

Э. А. ЗОРЯН, А. Е. АЛОЯН

О МЕСТНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ ЗАДАННОМ РЕЛЬЕФЕ НА ФОНЕ ВНЕШНЕГО ПОТОКА

Как известно [6–11], в летний период над южными районами Армянской ССР под влиянием сильного нагрева воздушных масс в нижних слоях атмосферы (до 3-х км над ур. м.) устанавливается местная стационарная область пониженного давления. Наличие последнего обуславливает возникновение воздушных течений северного направления в пограничном слое атмосферы.

Нами в течение двух лет (июль-август 1968–1969 гг.) в пунктах Берд, Артаниш, Семеновка, Севан и Ереван велись синхронные шаропилотные наблюдения 4–5 раз в сутки. Анализ материалов наблюдений показал:

1) в каждом пункте вертикальная структура ветра имеет свои особенности, резко отличающиеся друг от друга, что является, главным образом, следствием пересеченности рельефа. С увеличением высоты эти особенности исчезают и уже с 4.0 км над ур. м. наблюдается установившийся юго-западный поток;

2) если направление воздушного течения устанавливается уже с высоты 4.0 км над ур. м., то скорость ветра на этой высоте в среднем — порядка 5–6 м/сек и только на высоте 6 км — 10–12 м/сек;

3) в отличие от остальных станций в пункте Артаниш и на ст. Ереван наблюдаются северные ветры кatabадического характера, скорость которых в толще 200–300 м от Земли превышает 10 м/сек, иногда доходя до 20–25 м/сек. С увеличением высоты скорость резко уменьшается, достигая таких же скоростей, как и на остальных станциях. В Артанише такая скорость наблюдается в дневные часы — с 15 по 19 час, а в Ереване — в вечерние часы — с 19 час, имея максимум повторяемости в 21 час;

4) на северном склоне Севанского хребта и в бассейне Малого Севана с утра и до вечера наблюдаются ветры северного направления.

В Ереване, наоборот, с утра, в основном, наблюдаются ветры южного направления с малыми скоростями, либо штиль, а северные ветры начинаются в вечерние часы (с 19 час), имея максимум повторяемости в 21 час, в то время как ночью на станциях северного

склона Севаиского хребта направление потока южное. Это говорит о том, что эта циркуляция — местного характера и имеет ярко выраженный суточный ход, на что впервые обратила внимание Е. С. Селезнева [9]. Ею было выдвинуто предположение о происхождении летних северных ветров над оз. Севан, согласно которому летом долины Аракса и Куры сильно нагреваются, причем температура над Араратской равниной вообще выше, чем над долиной Куры. Кроме того, Араратская равнина лежит на несколько сот метров выше долины Куры, что еще больше усиливает местный барический градиент. Этот градиент имеет суточный ход и максимального значения достигает в дневные часы.

Нашей целью является установление методами гидродинамики роли неровностей рельефа, местного горизонтального барического градиента и температурной неоднородности подстилающей поверхности в развитии местной циркуляции в летний период на фоне внешнего потока.

§ 1. Постановка задачи

Исходными являются полные уравнения гидротермодинамики пограничного слоя атмосферы с учетом силы Кориолиса и квазистатичности [2].

Так как нашей целью является исследование местной циркуляции на фоне крупномасштабных синоптических ситуаций, то градиент давления следует разложить на две части:

$$\text{grad } p = \text{grad } p_1 + \text{grad } p_2 \quad (1)$$

Здесь $\text{grad } p_1$ характеризует стационарный невозмущенный крупномасштабный процесс, связанный с его вектором скорости, приближенно, геострофическим соотношением, а $\text{grad } p_2$ имеет местный характер, вызванный горизонтальной барической неоднородностью в нижних слоях атмосферы между долинами рек Аракса и Куры.

Как показал анализ фактических данных, в летний период местный барический градиент — $\text{grad } p_2$ имеет постоянное направление — с долины Куры к долине Аракса.

Направляя ось x в этом направлении, то есть с северо-востока на юго-запад, задачу приведем к плоской, так как возмущения метеорологических элементов, вызванных этим градиентом, слабо зависят от y .

