

А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова, Т.Е. Симакина

СВЕРХКРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЭВОЛЮЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ

A.D. Kuznetsov, O.S. Serouhova, T.E. Simakina

VERY SHORT-RANGE FORECASTING THE EVOLUTION OF ATMOSPHERIC FRONTS

Рассматриваются результаты апробации алгоритмов анализа и сверхкраткосрочного прогноза эволюции атмосферных фронтов, построенные на основе различных математических моделей. В результате численных экспериментов, проводимых на фактическом материале для различных типов атмосферных процессов, произведена апробация предложенных математических моделей и получены объективные оценки точности сверхкраткосрочного прогноза.

Ключевые слова: Сверхкраткосрочный прогноз, атмосферные фронты, спутниковые метеорологические снимки, адаптивная фильтрация Калмана, неопределенные множители Лагранжа.

The results of testing of algorithms for analysis and short-range forecasts of the evolution of atmospheric fronts that are based on different mathematical models. As a result of numerical experiments conducted on the actual material for various types of atmospheric processes performed testing of the proposed mathematical models and to obtain an objective assessment of the accuracy of short-range forecast.

Key words: short-range forecasts, atmospheric fronts, weather satellite images, an adaptive Kalman filtering, undetermined Lagrange multipliers.

Введение

Одной из базовых проблем прогноза погоды является задача определения положения фронтальных разделов, анализ и прогноз скорости и направления их перемещения. От качества выполнения сверхкраткосрочного прогноза (СКП) положения атмосферного фронта во многом зависит эффективность предупреждения о наступлении опасных явлений погоды. При этом в связи с использованием интенсивных технологий и широким внедрением автоматизации во всех отраслях народного хозяйства возрастают требования к надежности, точности, оперативности, разрешающей способности СКП.

Задача диагноза и анализа динамики атмосферных фронтов как поверхностей раздела представляется актуальной и требует для своего решения разработки специализированных алгоритмов и программ. Эти программы должны максимально облегчить анализ синоптической ситуации непосредственно на рабочем месте синоптика и обеспечить расчет объективных количественных оценок параметров, характеризующих пространственно-временную эволюцию атмосферных фронтов на различных стадиях их развития.

В данной работе рассматриваются методы временной экстраполяции общих точек, равноотстоящих вдоль линии атмосферного фронта, локализация которых проводится на основе знания характерных свойств облачного покрова на различных этапах развития циклонической деятельности, наблюдаемого на метеорологических снимках геостационарных спутников. Причем число таких общих точек является одинаковым для каждого фронта серии последовательных во времени снимков одного и того же района в разные моменты времени. Процедура нахождения общих точек автоматизирована.

В рамках настоящей работы для аппроксимации и прогноза данных о положении линии раздела воздушных масс в различные моменты времени применялись математические модели, основанные на использовании:

- метода адаптивной фильтрации временных рядов на основе фильтров Калмана-Бьюси;
- классического метода наименьших квадратов;
- классического метода наименьших квадратов с заданием дополнительных условий на основе неопределенных множителей Лагранжа (в качестве дополнительных условий задавалось время «останова» движения фронта, а также использовалось уравнение неразрывности);
- метода наименьших квадратов с совместной минимизацией суммы квадратов отклонений координат общих точек от их аппроксимационных значений и суммы квадратов скоростей движения общих точек фронта;
- метода наименьших квадратов с совместной минимизацией суммы квадратов отклонений координат общих точек от их аппроксимационных значений и суммы квадратов значений кривизны траекторий общих точек фронта.

В дальнейшем предполагается включить в указанный перечень и использование методов нейросетевого прогнозирования [1].

Модель адаптивного Калмановского фильтра задавалась следующим образом:

$$y_t = \mathbf{Y}_{t-1}^T \Theta_t + \varepsilon_t,$$

где \mathbf{Y}_{t-1}^T — вектор данных наблюдений и ошибок модели; Θ_t^T — вектор параметров модели, оцениваемый в реальном времени по мере поступления текущих измерений в соответствии со следующим алгоритмом:

$$\hat{\Theta}_t = \hat{\Theta}_{t-1} + \mathbf{K}_t (y_t - \mathbf{Y}_{t-1}^T \hat{\Theta}_{t-1}),$$

где \mathbf{K}_t — значение вектора Калмановского фильтра [2].

В рамках классического МНК для всех фронтов серии формируются две матрицы координат общих точек фронта \mathbf{X} и \mathbf{Y} для моментов времени $t(j)$. Траектории перемещения каждой общей точки фронта рассматриваются независимо, т.е. предполагается, что движение фронта описывается np траекториями общих точек.

