

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ
РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТИВНОГО АНАЛИЗА
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

Л.А. Есауленко
Доктор техн. наук И.З. Лутфулин

В модели осуществляется проверка репрезентативности данных всех пунктов зондирования атмосферы и расчёты значений метеовеличин в узлах сеточной области, с учётом возможных их отклонений под влиянием орографии, подстилающей поверхности, вертикальных токов и случайных ошибок.

Как известно, для расчётов по прогностическим моделям атмосферы необходимо иметь значения метеорологических величин в узлах регулярной сетки точек в один (начальный) момент времени [2]. В мировой практике используется целый ряд методов численного анализа метеовеличин [4, 6, 7, 8]. В последние годы были разработаны новые версии оперативных региональных схем для центра Европы [1] и сибирского региона [5]. В отличие от метода полиномиальной интерполяции, впервые предложенного Х.А. Пановским, наиболее часто используется метод оптимальной интерполяции, разработанный Л.С. Гандиным [3].

Сопоставление значений метеовеличин, измеренных в пунктах зондирования атмосферы и полученных для этих же пунктов по способу оптимальной интерполяции, показывает значительное их расхождение, достигающее иногда 10 гПа по геопотенциалу, 8 °С по температуре и дефициту точки росы. Как известно [2], в основе этого способа лежит гипотеза, что метеовеличины измеряются с определенной ошибкой, и истинное их значение можно получить путем математической обработки. Теперь, когда метод радиозондирования достиг высокой степени точности, и на картах барической топографии данные подавляющего большинства пунктов зондирования атмосферы согласуются между собой, измеренные параметры атмосферы можно рассматривать как истинные значения метеовеличин. Нет надобности подвергать их площадному осреднению. Поэтому в предлагаемой региональной модели объективного анализа предусмотрены только три основных этапа. На первом этапе осуществляется присвоение данных любого пункта зонди-

рования атмосферы одному из узлов подсеточной области, для чего выбраны шаги мелкомасштабной сеточной области (S_x, S_y) небольших размеров. На втором этапе производится проверка репрезентативности данных всех пунктов зондирования атмосферы, участвующих в объективном анализе метеовеличин, исправление ошибочных данных или их браковка. Третий этап включает расчет значений метеовеличин в узлах сеточной области по данным пунктов зондирования атмосферы и результатов численного прогноза на 12-24 часа. Переход от старой модели к новой вызван необходимостью получения детализированных метеорологических полей за исходный срок прогноза для уточнения прогноза барического поля, формирования циклонов и антициклонов, их эволюции и перемещения, для прогноза перемещения атмосферных фронтов, прогноза упорядоченных вертикальных потоков и обложных осадков на территории Казахстана по новой модели, предложенной для разработки И.З. Лутфулиным. Перечислим характерные особенности и этапы развития этой модели.

1. Телеграммные данные пунктов зондирования атмосферы присваиваются ближайшему узлу мелкомасштабной сеточной области.

2. Область объективного анализа метеорологических полей и гидродинамического прогноза охватывает зону от 75° до 25° северной широты и от 10° западной долготы до 100° восточной. Для аналитического описания метеополей эта область разбивается на $11 \cdot 5 = 55$ фигур типа трапеций, основанием которых являются широтные круги φ и $\varphi + 10^{\circ}$, а боковыми гранями - меридианы λ и $\lambda + 10^{\circ}$. В каждую трапецию входят 9 узлов крупномасштабной сеточной области и $7 \cdot 11 = 77$ узлов мелкомасштабной, 9 из которых совпадают с узлами крупномасштабной области. Шаг мелкомасштабной сеточной области вдоль меридиана принят постоянным для всей области трапеции, $S_y = 111,2$ км, что соответствует отрезку в 1° вдоль меридиана. Вдоль оси ОХ он принят постоянным для широтного круга, $S = F(\varphi)$. Число пунктов зондирования атмосферы в трапециях разное, от 15 до 0. Поэтому расчет значений метеовеличин в узлах мелкомасштабной области для каждой трапеции ведется с привлечением разного количества пунктов зондирования атмосферы.