При переходе к упрощению свободной конвекции осредненные функции давления и температуры, в отличие от обычных, будут считаться зависящими не только от z , но и от x , так как на разных склонах горного хребта они существенно отличаются (давление на 5–6 мб, а температура до 10–12 °C), поэтому невозможно выбрать общие осредненные функции для обоих склонов.

Таким образом,

$$\begin{aligned} p(x, z, t) &= \bar{p}(x, z) + p'(x, z, t) \\ T(x, z, t) &= \bar{T}(x, z) + \theta(x, z, t) \\ \rho(x, z, t) &= \bar{\rho}(z) + \rho'(x, z, t) \end{aligned} \quad (2)$$

причем

$$p' \ll \bar{p}, \quad \theta \ll \bar{T}, \quad \rho' \ll \bar{\rho} \quad (3)$$

В уравнении притока тепла при упрощении свободной конвекции появляется член вида $\frac{x-1}{x} \frac{\bar{T}}{\bar{p}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x}$, который, по крайней мере, на порядок ниже члена $\frac{\partial \bar{T}}{\partial x}$, поэтому его можно отбросить.

Тогда система уравнений гидротермодинамики в ортогональной системе координат будет иметь вид

$$\frac{du}{dt} = -\frac{RT}{\bar{p}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \lambda \int \frac{\partial \theta}{\partial x} dz + i\delta'\theta - l(u - V) + D(u) \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dt} = -l(u - U) + D(v) \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -u \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - \Gamma(w + \delta'u) + D(\theta) \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Здесь

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

$$D(\varphi) = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial \varphi}{\partial z} + v \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$$

$$\lambda = \frac{g}{\bar{T}}, \quad \Gamma = \gamma_p - \bar{\gamma}$$

u, v, w — составляющие вектора скорости вдоль ортогональной системы координат x, y, z (где ось Ox направлена горизонтально на юго-запад, ось Oy — перпендикулярно к x на юго-восток, а z — расстояние от поверхности рельефа), U и V — компоненты геострофического ветра, $\bar{\delta}(x)$ — уравнение горы, δ' — его производная; $l = 2\omega \sin \varphi$ — параметр

Кориолиса, причем $\omega = 7.29 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ — величина угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси; φ — широта местности; g — ускорение силы тяжести; R — газовая постоянная; κ — показатель адиабаты; $\bar{\tau}$ и $\bar{\tau}_a$ — вертикальные градиенты температуры в реальной и сухоадиабатической атмосфере; k и γ — коэффициенты турбулентного обмена в направлении перпендикулярном и вдоль подстилающей поверхности.

Следует отметить, что вертикальная скорость w связана с u и v соотношением

$$\bar{w} = w + \varepsilon u \tag{8}$$

В качестве краевых условий для системы уравнений (4)–(7) принимаем

$$\text{при } z = 0 \quad u = v = w = 0, \quad \theta = \theta_0(x, t) \tag{9}$$

$$\text{при } z = H \quad u = U, \quad v = V, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \tag{10}$$

или для свободной конвекции

$$u = v = 0 \tag{10'}$$

$$\text{при } x = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \tag{11}$$

или

$$u = U_0(z), \quad v = V_0(z), \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \tag{11'}$$

$$\text{при } x = L \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \tag{12}$$

или

$$u = U_1(z), \quad v = V_1(z), \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \tag{12'}$$

Как известно [3], В. А. Катков (1965 г.), используя неявный численный метод расщепления, предложенный акад. Г. И. Марчуком [4] для уравнений гидротермодинамики, разработал устойчивую схему счета применительно к нестационарным задачам свободной конвекции для плоской земли.

Для решения поставленной задачи пользуемся этой схемой.

§ 2. Определение местного барического градиента и температуры подстилающей поверхности по фактическим данным

Профиль горы берется как проекция Севанского хребта на вертикальную плоскость, проходящую через Малый Севан и имеющую северо-восточное направление, совпадающее с местным барическим градиентом.

Для нахождения местного барического градиента, а также $\theta_0(x, t)$ необходимо определить стандартные функции $T(x, z)$ и $p(x, z)$.

Они табулируются по данным зондирования атмосферы на ст. Ереван и Тбилиси.