Для каждой из функций $x(t)$ и $y(t)$, заданных в параметрическом виде, где параметром является время t , строится свой полином степени np , коэффициенты в котором определяются по данным наблюдений из условий:

$$\sum_{j=1}^{nf} [x(t_j) - x_j]^2 = \min,$$

$$\sum_{j=1}^{nf} [y(t_j) - y_j]^2 = \min, \quad (1)$$

где $x(t_j)$ и $y(t_j)$ — значения функций $x(t)$ и $y(t)$ в моменты времени $t(j)$; x_j и y_j — координаты векторов \mathbf{X} , \mathbf{Y} в момент времени t_j .

Подробно вывод математических моделей приведен в работе [2].

Построение аппроксимационного полинома в данной работе расширено введением дополнительных критериев:

- 1) минимизация суммы квадратов скоростей перемещения общих точек;
- 2) минимизация суммы квадратов кривизны аппроксимационной функции.

В первом случае вместо минимизации функционала вида (1) минимизируются следующие функционалы от функций $x(t)$ и $y(t)$:

$$\sum_{j=1}^{nf} [x(t_j) - x_j]^2 + p \sum_{j=1}^{nf} \left[\frac{dx(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \right]^2 = \min,$$

$$\sum_{j=1}^{nf} [y(t_j) - y_j]^2 + p \sum_{j=1}^{nf} \left[\frac{dy(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \right]^2 = \min, \quad (2)$$

где p — нормировочный коэффициент.

Во втором случае совместно минимизируются сумма квадратов отклонений аппроксимационной функции от табличных данных и сумма квадратов кривизны траектории движения общих точек с учетом ее параметрического задания:

$$\sum_{j=1}^{nf} [x(t_j) - x_j]^2 + \sum_{j=1}^{nf} [y(t_j) - y_j]^2 + q \sum_{j=1}^{nf} [K(t_j)]^2 = \min,$$

где q — нормировочный коэффициент; $K(t_j)$ — кривизна траектории в момент времени t_j :

$$K(t_j) = \frac{\left[\frac{dx(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \quad \frac{d^2y(t)}{dt^2} \Big|_{t=t_j} \quad - \frac{dy(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \quad \frac{d^2x(t)}{dt^2} \Big|_{t=t_j} \right]}{\left[\left(\frac{dx(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \right)^2 \right]^{3/2}}.$$

В этом случае нахождение коэффициентов аппроксимационных полиномов сводится к решению системы нелинейных уравнений, которое можно получить одним из известных численных методов [3].

Еще одним дополнительным условием, накладываемым на классический МНК, является время «останова» фронта, задаваемое с помощью неопределенных множителей Лагранжа. В этом случае для определения коэффициентов аппроксимирующей функции решается задача не на безусловный, а условный экстремум

$$E = \sum_{j=1}^{nf} [x(t_j) - x_j]^2 + \lambda \cdot g(t) = \min, \quad (3)$$

где параметр λ — неопределенный множитель Лагранжа. Коэффициенты функции $x(t)$ и значение λ находятся из решения следующей системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial a_i} = 0, & i = 0, 1, \dots, np, \\ g(t) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В качестве дополнительного условия используется предположение о равенстве нулю скорости перемещения общей точки в момент времени $t_0 > t_{nf}$. Физический смысл такого дополнительного условия заключается в том, что скорость движения общей точки уменьшается с ростом t до нулевого значения при $t = t_0$.

Математически это условие можно записать в следующем виде:

$$\left. \frac{\partial x(t)}{\partial t} \right|_{t=t_0} = 0. \quad (5)$$

В качестве другого дополнительного условия рассмотрим уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

где ρ — плотность воздуха; p — давление; u , v и w — компоненты скорости ветра вдоль осей x , y и z .

Перепишем это уравнение в форме

$$\frac{\partial u(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial y} = f(t, x, y, z),$$

где

$$f(t, x, y, z) = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} - \frac{\partial w}{\partial z}.$$

Полагая в первом приближении, что уровень z соответствует высоте верхней границы облачности и что скорость перемещения общих точек фронта равна скорости ветра на этом уровне, а также предполагая, что за рассматриваемый промежуток времени

$$f(t, x, y, z) \approx f_0 = const,$$

получим для каждой общей точки дополнительное условие

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = f_0,$$

$$\frac{2a_2}{a_1 + 2a_2t_n} + \frac{2b_2}{b_1 + 2b_2t_n} = f_0,$$

где t_n — время, на которое в дальнейшем будет производиться СКП (оно отличается от t_0).