3. Расчет значений метеовеличин для узлов мелкомасштабной сеточной области с использованием исключительно данных пунктов зондирования атмосферы выполняется только для одной трапеции, в пределах которой число пунктов зондирования атмосферы максимальное - 15. Расчеты для всех остальных трапеций выполняются с использованием не только данных пунктов зондирования атмосферы, но и значений метеовеличин в узлах этой области одной или двух соседних трапеций, для которых расчёты уже выполнены. При выборе последовательности расчётов учитывается также, что в каждой рассматриваемой широтной ($\Delta\varphi = 10^{\circ}$) и меридианальной ($\Delta\lambda = 10^{\circ}$) зоне содержится трапеция, где количество пунктов зондирования атмосферы больше, чем в области

других трапеций этих зон. Нахождение значений метеовеличин в узлах мелкомасштабной сеточной области в любой зоне целесообразно начинать именно с трапеций с максимальным количеством пунктов зондирования атмосферы (в каждой зоне их может быть несколько), затем переходить к расчётам в соседних трапециях.

4. В ходе вычисления значений метеовеличин для узлов мелкомасштабной области одновременно выполняется контроль репрезентативности (достоверности) данных пунктов зондирования атмосферы, привлекаемых к расчетам для рассматриваемой трапеции. Такой контроль завершается или проверкой согласованности данных пунктов зондирования атмосферы, или исправлением ошибочных данных.

5. В пределах одной трапеции ($\Delta\varphi = \Delta\lambda = 10^0$) поля метеовеличин на любом уровне $H = \text{const}$ вполне удовлетворительно описывает аналитически полином третьего порядка

$$H(x,y) = H_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + b_1 y + b_2 y^2 + b_3 y^3 + c_1 xy + c_2 x^2 y + c_3 xy^2, \quad (1)$$

где H_0 - значение метеоэлемента в центральном узле рассматриваемой трапеции, который принимается за начало координат системы XOY ; $H(x, y)$ - значение метеоэлемента в произвольной точке трапеции с координатами (x, y) . Для расчета коэффициентов полинома

$$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$$

и его свободного члена H_0 уравнение(1) записывается для 10 пунктов (узлов) с известными значениями метеовеличин

$$H(x_1 y_1), H(x_2 y_2), H(x_3 y_3), H(x_4 y_4), \dots, H(x_{10} y_{10}) \quad (2)$$

и известными координатами

$$x_1 y_1, x_2 y_2, x_3 y_3, x_4 y_4, \dots, x_{10} y_{10} \quad (3)$$

в координатной системе XOY .

После такой записи получаем 10 алгебраических уравнений первого порядка с 10 искомыми величинами коэффициентов полинома (1) и свободным членом H_0 . Для решения подобной системы имеются стандартные программы ЭВМ. В качестве исходных 10 пунктов используются не только пункты зондирования атмосферы, но и узлы мелкомасштабной сеточной области одной-двух соседних трапеций. Координаты этих пунктов зондирования атмосферы и узлов должны быть заранее рассчитаны в долях 1^0 широты ($S_y = 111,2$ км) и храниться постоянно в памяти ЭВМ. На случай отсутствия информации какого-либо пункта зондирования атмосферы должно быть предусмотрено привлечение данных одного из узлов этой области соседней трапеции

для того, чтобы поиск коэффициентов полинома (1) и H_0 всегда проводился, используя данные 10 пунктов.

6. После того, как вычислены коэффициенты полинома (1) и H_0 , он становится уравнением для расчёта значений метеовеличин в любой точке рассматриваемой трапеции, в том числе в узлах мелкомасштабной сеточной области. Чтобы получить значение метеовеличины в любом узле, достаточно подставить в правую часть (1) координаты (x) и (y) этого узла, тогда правая часть формулы (1) превращается в конкретное число, равное значению $H(x, y)$ в этом узле. Если вместо (x,y) подставим координаты пункта зондирования атмосферы, то получим значение $H(x, y)$, содержащееся в аэрологической телеграмме этого пункта, независимо от его репрезентативности.

7. Следующим этапом является расчет коэффициентов полинома (1) и H_0 для той же трапеции, заменив данные первого участвовавшего в предыдущем расчёте пункта зондирования атмосферы на данные нового пункта, еще не участвовавшего в расчётах, но запланированного при окончательном выборе коэффициентов полинома (1) и H_0 . Аналогичная операция замены данных участвовавшего в расчётах пункта зондирования атмосферы на данные нового проводится столько раз, сколько было запланировано привлечь пунктов зондирования атмосферы для рассматриваемой трапеции - N . В число N входят также случаи, когда вместо данных отсутствующего пункта зондирования атмосферы были введены значения в узлах мелкомасштабной сеточной области соседних трапеций, согласно п.5 (в модели принято $N \geq 6$).

