общая оправдываемость и средняя абсолютная ошибка [7]. Результаты вычислений сведены в общую матрицу, представленную в табл. 1.

Таблица 1

*Показатели успешности прогнозирования значений МДВ*

Число наблюдений	Критерий успешности					
	Общая оправдываемость			Средняя абсолютная ошибка, м		
	15-мин. наблюдения	30-мин. наблюдения	ежечасные наблюдения	15-мин. наблюдения	30-мин. наблюдения	ежечасные наблюдения
<i>Для прогнозов с заблаговременностью до 1 часа</i>						
4 срока	92%	90%	88%	350	370	420
8 срока	94%	93%	87%	240	400	490
12 сроков	93%	91%	84%	280	480	630
14 сроков	90%	91%	85%	340	520	860
<i>Для прогнозов с заблаговременностью до 2 часов</i>						
4 срока	90%	87%	68%	360	540	1250
8 срока	92%	89%	73%	340	540	940
12 сроков	91%	81%	72%	370	670	980
14 сроков	91%	82%	71%	390	710	1240
<i>Для прогнозов с заблаговременностью до 3 часов</i>						
4 срока	88%	80%	66%	440	800	1700
8 срока	90%	82%	70%	360	750	1340
12 сроков	88%	78%	68%	460	880	1370
14 сроков	87%	81%	66%	510	810	1780

Согласно табл. 1, наилучших показателей прогнозирования значений МДВ удалось достичь при использовании за 8 последовательных 15-минутных наблюдений. Общая оправдываемость в среднем повысилась на 5-16 %, а средняя абсолютная ошибка уменьшилась на 252-713 м, по сравнению с 30-минутными и ежечасными временными интервалами. По отношению к количеству используемых сроков наблюдений (4, 12 и 14) оправдываемость увеличилась на 1-3 %, а ошибка снизилась на 87-217 м.

## **Заключение**

В ходе проведенного исследования была разработана регрессионная модель изменчивости атмосферного параметра с учетом дисконтирования метеоданных, позволяющая получать прогностические значения МДВ на срок до 3 часов при ограниченном объеме метеоинформации. Для реализации предложенной модели в качестве исходного материала необходимо 8 последовательных 15-минутных наблюдений. Общая оправдываемость прогнозов при данном количестве наблюдений за МДВ достигает 90-94 % при средней абсолютной ошибке 240-360 м. Полученные результаты согласно руководящему документу РД 52.27.284-91 [7] являются допустимыми, а используемая регрессионная модель (4) для краткосрочного прогнозирования МДВ на срок до 3 часов может считаться адекватной.

## **Список литературы**

1. Баранов, А.М. Видимость в атмосфере и безопасность полетов / А.М. Баранов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 205 с.
2. Панин, Б.Д. Численные методы прогноза погоды / Б.Д. Панин, П.Н. Белов, Е.П. Борисенков. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 376 с.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для СПО / В.Е. Гмурман. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 479 с.
4. Садовникова Н.А. Анализ временных рядов и прогнозирование / Н.А. Садовникова, Р.А. Шмойлова. – М.: МФПУ Синергия, 2016. – 152 с.
5. Балдин К.В. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник / К.В. Балдин, В.Н. Башлыков. – М.: Дашков и К, 2016. – 472 с.
6. Соловьев А.В. Моделирование временных рядов метеорологических величин с использованием элементов технического анализа / А.В. Соловьев // Информатика: проблемы, методология, технологии: сборник материалов XXI международной научно-методической конференции, 11-12 февраля 2021 г., Воронеж. – Воронеж: ООО «ВЭЛБОРН», 2021. – С. 601-607.
7. 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.