В дополнительное условие наряду с подлежащими определению коэффициентами a_1, a_2, b_1, b_2 входит параметр f_0 , для вычисления которого можно воспользоваться последним значением ($t = t(nf)$), т.е.

$$f_0 = \frac{2a_2}{a_1 + 2a_2t_{nf}} + \frac{2b_2}{b_1 + 2b_2t_{nf}}.$$

Учитывая тот факт, что в дополнительное условие теперь входят одновременно коэффициенты для функций $x(t)$ и $y(t)$, уравнение (3) теперь должно быть записано в следующем виде:

$$E = \sum_{j=1}^{nf} [x(t_j) - x_j]^2 + \sum_{j=1}^{nf} [y(t_j) - y_j]^2 + \lambda \cdot g(a_1, a_2, b_1, b_2) = 0,$$

где

$$g(a_1, a_2, b_1, b_2) = \frac{2a_2}{a_1 + 2a_2t_n} + \frac{2b_2}{b_1 + 2b_2t_n} - \frac{1}{nf} \sum_{j=1}^{nf} \left[\frac{2a_2}{a_1 + 2a_2t_j} + \frac{2b_2}{b_1 + 2b_2t_j} \right].$$

По аналогии с системой (4) для определения коэффициентов аппроксимационного полинома получаем:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial a_i} = 0, & i = 0, 1, \dots, np; \\ \frac{\partial E}{\partial b_i} = 0, & i = 0, 1, \dots, np; \\ g_\lambda(a_1, a_2, b_1, b_2) = 0. \end{cases}$$

Полученная система содержит $2(np + 1) + 1$ уравнение с $2(np + 1) + 1$ неизвестными $a(i), b(i), (i = 0, 1, \dots, np)$ и λ , однако уже не является линейной относительно неизвестных (из-за наличия нелинейной функции g).

Численные эксперименты по оценке предложенных алгоритмов проводились на основе серий последовательных спутниковых снимков геостационарного европейского спутника Meteosat в инфракрасном и видимом диапазонах длин волн с дискретизацией

по времени 30 мин. Каждая серия содержала не менее 6 снимков заданного района. Для оценки точности СКП имеющийся в серии набор данных делился на две части — зависимый и независимый ансамбли. По первой части рассчитывались параметры математических моделей, описывающих временную эволюцию атмосферных фронтов. По второй части с использованием ранее полученных параметров моделей производилась оценка точности того или иного метода СКП. Для такой оценки рассчитывалось положение фронта для моментов времени, соответствующих данным из независимого ансамбля и вычислялись статистические характеристики отклонения координат прогностического фронта от фактического. Кроме того, осуществлялось сравнение аналогичных характеристик с результатами инерционного прогноза.

Аппроксимации траектории движения фронта

На первом этапе оценивания точности аппроксимации траектории движения общих точек фронта исследовалась корректность (в классическом смысле) решаемой задачи. Известно, что устойчивость решения возникающей при определении коэффициентов аппроксимационного полинома системы линейных алгебраических уравнений определяется числом обусловленности r ее матрицы

$$r = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}},$$

где λ_{\max} и λ_{\min} — соответственно максимальное и минимальное собственные числа матрицы системы. При $r \gg 1$ матрица называется плохообусловленной и в этом случае небольшие погрешности в задании исходных данных могут приводить к значительным погрешностям в решении.

Как показали результаты численных экспериментов для созданных серий данных, обусловленность решаемых систем (для полиномов второй и третьей степеней) колеблется от 10^6 до 10^9 , что однозначно указывает на их плохую обусловленность. Следовательно, уже этот предварительный этап исследований указал на возможность получения значительных погрешностей при выполнении как аппроксимации, так и экстраполяции (прогноза) из-за наличия вычислительной неустойчивости. Последнее делает целесообразным при выполнении СКП применять специальные численные методы решения, либо осуществить регуляризацию данной задачи на основе использования априорной информации (статистическая регуляризация) или информации о характере искомого решения (регуляризация по Тихонову) [4]. Кроме того, для повышения вычислительной устойчивости задачи следует рассмотреть возможность применения предварительного сглаживания данных, масштабирования и т.д.

На втором этапе с использованием всего имеющегося ансамбля данных оценивалась точность аппроксимации в зависимости от алгоритма аппроксимации и схемы сглаживания экспериментальных данных. При этом для каждого метода варьировались: степень полинома (от 1 до 4) и схема сглаживания (при $psg = 0$ сглаживание не применялось, при $psg = 3$ сглаживание осуществлялось по трем точкам, при $psg = 5$ — по пяти точкам) [5].