Для более точного их определения было бы желательно по изучаемой трассе между Тбилиси и Ереваном на разных склонах Севанского хребта иметь данные зондирования атмосферы, но они, к сожалению, отсутствуют, кроме немногочисленных данных зондирования над Семеновкой и июле 1957 г., проведенной ГГО [6]. Эти наблюдения показывают, что особенно в дневные часы данные над Семеновкой более близки к данным Ереванского зонда, чем Тбилисского.

Отсюда можно заключить, что данные Ереванского зонда, в первом приближении, можно считать репрезентативными как для Араратской долины, так и для южного склона Севанского хребта, а данные Тбилисского зонда — для долины Куры и северных склонов Севанского хребта.

Таблица 1

Значения $z = h(x)$, $V(x)$ и горизонтального шага Δx

<i>m</i>	<i>x</i> , км	Δx , км	h , м	V	<i>m</i>	<i>x</i> , км	Δx , км	h , м	γ
1	4	4.0	500	0	31	57	1.0	2150	-0.0750
2	8	4.0	500	0	32	58	1.0	2100	-0.0750
3	12	4.0	500	0	33	59	1.0	2000	-0.0750
4	16	4.0	500	0	34	60	1.0	1950	-0.0750
5	20	4.0	500	0	35	61	1.0	1937	-0.0125
6	24	4.0	500	0	36	62	1.0	1925	-0.0125
7	26	2.0	525	0	37	63	1.0	1900	-0.0125
8	28	2.0	550	0.0300	38	64	2.0	1900	-0.0125
9	30	2.0	600	0.0300	39	66	2.0	1875	-0.0125
10	32	2.0	650	0.0300	40	68	2.0	1875	-0.0125
11	34	2.0	700	0.0300	41	70	2.0	1825	-0.0125
12	36	2.0	800	0.0300	42	72	2.0	1800	-0.0125
13	38	2.0	850	0.0375	43	74	2.0	1775	-0.0125
14	40	2.0	950	0.0375	44	76	2.0	1750	-0.0125
15	41	1.0	1000	0.0500	45	78	2.0	1725	-0.0125
16	42	1.0	1075	0.1000	46	80	2.0	1700	-0.0156
17	43	1.0	1200	0.1000	47	82	2.0	1650	-0.0186
18	44	1.0	1350	0.1500	48	84	2.0	1600	-0.0218
19	45	1.0	1500	0.1500	49	86	2.0	1525	-0.0250
20	46	1.0	1750	0.2500	50	88	2.0	1450	-0.0312
21	47	1.0	2000	0.2500	51	90	2.0	1400	-0.0375
22	48	1.0	2250	0.2500	52	92	2.0	1300	-0.0408
23	49	1.0	2400	0.1500	53	94	2.0	1250	-0.0440
24	50	1.0	2475	0.0750	54	96	2.0	1150	-0.0470
25	51	1.0	2500	0.0250	55	98	2.0	1000	-0.0500
26	52	1.0	2475	0	56	100	2.0	900	-0.0406
27	53	1.0	2450	-0.0250	57	102	2.0	875	-0.0312
28	54	1.0	2375	-0.0500	58	104	2.0	850	-0.0126
29	55	1.0	2300	-0.0750	59	108	4.0	850	0
30	56	1.0	2200	-0.0750	60	112	4.0	850	0

Таким образом, отклонение температуры подстилающей поверхности $\theta_0(x, t)$ определяется как разность фактических данных темпе-

ратуры по метеостанциям и стандартной температуры, причем для южного склона берутся данные Ереванского зонда, осредненные за определенный промежуток времени (день, ночь), а для северного склона — данные Тбилисского зонда.

За производные $\partial \bar{p} / \partial x$ и $\partial \bar{T} / \partial x$ берется разность данных Ереванского и Тбилисского зондов, деленная на $\Delta x \approx 200$ км — расстояние между ними. Отсюда следует, что в принятой нами координатной системе для летнего периода от южных склонов Севанского хребта до Араратской долины

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} < 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} > 0$$

а на северных склонах вплоть до долины Куры эти производные равны нулю.

В табл. 1 приведены цифровые значения $z = \delta(x)$, $\delta'(x)$ и переменного шага по горизонтали Δx в зависимости от горизонтальной координаты x .