В результате выполнения п.7 получим N вариантов расчета коэффициентов полинома (1) и H_0

$$\begin{aligned} & (a_1, a_2, \dots, c_2, c_3, H_0)_1, \\ & (a_1, a_2, \dots, c_2, c_3, H_0)_2, \\ & \dots\dots\dots \\ & (a_1, a_2, \dots, c_2, c_3, H_0)_N, \end{aligned} \quad (4)$$

и появляется возможность контроля репрезентативности данных всех пунктов зондирования атмосферы, привлекаемых для описания поля геопотенциала H в пределах рассматриваемой трапеции.

8. Следующим этапом является расчёт средних значений коэффициентов полинома (1) и H_0 по формулам

$$\begin{aligned} \bar{a}_1 &= 1/N \sum_{i=1}^n (a_1)_i; \quad \bar{a}_2 = 1/N \sum_{i=1}^n (a_2)_i; \quad \bar{a}_3 = 1/N \sum_{i=1}^n (a_3)_i; \\ \bar{b}_1 &= 1/N \sum_{i=1}^n (b_1)_i; \quad \bar{b}_2 = 1/N \sum_{i=1}^n (b_2)_i; \quad \bar{b}_3 = 1/N \sum_{i=1}^n (b_3)_i; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\bar{c}_1 = 1/N \sum_{i=1}^n (c_1)_i; \bar{c}_2 = 1/N \sum_{i=1}^n (c_2)_i; \bar{c}_3 = 1/N \sum_{i=1}^n (c_3)_i.$$

$$\bar{H}_0 = 1/N \sum_{i=1}^n (H_0)_i. \quad (6)$$

9. Затем для каждого варианта счёта вычисляются параметры, характеризующие отклонение коэффициентов полинома (1) и H_0 от своего среднего значения

$$\begin{aligned} (\Delta a_1)_i &= (a_1)_i - \bar{a}_1; (\Delta a_2)_i = (a_2)_i - \bar{a}_2; (\Delta a_3)_i = (a_3)_i - \bar{a}_3; \\ (\Delta b_1)_i &= (b_1)_i - \bar{b}_1; (\Delta b_2)_i = (b_2)_i - \bar{b}_2; (\Delta b_3)_i = (b_3)_i - \bar{b}_3; \\ (\Delta c_1)_i &= (c_1)_i - \bar{c}_1; (\Delta c_2)_i = (c_2)_i - \bar{c}_2; (\Delta c_3)_i = (c_3)_i - \bar{c}_3. \end{aligned} \quad (7)$$

$$(\Delta H_0)_i = (H_0)_i - \bar{H}_0. \quad (8)$$

10. Репрезентативными считаются данные тех пунктов зондирования атмосферы, для которых выполняются условия

$$\begin{aligned} |(\Delta a_1)_i| &\leq 0,1 |\bar{a}_1|; |(\Delta a_2)_i| \leq 0,1 |\bar{a}_2|; |(\Delta a_3)_i| \leq 0,1 |\bar{a}_3|; \\ |(\Delta b_1)_i| &\leq 0,1 |\bar{b}_1|; |(\Delta b_2)_i| \leq 0,1 |\bar{b}_2|; |(\Delta b_3)_i| \leq 0,1 |\bar{b}_3|; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} |(\Delta c_1)_i| &\leq 0,1 |\bar{c}_1|; |(\Delta c_2)_i| \leq 0,1 |\bar{c}_2|; |(\Delta c_3)_i| \leq 0,1 |\bar{c}_3|; \\ |(\Delta H_0)_i| &\leq 0,003 |\bar{H}_0|. \end{aligned} \quad (10)$$

В среднем, репрезентативными являются 90-95 % всех значений метеовеличин, содержащихся в аэрологических телеграммах.