Характерные результаты, полученные в ходе проведения указанной серии численных экспериментов, представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 1–4.

В табл. 1 в качестве примера приведены значения средних ошибок аппроксимации общих точек фронтов окклюзии при использовании классического метода наименьших квадратов с масштабированием временной координаты, которое выполнялось по формуле:

$$t' = \frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}},$$

где t_{\min} и t_{\max} — минимальное и максимальное время снятия данных о положении фронта в серии, t и t' — истинное и рассчитанное время соответственно.

Для представленных здесь данных использовался полином первой степени, число общих точек для всех фронтов равнялось пяти, осуществлялось предварительное сглаживание координат по трем точкам.

Таблица 1

Ошибки аппроксимации полиномом I степени общих точек фронта окклюзии

Номер серии	Число фронтов в серии (n/g)	Средняя ошибка, км	σ , км
1	18	6,0	4,54
2	8	1,0	0,75
3	11	2,9	2,21
4	12	1,3	0,81
5	5	4,7	3,58
6	7	1,6	1,34
7	11	4,1	2,52
8	8	3,3	1,82
9	4	2,5	2,25

Аналогичные данные, но при использовании полиномов первой, второй и третьей степеней представлены на рис. 1–3 для фронтов трех типов: холодных, теплых и окклюзии.

Данные табл. 2 иллюстрируют влияние величины параметра p в формуле (2) на точность аппроксимации (значение $p = 0$ соответствует классическому методу наименьших квадратов). Полученные значения ошибок однозначно свидетельствуют о нецелесообразности использования этого подхода для аппроксимации траекторий общих точек атмосферных фронтов — добавление этого условия только увеличивает ошибки аппроксимации по сравнению с классическим методом наименьших квадратов.

В ходе проведения численных экспериментов для метода наименьших квадратов с заданием дополнительного условия: времени «останова» фронта (задаваемого с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа), был получен аналогичный вывод о нецелесообразности использования и этого подхода для расчета параметров аппроксимационных моделей по данным из зависимого ансамбля.



Рис. 1. Ошибки аппроксимации общих точек холодного фронта



Рис. 2. Ошибки аппроксимации общих точек теплого фронта

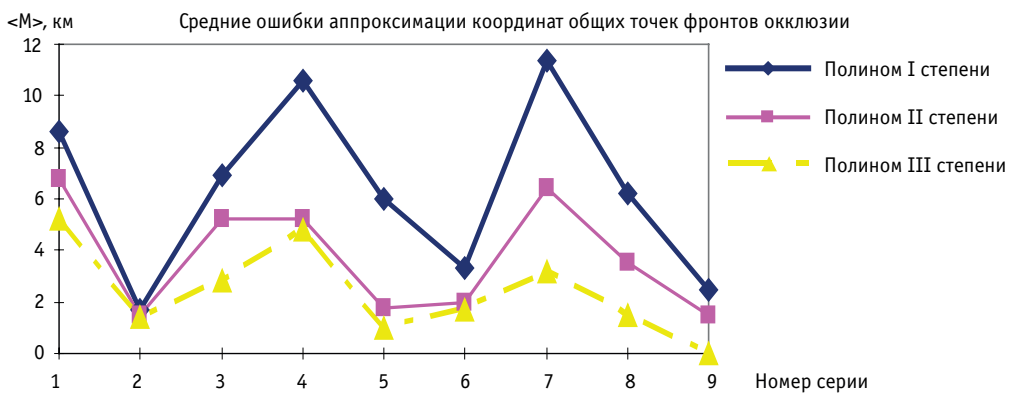


Рис. 3. Ошибки аппроксимации общих точек фронта окклюзии

Таблица 2

Зависимость ошибки аппроксимации от параметра p в формулах (2)

p	Средняя ошибка для фронтов окклюзии $\langle M \rangle_{ок.}$, [км]	Средняя ошибка для теплых фронтов $\langle M \rangle_{теп.}$, [км]	Средняя ошибка для холодных фронтов $\langle M \rangle_{хол.}$, [км]
0,0	2,5	1,4	2,5
0,05	3,3	2,6	3,3
0,1	4,1	3,9	4,2
0,15	4,9	5,1	5,1
0,2	5,6	6,2	6,0
0,25	6,4	7,1	6,8
0,3	7,0	7,9	7,5

Рис. 4 иллюстрирует влияние числа общих точек на точность аппроксимации положения холодного фронта. Представленные на нем средние ошибки получены при использовании полиномов первой степени при 5, 15 и 45 общих точках. Обращает на себя внимание тот факт, что с ростом числа общих точек наблюдается и рост ошибок аппроксимации. Однако при небольшом их числе резко снижается точность описания конфигурации самого фронта. В качестве разумного компромисса в этом случае значение параметра $nn = 15$ можно считать оптимальным.