По вертикали область интегрирования разбивается на $n = 38$ частей, причем здесь Δz_n также берется переменным

$$\begin{aligned} \Delta z_n &= 2^{n-1} \Delta z_1 \quad \text{до} \quad n = 5, \quad \text{причем} \quad \Delta z_1 = 2 \text{ м} \\ \Delta z_n &= 38 \text{ м}, \quad \Delta z_7 = \dots = \Delta z_{12} = 50 \text{ м}, \quad \Delta z_{13} = \dots = \Delta z_{18} = 100 \text{ м} \\ \Delta z_{19} &= \dots = \Delta z_{21} = 200 \text{ м}, \quad \Delta z_{22} = \dots = \Delta z_{38} = 300 \text{ м} \end{aligned}$$

Для $k(z)$ взята модель с изломом

$$k(z) = \begin{cases} k_1 \frac{z}{z_1} & \text{при } z \leq 100 \text{ м} \\ \text{const} & \text{при } z > 100 \text{ м} \end{cases}$$

Здесь k_1 — коэффициент вертикального турбулентного обмена на высоте $z_1 = 1$ м.

Экспериментальные исследования, проведенные Л. Т. Матвеевым [5] в бассейне оз. Севан, показали, что в среднем k имеет порядок $10 \text{ м}^2/\text{сек}$, поэтому было принято

$$k_1 = 0.1 \text{ м}^2/\text{сек}$$

Для остальных параметров задачи были приняты следующие значения: $\Delta t = 10$ мин, $\nu = 500 \text{ м}^2/\text{сек}$, $l = 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$, $\lambda = 3.5 \cdot 10^{-2} \text{ м сек}^{-1} \text{ град}^{-1}$, $l' = 0$.

Расчеты были произведены на ЭВМ БЭСМ-6 ВЦ СО АН СССР в Новосибирске.

§ 3. Свободная конвекция

Рассмотрим задачу о свободной конвекции, когда внешний поток отсутствует, то есть $U=V=0$.

Ниже приводятся два примера расчета по фактическим данным местного барического градиента и температуры подстилающей поверхности для дневного и ночного периодов, средних за III декаду июля 1968 года.

Для ночного и дневного периодов местный градиент давления один и тот же и имеет вид

$$\frac{RT}{p} \frac{\partial p}{\partial x} = \begin{cases} [-2.65 + 0.85(\delta + z)] \cdot 10^{-3} & \text{при } 850 \leq \delta + z \leq 3000 \text{ м,} \\ 0 & \text{при } \delta + z > 3000 \text{ м;} \end{cases}$$

а) для ночного периода

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \begin{cases} 1.4 \cdot 10^{-6} & \text{при } \delta + z \leq 2000 \text{ м,} \\ [2.8 - 0.7(\delta + z)] \cdot 10^{-5} & \text{при } 2000 \leq \delta + z \leq 4000 \text{ м;} \end{cases}$$

б) для дневного периода

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \begin{cases} 2.0 \cdot 10^{-6} & \text{при } 850 \leq \delta + z \leq 2000 \text{ м,} \\ [4.0 - (\delta + z)] \cdot 10^{-5} & \text{при } 2000 \leq \delta + z \leq 4000 \text{ м;} \end{cases}$$

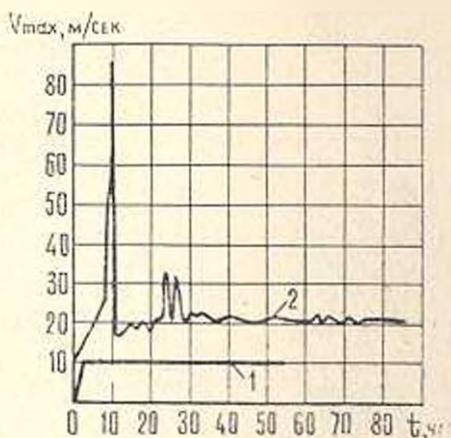
Значения $\theta_0(x, t)$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения $\theta_0(x, t)$ — отклонение температуры подстилающей поверхности от среднего для ночного, дневного и $t = 15$ час, средних за III декаду июля 1968 года