11. Следующим этапом является расчёт средних значений коэффициентов

$$a'_1, a'_2, a'_3, b'_1, b'_2, b'_3, c'_1, c'_2, c'_3, H'_0 \quad (11)$$

с учетом данных только репрезентативных пунктов зондирования атмосферы, для которых условия (9)-(10) выполняются. Если для рассматриваемой трапеции число привлекаемых нерепрезентативных пунктов

зондирования атмосферы равно n , то значения новых коэффициентов (11) вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}
 a'_1 &= 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (a_1)_i; & a'_2 &= 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (a_2)_i; & a'_3 &= 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (a_3)_i; \\
 b'_1 &= 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (b_1)_i; & b'_2 &= 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (b_2)_i; & b'_3 &= 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (b_3)_i;
 \end{aligned} \quad (12)$$

$$c'_1 = 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (c_1)_i; \quad c'_2 = 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (c_2)_i; \quad c'_3 = 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (c_3)_i.$$

$$H'_0 = 1/N-n \sum_{i=1}^{N-n} (H_0)_i. \quad (13)$$

Таким образом, принимается, что поле $H(x, y)$ в пределах рассматриваемой трапеции описывается полиномом

$$H(x, y) = H'_0 + a'_1 x + a'_2 x^2 + a'_3 x^3 + b'_1 x + b'_2 x^2 + b'_3 x^3 + c'_1 x + c'_2 x^2 + c'_3 x^3. \quad (14)$$

12. Если в правую часть такого полинома подставим координаты (x, y) нерепрезентативного пункта зондирования атмосферы, то получим расчетное значение $H(x, y)$ взамен телеграммной величины H пункта зондирования атмосферы, по которым можно вычислять разность

$$\Delta H = H_{\text{пзл}} - H(x, y). \quad (15)$$

В нашей модели ΔH рассматривается как сумма четырех слагаемых

$$\Delta H = \Delta H_{\text{сл}} + \Delta H_{\text{ор}} + \Delta H_{\text{пп}} + \Delta H_w, \quad (16)$$

где $\Delta H_{\text{сл}}$ является случайной ошибкой, неисправляемой путем расчетов по (14), а $\Delta H_{\text{ор}}$, $\Delta H_{\text{пп}}$, ΔH_w рассматриваются как результат систематического отклонения значения H в пунктах зондирования атмосферы и узлах мелкомасштабной сеточной области под влиянием орографии, неоднородности подстилающей поверхности, наличии восходящих потоков в одних районах, нисходящих - в других. Так, например, если зимой над теплым Каспийским морем наблюдались слабые потоки, то для узлов мелкомасштабной сеточной области рассчитывается суточное приращение влагосодержания воздуха, виртуальной температуры и

толщины слоя 1000 - 700 гПа, а затем и высоты этих изоповерхностей для исходного срока прогноза. Вообще уравнения для расчета $\Delta H_{ор}$, $\Delta H_{пп}$, ΔH_w можно получить на основе системного анализа величины ΔH результатов суточного прогноза метеорологических полей.

13. Заключительным этапом объективного анализа метеополей для рассматриваемой трапеции является расчет значений $H(x, y)$ для узлов мелкомасштабной сеточной области, используя уравнение (14). Но для этого надо знать координаты (x, y) каждого узла в системе XOY . Трапеция выглядит следующим образом. Центр трапеции принят за начало координат O , ось OX направлена вдоль широтного круга $\varphi_0 = \text{const}$, а ось OY - вдоль меридиана $\lambda_0 = \text{const}$. Шаг вдоль меридиана принят постоянным для всей области трапеции $S_y = 111,2$ км, что соответствует отрезку в 1° вдоль меридиана. Шаг S_x вдоль оси OX принят постоянным для широтного круга, но уменьшается от экватора к полюсам. На любой широте его можно вычислить по формуле

$$S_x = (0,2\varphi^2 - 103\varphi + 7760) / 27. \quad (17)$$

Если в уравнении (17) вместо широты φ введем номер строки m , то приходим к уравнению

$$S_x = 0,0075m^2 + 2,685m + 403175. \quad (18)$$

В модели принято, что на самой северной широте ($\varphi = 75^\circ$) располагаются узлы первой строки мелкомасштабной сеточной области ($m = 1$), а на самой южной широте ($\varphi = 25^\circ$) - узлы 51-ой её строки ($m = 51$).