Рис. 4. Ошибки аппроксимации координат холодного фронта при различном количестве общих точек

Как следует из анализа всей совокупности полученных в ходе проведения численных экспериментов данных, наилучшие результаты дает совместное применение процедуры сглаживания исходных данных с классическим подходом к построению аппроксимационных полиномов с масштабированием. При этом оптимальной оказывается третья степень полинома при сглаживании координат по пяти значениям общих точек атмосферного фронта. Средняя ошибка анализа положения фронтов в этом случае составила от 1,2 до 1,9 км (соответственно для 5 и 15 общих точек в каждом

фронте). В случае отсутствия предварительного сглаживания координат ошибка аппроксимации увеличивается в 1,5–2 раза. В зависимости от типа фронта в среднем меньшая ошибка наблюдается для теплых фронтов, большая — для фронта окклюзии.

Сверхкраткосрочный прогноз траектории движения фронта

Анализ результатов сверхкраткосрочного прогноза эволюции атмосферных фронтов показал следующее:

1. Все из использованных математических моделей СКП (за исключением классического МНК без масштабирования и сглаживания исходных данных из зависимого ансамбля) практически во всех случаях позволили повысить точность задания положения фронта по сравнению с инерционным прогнозом при заблаговременности до 3 ч.

2. Применение классического МНК дает неустойчивые результаты, что в ряде случаев приводит к большим погрешностям. Это происходит, в частности, из-за плохой обусловленности решаемой в этом случае системы линейных алгебраических уравнений: число обусловленности системы достигает значений 10^9 . Кроме того, использование классической схемы МНК завышает скорость движения фронта по сравнению с данными синоптического анализа.

3. Наиболее оптимальные результаты дает использование следующих методов: метода адаптивной фильтрации временных рядов и метода наименьших квадратов с совместной минимизацией суммы квадратов отклонений координат общих точек от их аппроксимационных значений и суммы квадратов скоростей движения общих точек фронта при использовании масштабирования временной координаты и предварительного сглаживания координат по трем точкам. Были найдены и оптимальные значения параметра p в формуле (2), которые зависят от степени используемого в этом случае аппроксимационного полинома. Для полиномов первой степени $p_{\text{опт}} = 0,05 \text{ ч}^2$, для полиномов второй степени $p_{\text{опт}} = 0,05 \text{ ч}^2$, для полиномов третьей степени $p_{\text{опт}} = 0,05\text{--}0,15 \text{ ч}^2$.

Рис. 5 иллюстрирует значения погрешности СКП на 0,5 ч при использовании метода адаптивной фильтрации для нескольких серий холодных фронтов. Расчеты проводились с фильтром первого порядка, в каждом зависимом ансамбле содержалось по 3 фронта, число общих точек для каждого фронта равнялось 5. Здесь можно заметить значительный разброс ошибок СКП для разных серий данных, при этом средняя ошибка СКП составляет около 8 км. Полученные результаты можно сравнить с представленными здесь же данными инерционного прогноза.

На рис. 6 представлены средние ошибки СКП в зависимости от значения параметра p . Прогноз осуществлялся на 0,5 ч по 5 положениям фронта (общее время наблюдения для создания зависимого ансамбля в этом случае составило 2,5 ч) с использованием аппроксимационных полиномов второй степени без предварительного сглаживания пространственных координат в зависимом ансамбле, но с использованием масштабирования временной координаты. На представленном графике четко прослеживается характер изменения средней ошибки СКП в зависимости от значения параметра p и видна его оптимальная величина: $0,05 \text{ ч}^2$. Наименьшая средняя ошибка СКП наблюдается в этом случае для теплых фронтов, наибольшая — для фронтов окклюзии.