$z = \theta(x)$ в км	х в км	$\theta_n(x, t)$			$\theta(x)$ в км	х в км	$\theta_d(x, t)$		
		Ночь	День	$t = 15$ ч			Ночь	День	$t = 15$ ч
0.5	24	-3.3	2.3	4.0	2.1	58	-7.7	-4.2	-1.0
0.6	30	-3.3	2.2	4.0	2.0	59	-7.7	-4.2	0
0.8	36	-3.2	1.8	4.0	1.9	63	-7.1	-2.9	1.0
1.0	41	-2.7	1.5	4.0	1.8	72	-6.7	-1.8	2.0
1.2	43	-2.7	1.5	4.0	1.7	80	-6.3	-1.2	2.0
1.5	45	-2.7	1.5	4.0	1.6	84	-6.1	-0.8	3.0
2.0	47	-2.7	1.5	4.0	1.5	86	-6.0	-0.3	3.5
2.4	49	-3.2	1.1	2.0	1.4	90	-5.7	0.3	4.0
2.5	51	-5.4	-1.1	-1.0	1.3	92	-5.4	0.6	5.0
2.4	54	-7.6	-3.3	-1.0	1.0	98	-4.7	2.1	5.0
2.3	55	-7.7	-3.6	-1.0	0.9	100	-4.2	2.7	5.0
2.2	56	-7.7	-3.8	-1.0	0.85	102	-4.2	2.7	5.0

Решение отыскивалось методом установления. В качестве начальных условий было принято $u=v=\theta=0$. Примерно через 2.5—3 часа от начала процесса картина течения становилась стационарной. Стационарность не нарушается как долго бы ни производился счет, что доказывает устойчивость данной неявной схемы. Расчет на 24 часа вперед в среднем производился за 3 мин. машинного времени.



Фиг. 1. График V_{max} в функции времени t .

В процессе счета печаталась величина максимальной скорости V_{max} внутри области интегрирования; по изменению этой величины можно судить о скорости установления. График V_{max} в функции времени t приведен на фиг. 1 (кривая 1).

Результаты расчетов приведены на фиг. 2, 3, 4, 5 и 6, причем фиг. 2 и 3 относятся к дневному, а фиг. 4 и 5 — к ночному периодам. На фиг. 6 для наглядности представлены изолинии модуля скорости V и θ в приземном слое атмосферы как для дневного (а), так и для ночного (б) периодов. Здесь стрелки показывают направление воздушных течений. На изолиниях величины $u, v, V = \sqrt{u^2 + v^2}$ имеют размерность м/сек, θ — градусы С, а линии тока ψ — м²/сек. Функция тока ψ вычислялась с помощью формулы трапеций, построенной на основании выражения

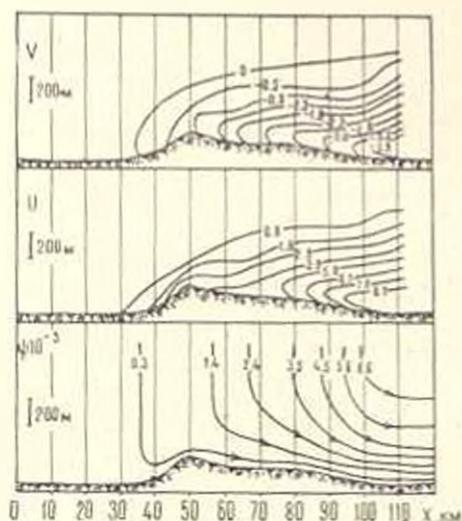
$$\psi = \int_0^z u dz$$

На изолиниях V пунктиром проведены изолинии, α^0 — направление ветра в градусах.

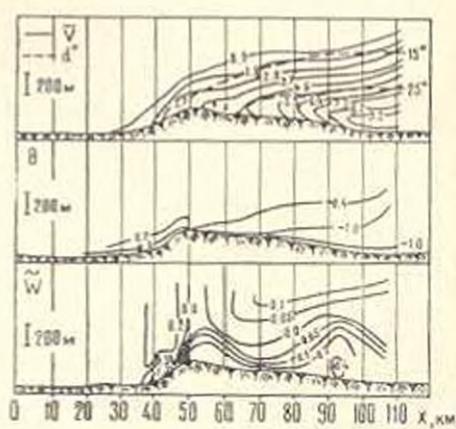
Как видно из сравнения результатов расчета для ночи и дня, между ними имеется существенная разница, заключающаяся в том, что воздушный поток днем переваливает через горный хребет с се-

верного склона на южный, в то время как ночью на северной стороне течение направлено вниз по склону, и обмен воздушных масс с южным склоном не происходит. В этом случае вершина горы является чертой раздела.

