

Задание: рассчитать индексы статической и динамической неустойчивости атмосферы (циркуляционные условия, показатель статической устойчивости, обобщенный показатель возможности образования возмущений конвективного характера, региональный показатель развития конвекции, фон давления и фон влажности, показатель динамической неустойчивости)

Вариант №8

1. Данные для расчетов

давление	высота	t	t_d	V	d	p_0	гПа	1011
гПа	м	°С	°С	$\frac{м}{с}$	°	p_1	гПа	1012
1011	78	24,6	17,6	5	2	p_2	гПа	1004
925	849	16,4	11,4	2	20	p_3	гПа	1009
850	1563	11,2	9,1	6	320	p_4	гПа	1004
700	3159	1,4	-3,6	4	330	$\phi = 60^\circ$		
500	5790	-13,7	-28,7	12	20			
400	7450	-25,9	-44,9	12	35			
300	9460	-41,9	-51,9	22	40	8 вариант		
250	10670	-51,1	-61,1	27	35			
200	12090	-58,1	-70,1	13	40			
Rф	75	Rк	60	Rсп	40			

Решение:

Индексы статической и динамической неустойчивости атмосферы - это параметры, используемые для определения склонности атмосферы к вертикальным движениям воздуха, которые могут привести к образованию гроз, туманов, торнадо и других погодных явлений.

Индекс динамической неустойчивости (ИДН) - это мера того, насколько атмосфера склонна к вертикальным движениям воздуха под воздействием ветра. ИДН рассчитывается по формуле:

$$\text{ИДН} = (u_2 - u_1) / h$$

где u_2 и u_1 - горизонтальные скорости ветра на двух разных высотах, h - расстояние между этими высотами.

$$\text{ИДН}_{1-2} = \frac{(2 - 5)}{849 - 78} = -0,27$$

$$\text{ИДН}_{2-3} = \frac{(6 - 2)}{1563 - 849} = 0,0056$$

$$\text{ИДН}_{3-4} = \frac{(4 - 6)}{3159 - 1563} = -0,00125$$

$$\text{ИДН}_{4-5} = \frac{(12 - 4)}{5790 - 3159} = 0,00304$$

$$\text{ИДН}_{5-6} = \frac{(12 - 12)}{7450 - 5790} = 0$$

$$\text{ИДН}_{6-7} = \frac{(22 - 12)}{9460 - 7450} = 0,0050$$

$$\text{ИДН}_{7-8} = \frac{(27 - 22)}{10670 - 9460} = 0,0041$$

$$\text{ИДН}_{8-9} = \frac{(13 - 27)}{12090 - 10670} = -0,0098$$

Значения ИДН меньше 0 указывают на устойчивую атмосферу, а значения больше 0 - на неустойчивую.

Находим уровень конденсации (LCL) путем нахождения высоты, на которой достигается точка росы при подъеме воздуха насыщенного паром до уровня давления, на котором температура становится равной температуре точки росы:

$$LCL = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{T} - \frac{55}{\ln(Td/6.11)} - \frac{1}{273.15} + 55 \right)} \right) \cdot 1000,$$

где T и Td выражены в градусах Цельсия, LCL - высота в метрах.

$$LCL = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{T} - \frac{55}{\ln\left(\frac{Td}{6,11}\right)} - \frac{1}{273,15} \right)} \right) \cdot 1000$$

$$LCL = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{24.6} - \frac{55}{\ln\left(\frac{17.6}{6,11}\right)} - \frac{1}{273,15} + 55 \right)} \right) \cdot 1000 = 318.5 \text{ м}$$

Определяем уровень неустойчивости (LFC) - высоту, на которой воздух становится неустойчивым и начинает активно подниматься вверх:

$$LFC = LCL + \Delta Z,$$

где ΔZ - изменение высоты при подъеме воздуха насыщенного паром до уровня, на котором температура становится равной температуре окружающей атмосферы.

$$LFC = 318.5 + (849 - 78) = 1088.5 \text{ м}$$

Метод средних значений

Метод средних значений заключается в том, чтобы найти средние значения давления в регионе, используя метеорологические данные за определенный период времени.