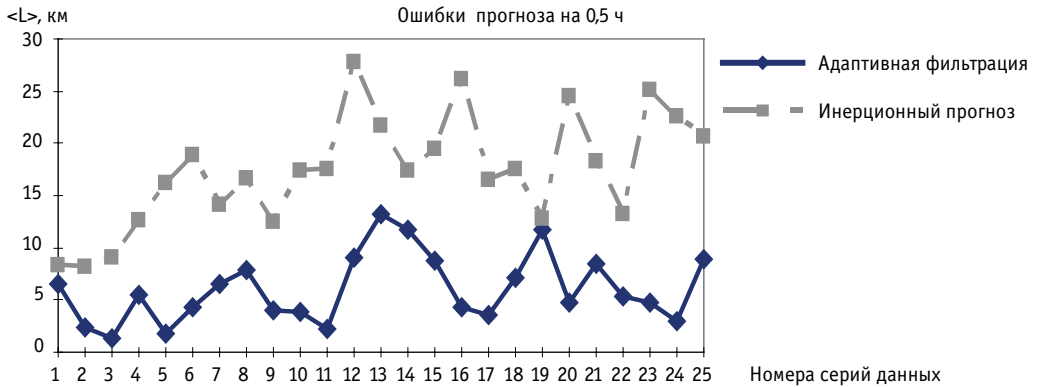


Рис. 5. Ошибки СКП координат холодных фронтов

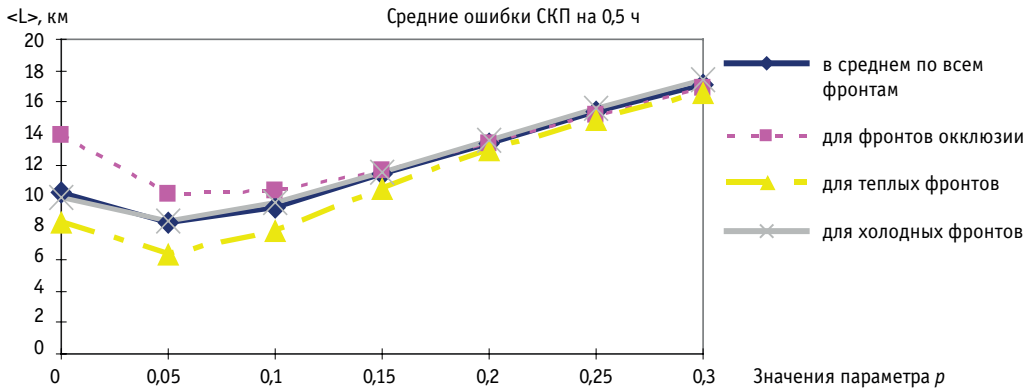


Рис. 6. Зависимость средних ошибок СКП от значения параметра p

Рис. 7 иллюстрирует влияние процедуры предварительного сглаживания координат общих точек зависимого ансамбля данных о положении фронта в различные моменты времени на точность СКП для различных значений параметра p . Представлены средние для всех типов фронтов ошибки СКП. Так же, как и для рис. 6, прогноз осуществлялся на 0,5 ч по 5 положениям фронта в зависимом ансамбле с использованием аппроксимационных полиномов второй степени без предварительного сглаживания пространственных координат в зависимом ансамбле, но с масштабированием временной координаты. Этот рисунок показывает, что чрезмерное сглаживание (ряд 3 — сглаживание по 5 точкам) может приводить к заметному росту ошибок СКП. И хотя в данном случае ошибки СКП без сглаживания и со сглаживанием по 3 точкам дают практически одинаковую погрешность, анализ всех полученных данных показывает, что сглаживание по 3 точкам позволяет уменьшить среднюю ошибку СКП.

Рис. 8 иллюстрирует влияние степени аппроксимационных полиномов на среднюю ошибку СКП. Расчеты проводились при использовании метода наименьших квадратов с совместной минимизацией суммы квадратов отклонений координат общих точек от их аппроксимационных значений и суммы квадратов скоростей движения общих точек фронта. Для всех типов атмосферных фронтов СКП проводился по 5 положениям фронта в зависимом ансамбле с использованием аппроксимационных полиномов второй степени с масштабированием временной координаты. Предварительное сглаживание пространственных координат в зависимом ансамбле осуществлялось по 3 точкам. Из анализа представленных данных следует, что использование полиномов первой и второй степеней дает практически одинаковые результаты, причем для них совпадают и оптимальные значения параметра p . Применение полиномов третьей степени для проведения СКП приводит к заметному росту средних ошибок прогноза. Кроме того, в этом случае изменяется и оптимальное значение параметра p , которое в данном случае равняется $0,15 \text{ ч}^2$.