Картина течения на южном склоне и днем и ночью одна и та же: при движении вниз по склону скорость ветра усиливается, принимая максимальное значение в районе г. Еревана, равное 9–10 м/сек, при этом на северном склоне пограничный слой имеет мощность в несколько сот метров (250–300 м), постепенно разбухает до 1.0–1.2 км над Араратской долиной.



Фиг. 2. Пространственное распределение горизонтальных составляющих скоростей (u , v) и линий тока (ψ) в дневной период при свободной конвекции ($U=V=0$).



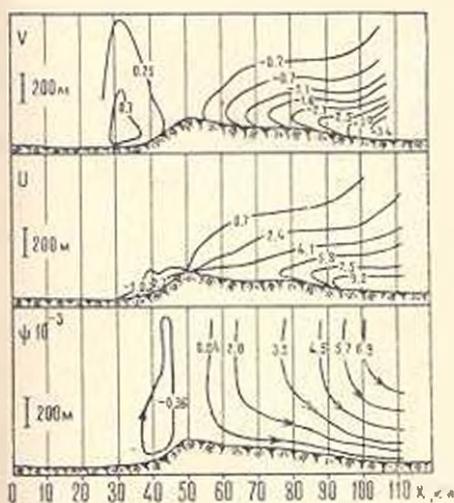
Фиг. 3. Пространственное распределение величин скорости ветра (V), его направления d (в градусах), температур t и вертикальной составляющей скорости (w) в дневной период при свободной конвекции ($U=V=0$).

Отсюда можно заключить, что главная роль при свободной конвекции принадлежит местному барическому градиенту, под действием которого воздушное течение и днем и ночью направлено вниз по южному склону к г. Еревану.

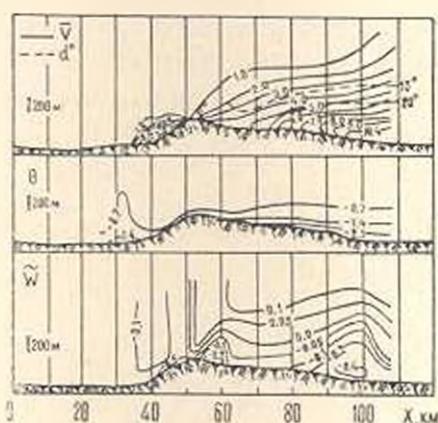
Над северным склоном доминирующее влияние имеет распределение температуры подстилающей поверхности в сочетании с рельефом местности. Здесь четко выражен суточный ход воздушных течений, хорошо согласующийся с натурными данными. Результатом такого сочетания является также область максимальных скоростей, 7 м/сек — ночью и 5 м/сек — днем у земли на $z=20-30$ м на южном склоне

при $x=55-60$ км (фиг. 6), что соответствует районам типа Семеновка и Артаниш. По данным наших экспедиционных наблюдений в течение 1968—1969 гг. там действительно величина скорости больше, чем на ст. Севан.

Особый интерес представляет распределение вертикальных токов как в пространстве, так и во времени. Ночью на северном склоне (фиг. 5) вертикальные скорости отрицательны—зона нисходящих токов. В нижнем 100-метровом слое $w = -0.5$ м/сек, которая с высотой быстро уменьшается до -0.1 м/сек, в то время как днем (фиг. 3)



Фиг. 4. Пространственное распределение горизонтальных составляющих скоростей (u , v) и линий тока (ψ) в ночной период при свободной конвекции ($U=V=0$).



Фиг. 5. Пространственное распределение величин скорости ветра (V); его направления d (в градусах), температуры (θ) и вертикальной составляющей скорости (w) в ночной период при свободной конвекции ($U=V=0$).

здесь имеет место зона восходящих токов с $w = 0.5$ м/сек и нижнем 200-метровом слое с быстрым уменьшением до 0.2 м/сек.

На южном склоне горы пространственное распределение вертикальных токов стационарное. По всему склону они отрицательны, имея экстремальные значения в районе г. Еревана $w = -0.4$ м/сек и в бассейне оз. Севан $w = -0.2$ м/сек в нижнем 200-метровом слое.