Среднее значение давления

$$P = \frac{P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{5} = \frac{1011 + 1012 + 1004 + 1009 + 1004}{5} \\ = 1008 \text{ гПа}$$

Для расчета фона давления методом средних значений используются средние значения давления, рассчитанные на основе метеорологических данных за определенный период времени.

Фон давления = 1008 гПа.

Результат расчета регионального показателя развития конвекции позволяет оценить потенциал атмосферы для развития конвективных процессов, таких как грозы, сильный дождь и т.д.

Параметр KIND оценивает степень развития конвекции, основанной на вертикальном градиенте температуры и вертикальной протяженности слоев высокой влажности:

$$KIND = (T850 - T500) + TD850 - (T700 - TD700),$$

где T700 – температура на уровне 700 гПа, °С;

TD700 – температура точки росы, на уровне 700 гПа, °С.

$$KIND = (11,2 - (-13,7)) + 9,1 - (1,4 - (-3,6)) = 29 \text{ °С.}$$

$$KIND = (T_{1011} - T_{850}) + TD_{1011} - (T_{925} - TD_{925}),$$

$$KIND = (24,6 - (11,2)) + 17,6 - (16,4 - (11,4)) = 26 \text{ °С.}$$

Так как индекс KIND принимает значения в интервале 25-30 °С, то это указывает на слабо неустойчивое состояние атмосферы.

Другим параметром, оценивающим не только статическую стабильность атмосферы, но и влажность на уровне 850 гПа (важный фактор для развития молнии в конвективных облаках), является параметр TOTL

$$TOTL = (T_{850} - T_{500}) + (TD_{850} - T_{500}),$$

где T₈₅₀ – температура на уровне 850 гПа, °С; TD₈₅₀ – температура точки росы на уровне 850 гПа, °С.

$$TOTL = (11,2 - (-13,7)) + (9,1 - (-13,7)) = 47,7$$

При значениях TOTL в интервале 45- 50 °С атмосфера неустойчива.

K_i - индекс неустойчивости

Расчет K_i основан на вертикальном градиенте температуры, влажности воздуха в нижней тропосфере, а также учитывает вертикальную протяженность влажного слоя воздуха. K_i характеризует степень конвективной неустойчивости воздушной массы, которая необходима для возникновения и развития гроз. Рассчитывается по формуле:

$$K_i = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - T_{d700}$$

где: K_i — индекс неустойчивости (число Вайтинга),

T₈₅₀ — температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа,

T₅₀₀ — температура воздуха на 500 гПа,

T_{d850} — температура точки росы на 850 гПа,

ΔT_{d700} — дефицит точки росы (T-T_d) на поверхности 700 гПа.

$$K_i = 11,2 - (-13,7) + 9,1 - (-3,6) = 37,6$$

$$35 < K_i \leq 40$$

Многочисленные грозы.

V_T — Vertical Totals индекс

V_T - индекс рассчитывается по формуле:

$$V_T = T_{1011} - T_{925} = 24,6 - (16,4) = 8,2$$

$$V_T = T_{850} - T_{700} = 11,2 - (1,4) = 9,8$$

$$V_T = T_{500} - T_{400} = -13,7 - (-25,9) = 12,2$$

$$V_T = T_{300} - T_{250} = -41,9 - (-51,1) = 9,2$$

где T_{850} — температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа,

T_{500} — температура воздуха на 500 гПа.

Так как на всех слоях $V_T < 28$, следовательно, тропосфера обладает низким потенциалом конвективной неустойчивости, не достаточным для образования гроз.

CT - Cross Totals индекс

Индекс CT рассчитывается по формуле:

$$C_T = T_{d1011} - T_{925} = 17,6 - (16,4) = 1,2$$

$$C_T = T_{d850} - T_{500} = 9,1 - (-13,7) = 22,8$$

Наблюдается энергия неустойчивости, при которой возможны сильные грозы.