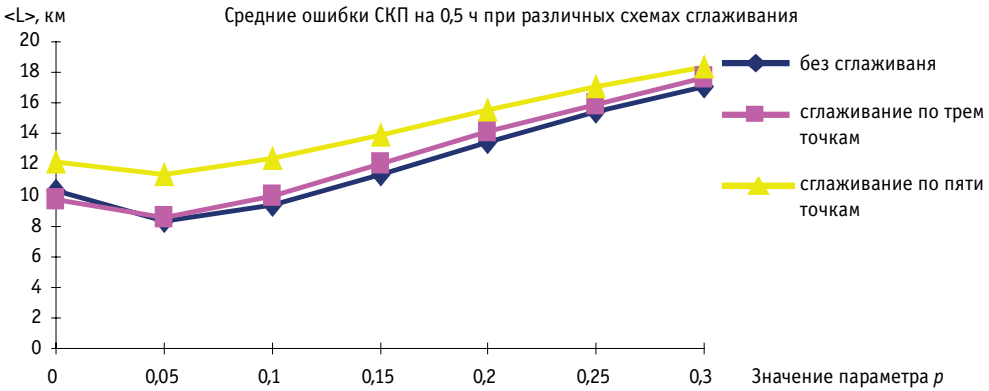


Рис. 7. Влияние процедуры сглаживания координат общих точек фронта на точность СКП

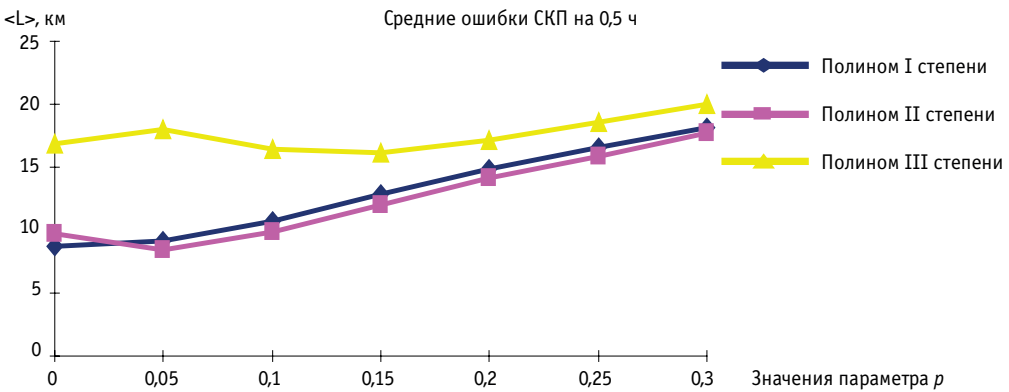


Рис. 8. Влияние степени аппроксимационного полинома на точность СКП

4. Рис. 9 и 10 иллюстрируют результаты использования метода наименьших квадратов с заданием дополнительно времени «останова» движения фронта с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа. На рис. 9 приведены ошибки СКП на 0,5 ч для холодных фронтов при использовании аппроксимационных полиномов второй степени. Ряд 1 соответствует «останову» фронта на момент прогноза ($t_0 = 0$ ч), ряд 2 — «останов» фронта должен произойти через 4 ч после наступления момента прогноза, ряд 3 — через 8 ч и ряд 4 — через 48 ч. На рисунке четко прослеживается влияние параметра t_0 на величину ошибки СКП: она достаточно велика для $t_0 = 0$ и плавно уменьшается с ростом значения t_0 вплоть до значения 8 ч и далее практически не меняется. Достаточно резкое увеличение ошибок прогноза для серий номер 13, 20 и 24 связано с вычислительной неустойчивостью решаемой задачи.

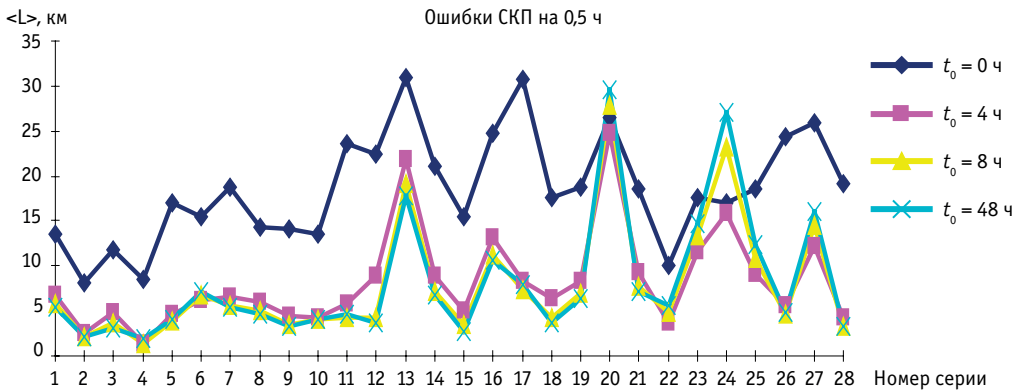


Рис. 9. Влияние условия времени «останова» на ошибки СКП положения фронта



Рис. 10. Прогностические значения скорости фронта в зависимости от условия времени «останова»