Поиск координат (x, y) узлов, входящих в рассматриваемую трапецию, следует начинать с расчёта сеточных шагов

$$Sx_1, Sx_2, Sx_3, Sx_4, Sx_5, Sx_6, Sx_7, Sx_8, Sx_9, Sx_{10}, Sx_{11} \quad (19)$$

для всех 11 строк трапеции по формуле (18), затем вычислять нормированные их значения

$$\begin{aligned} d_1 &= Sx_1 / Sy, \\ d_2 &= Sx_2 / Sy, \\ d_3 &= Sx_3 / Sy, \\ d_4 &= Sx_4 / Sy, \\ d_5 &= Sx_5 / Sy, \\ d_6 &= Sx_6 / Sy, \\ d_7 &= Sx_7 / Sy, \\ &\dots\dots\dots \\ d_{11} &= Sx_{11} / Sy, \end{aligned} \quad (20)$$

после чего сеточные шаги (19) по широтным кругам будут выражены в долях постоянного шага Sy вдоль меридиана. Теперь координаты (x, y) любого узла мелкомасштабной сеточной области могут быть вычислены в долях Sy в системе XOY . После этого координаты (x, y) $78^{м}$ узлов рассматриваемой трапеции подставляются в правую часть уравнения (14) и становятся известными значения $H(x, y)$. На этом объективный анализ метеорологического поля $H(x, y)$ в пределах рассматриваемой трапеции заканчивается, и переходим к повторению операций 5-14 для следующей трапеции, имеющей общую грань с рассмотренной.

Такая операция повторяется для всех $11 \cdot 5 = 55$ трапеций, в результате чего будет сформирован массив поля $H(x, y)$, содержащий значения H в $n \cdot m = 67 \cdot 51$ узлах поля.

В Гидрометцентре Казахстана в 1994 году начата реализация предложенного алгоритма для равнинной северо-восточной части Казахстана, где не выражено влияние орографии на ход метеовеличин, а также наблюдается наиболее густая сеть аэрологических станций. Для юго-востока Казахстана, где расположены горные массивы, в дальнейших разработках предполагалось учесть влияние орографии. К сожалению, по объективным причинам, работа по этому, такому важному направлению была прервана. Расчет объективного анализа для территории Республики Казахстан, который отражал бы все особенности многоплановой поверхности, может позволить более точно составлять прогнозы погоды и облегчить научные разработки в области прогнозирования различных метеорологических величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багров А.Н., Гордин В.А., Цырульников М.Д. Оперативная схема объективного анализа в тропосфере и стратосфере // Метеорология и гидрология. - 1990. - N 8. - С. 37-45.
2. Белов П.Н., Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В. Численные методы анализа и прогноза погоды. - Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1991. - 82 с.
3. Гандин Л.С. Об объективном анализе метеорологических полей// Материалы совещания координационной комиссии по численным методам прогноза. - Л.: Гидрометеоиздат, 1961. - С. 20-35.
4. Машкович С.А. Схема многоэлементного трехмерного объективного анализа метеорологических величин // Тр. Гидрометцентра СССР. - 1990. - Вып. 304. - С. 3-21.
5. Ривин Г.С., Бузова З.С., Смирнова А.И. Оперативная схема численного анализа метеорологической информации для сибирского региона// Метеорология и гидрология. - 1990. - N 4. - С.42-49.
6. Dey S. H. The evolution of objective analysis methodology at the National Meteorological Center// Weather and Forecast. - 1989. - Vol.4, N 3. - P.297-312.

7. Exemples de logiciels au service de l'environnement// Recherche. - 1992. - Vol.23, N 243. - P.540-541.
8. Ihasz I. Isobaric and isentropic objective analysis of meteorological fields for regional and continental scale trajectories // Idojaras. - 1992. - Vol.96, N 2. - P.81-92.

Бюро погоды Казгидромета

Казахский Государственный Национальный
Университет им. аль-Фараби

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ АУМАҒЫНДА МЕТЕОРОЛОГИЯЛЫҚ АЛҚАПТЫ АЙМАҚТЫҚ ҮЛГІДЕ ТАЛДАУДЫҢ НЕГІЗГІ ПРИНЦИПТЕРІ

Л.А. Есауленко

Геогр. ф. докторы **И.З. Лутфулин**

Үлгіде атмосфераны зонд арқылы зерттеу пункттерінің мәліметтерінің дұрыстығы және жүйе торабындағы метеомөлшерлерді есептеуде олардың тік тоқтар, төселген айдын мен орографиялық ықпалдары мен ауытқу мүмкіншіліктері ескерілді.