TT — Total Totals индекс

Индекс (TT) представляет собой статическую устойчивость и определяется как вертикальный градиент температуры в слое 1011—925 гПа с учетом точки росы на уровне 1011 гПа:

$$T_T = T_{1011} + T_{d1011} - 2 \cdot T_{925} = 24,6 + 17,6 - 2 \cdot 16,4 = 9,4$$

в слое 925-850 гПа

$$T_T = T_{925} + T_{d925} - 2 \cdot T_{850} = 16,4 + 11,4 - 2 \cdot 11,2 = 5,4$$

в слое 850-700 гПа

$$T_T = T_{850} + T_{d850} - 2 \cdot T_{700} = 11,2 + 9,1 - 2 \cdot 1,4 = 17,5$$

в слое 700-500 гПа

$$T_T = T_{700} + T_{d700} - 2 \cdot T_{500} = 1,4 - 3,6 - 2 \cdot (-13,7) = 25,2$$

в слое 500-400 гПа

$$T_T = T_{500} + T_{d500} - 2 \cdot T_{400} = -13,7 - 28,7 - 2 \cdot (-25,9) = 9,4$$

в слое 400-300 гПа

$$T_T = T_{400} + T_{d400} - 2 \cdot T_{300} = -25,9 - 44,9 - 2 \cdot (-41,9) = 13$$

в слое 250-200 гПа

$$T_T = T_{250} + T_{d250} - 2 \cdot T_{200} = -51,1 - 61,1 - 2 \cdot (-58,1) = 4$$

Значения параметра ТТ составляют от 4 до 25,2, т.е состояние атмосферы устойчиво, грозы, ветров не предвидется.

SWEAT — индекс неустойчивости.

SWEAT — комплексный критерий для диагноза и прогноза опасных и стихийных явлений погоды, связанных с конвективной облачностью, включает в себя индекс неустойчивости воздушной массы, скорость и сдвиг ветра. Рассчитывается по формуле:

$$SWEAT = 12 \cdot T_{d850} + 20(T_T - 49) + 3.888 \cdot V_{850} + 1.944 \cdot V_{500} + (125 \cdot [\sin(d_{500} - d_{850}) + 0.2])$$

где:

T_{d850} — температура точки росы на 850 гПа,

ТТ — Total Totals индекс,

V_{850} — скорость ветра на 850 гПа,

V_{500} — скорость ветра на 500 гПа,

d_{500} и d_{850} — направление ветра на соответствующих поверхностях.

В формуле:

- Температура воздуха дана в градусах Цельсия;
- Скорость ветра — в м/с;
- Направление ветра — в градусах;
- Второй член уравнения установить в 0, если $T_T \leq 49$.

$$SWEAT = 12 \cdot 9,1 + 0 + 3,888 \cdot 6 + 1,944 \cdot 12 + (125 \cdot [\sin(20 - 320) + 0.2])$$

$$= 264,31$$

есть условия для сильных гроз, града и шквалов.

Таким же образом рассчитаем для верхних и нижних слоев атмосферы:

$$SWEAT = 12 \cdot T_{d_{1011}} + 20(T_T - 49) + 3,888 \cdot V_{1011} + 1,944 \cdot V_{925} + (125$$

$$\cdot [\sin(d_{925} - d_{1011}) + 0.2])$$

$$SWEAT = 12 \cdot 17,6 + 0 + 3,888 \cdot 5 + 1,944 \cdot 2 + (125 \cdot [\sin(20 - 2) + 0.2])$$

$$= 298,1$$

рассчитаем для слоя 500-400 гПа.

$$SWEAT = 12 \cdot T_{d_{500}} + 20(T_T - 49) + 3,888 \cdot V_{500} + 1,944 \cdot V_{400} + (125$$

$$\cdot [\sin(d_{400} - d_{500}) + 0.2])$$

$$SWEAT = 12 \cdot -28,7 + 0 + 3,888 \cdot 12 + 1,944 \cdot 12 + (125$$

$$\cdot [\sin(12 - 12) + 0.2]) = -249,4$$

При $SWEAT < 250$ (нижний слой атмосферы 500-400 гПа) условия для возникновения сильных гроз отсутствуют;

при $SWEAT$ от 250 до 350 есть условия для сильных гроз, града и шквалов (верхние слои атмосферы).

Динамическая неустойчивость. Динамическая неустойчивость атмосферы является одним из необходимых условий возникновения возмущений синоптического масштаба. Однако и прямо, и косвенно она участвует в генерации МВ. Так, при возникновении мезоциклонов наличие динамической неустойчивости непосредственно влияет на формирование этих возмущений.