На рис. 10 представлены прогностические значения средней скорости перемещения фронта в зависимости от значения параметра t_0 в формуле (5): ряд 1 — $t_0 = 0$ ч, ряд 2 — $t_0 = 4$ ч, ряд 3 — $t_0 = 8$ ч и ряд 4 — $t_0 = 48$ ч. Наглядно видны резкое занижение скорости перемещения фронта при 0 часов и достаточно сложная зависимость получаемой в этом случае скорости от значения параметра t_0 . Последнее указывает на невозможность использования этого метода для СКП скорости перемещения фронта.

5. Средние ошибки СКП положения фронта зависят от заблаговременности прогноза и мало варьируют в зависимости от типа фронта. При заблаговременности в 0,5–1,5 ч средняя погрешность определения положения общих точек фронта составляет около 12 км при использовании 5 общих точек при задании положения фронта. Указанная погрешность методических прогнозов в среднем в 2–2,5 раза меньше той, которую дает в этом случае инерционный прогноз.

Влияние заблаговременности прогноза на среднюю точность СКП при использовании метода наименьших квадратов с совместной минимизацией суммы квадратов отклонений координат общих точек от их аппроксимационных значений и суммы квадратов скоростей движения общих точек фронта иллюстрируют кривые, представленные на рис. 11. Эти данные получены по 5 положениям фронта с использованием аппроксимационных полиномов второй степени с масштабированием временной координаты. Предварительное сглаживание пространственных координат в зависимом ансамбле осуществлялось по 3 точкам. Ряд 1 показывает изменение средней ошибки СКП на 0,5 ч в зависимости от значения параметра p для фронтов всех типов, ряд 2 — при СКП на 1 ч, ряд 3 — на 1,5 ч, ряд 4 — на 2 ч. Наблюдается практически линейный рост средних ошибок СКП с увеличением заблаговременности. При этом оптимальное значение параметра p остается неизменным.

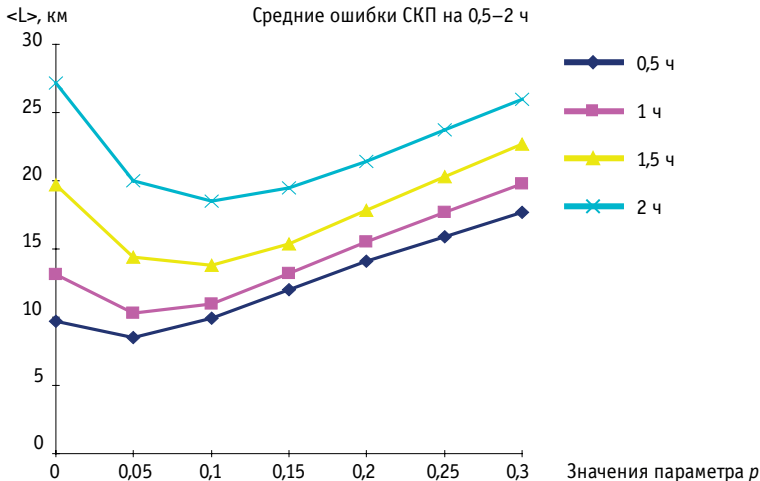


Рис. 11. Влияние заблаговременности прогноза на точность СКП

Приведенные данные достаточно убедительно свидетельствуют о том, что предложенный в данной работе подход позволяет аппроксимировать изменение положения фронта во времени с приемлемой для практического использования точностью.

Литература

1. *Алдошкина Е.С., Кузнецов А.Д., Пугачев А.А., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Чукин В.В.* Опыт использования аппарата нейронных сетей для анализа и прогноза временного ряда температуры воздуха. // Учёные записки РГГМУ, 2009, № 11, с. 91–100.
2. *Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.* Модели анализа и прогноза эволюции атмосферных фронтов. // Вестник ТвГУ, Сер. «Прикладная математика», 2015, № 1, с. 67–81.
3. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1974. — 831 с.
4. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1986. — 287 с.
5. *Дьяконов В.П.* Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. — М.: Наука, 1987. — 240 с.