Циклогенез – это масштабный процесс, охватывающий практически всю толщу тропосферы. Поэтому стоит рассматривать бароклинность наиболее активной части тропосферы – поверхности от 850 гПа до 300 гПа.

Для количественной оценки динамической неустойчивости существует множество различных показателей. Наиболее общим из них является показатель

$$DI = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot (\sin\varphi)^2 \cdot \sqrt{V_1^2 + (0.75V_2)^2 - 1.5V_1V_2 \cos |d_1 - d_2|}}{(z_{500} - z_{850})(T_{500} - T_{850})}$$

Так, для слоя 300—700 гПа

$$DI = \frac{2.6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sin\varphi)^2 \cdot \sqrt{V_2^2 + V_3^2 - 2V_2V_3 \cos |d_2 - d_3|}}{(z_{300} - z_{700})(T_{300} - T_{700})}$$

a_3 — угол между направлениями ветра на уровнях 300 и 500 гПа.

Вычисляются значения T_{850} и T_{500}

$$T_{850} = (273 + 11,2) \left(\frac{1000}{850}\right)^{0,288} = 297,8 \text{ К}$$

$$T_{500} = (273 - 13,7) \left(\frac{1000}{500}\right)^{0,288} = 316,3 \text{ К}$$

$$T_{500} - T_{850} = 316,3 - 297,8 = 18,5 \text{ К}$$

$$T_{700} = (273 + 1,4) \left(\frac{1000}{700}\right)^{0,288} = 304 \text{ К}$$

$$T_{300} = (273 - 41,9) \left(\frac{1000}{300}\right)^{0,288} = 327 \text{ К}$$

Вычисляются значения $a_1 - a_2$;

$$a_1 = |330 - 320| = 10^\circ$$

$$a_2 = [20 - 330] = 310^\circ$$

$$a_3 = [40 - 20] = 20^\circ$$

Вычисляются направления векторов сдвигов ветра в слоях 700—850 и 500—700 гПа:

$$V_1 = \sqrt{6^2 + 4^2 - 2 \cdot 6 \cdot 4 \cdot \cos 10} = 5.3 \text{ м/с}$$

Здесь перед вторым членом взят знак «—», так как имеет место правый поворот ветра с высотой.

$$V_2 = \sqrt{12^2 + 4^2 - 2 \cdot 12 \cdot 4 \cdot \cos 310} = 10,58 \text{ м/с}$$

$$V_3 = \sqrt{22^2 + 12^2 - 2 \cdot 22 \cdot 12 \cdot \cos 20} = 11,48 \text{ м/с}$$

$$d_1 = 320 + \arccos \frac{6 - 4 \cos 10}{5,3} = 387,1$$

$$d_2 = 330 + \arccos \frac{4 - 12 \cos 310}{10,58} = 450,55$$

$$d_3 = 20 + \arccos \frac{12 - 22 \cos 20}{11,48} = 159,02$$

Теперь все необходимые данные есть. Воспользовавшись формулой, можно рассчитать значение DI:

$$DI = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot (\sin 60)^2 \cdot \sqrt{5,3^2 + (0,75 \cdot 10,58)^2 - 1,5 \cdot 5,3 \cdot 10,58 \cos |387,1 - 450,55|}}{(5790 - 1563)(316,3 - 297,8)}$$

$$= 2,10 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$$

Так, для слоя 300—700 гПа

$$DI = \frac{2,6 \cdot 10^{-6} \cdot (\sin 60)^2 \cdot \sqrt{10,58^2 + 11,48^2 - 2 \cdot 10,58 \cdot 11,48 \cdot \cos |450,55 - 159,02|}}{(9460 - 3159)(327 - 304)}$$

$$= 1,67 \cdot 10^{-10}$$

Список литературы

1. Гусейнов Н.Ш., Агаева А.А. Оценка неустойчивости атмосферы в течение грозовой активности // Научные труды Национальной авиационной академии. 2014. № 1. С. 142—149.
2. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 312 с.
3. <https://meteo-orw.ru>