С высотой нисходящие токи уменьшаются, переходя через нуль на высоте 500 м в бассейне оз. Севан и 800-900 м—над Ереваном.

На высоте 0.8-1.2 км вертикальные токи положительны: $w = 0.1$ м/сек.

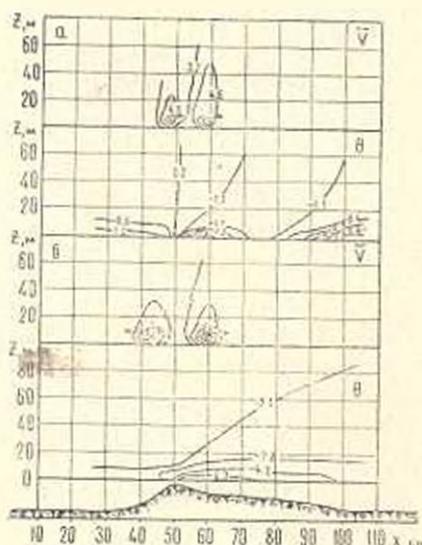
§ 4. Местная циркуляция на фоне внешнего потока

Решение этой задачи имеет большое практическое значение, так как она более близка к природным условиям вследствие того, что местная циркуляция обычно накладывается на процессы большого масштаба.

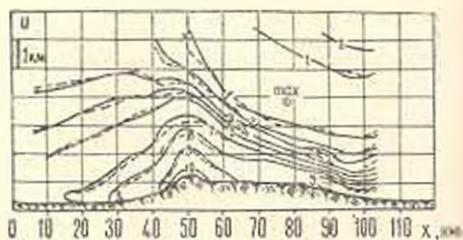
Как было отмечено выше, наиболее характерным потоком для летнего периода над Арменией на высотах 5-6 км н. ур. м. является юго-западный поток, со скоростью порядка 10 м/сек, поэтому примем

$$\text{при } z = H \quad U = -10 \text{ м/сек}, \quad V = 0$$

Ниже приводятся три примера расчета по фактическим данным местного барического градиента и температуры подстилающей поверхности на фоне внешнего потока для дневного и ночного периодов (фиг. 8) и 15 час. (фиг. 9) для средних за III декаду июля 1968 г.



Фиг. 6. Пространственное распределение модуля скорости ветра (\bar{V}) и температуры (θ) в приземном слое при свободной конвекции ($U = V = 0$) а) дневной период; б) ночной период.



Фиг. 7. Изолинии θ при $t = 60$ ч. (пунктирная) и при $t = 85$ ч. (сплошная) по данным $t = 15$ час.

Для всех трех случаев местный градиент давления один и тот же и имеет вид

$$\frac{RT}{\bar{p}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \begin{cases} | -2.65 + 0.85(\theta + z) | \cdot 10^{-3} & \text{при } 850 \leq \theta + z \leq 4000 \text{ м,} \\ 0.8 \cdot 10^{-3} & \text{при } \theta + z \gg 4000 \text{ м.} \end{cases}$$

причем на верхней границе $z=H$ ставится условие $\partial p / \partial x = 0$,

а) для ночного периода

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \begin{cases} 1.4 \cdot 10^{-5} & \text{при } \delta + z \leq 2000 \text{ м,} \\ [2.8 - 0.7(\delta + z)] \cdot 10^{-5} & \text{при } 2000 \leq \delta + z \leq 4000 \text{ м,} \end{cases}$$

б) для дневного периода

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \begin{cases} 2.0 \cdot 10^{-5} & \text{при } \delta + z \leq 2000 \text{ м,} \\ [4.0 - (\delta + z)] \cdot 10^{-5} & \text{при } 2000 \leq \delta + z \leq 5000 \text{ м;} \end{cases}$$

в) для $t=15$ час.

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \begin{cases} 3.4 \cdot 10^{-5} & \text{при } \delta + z \leq 2000 \text{ м,} \\ [5.70 - 1.15(\delta + z)] \cdot 10^{-5} & \text{при } 2000 \leq \delta + z \leq 5000 \text{ м.} \end{cases}$$

Здесь тоже решение отыскивается методом установления. Время стационарирования в этом случае намного больше, чем при свободной конвекции (порядка одних суток).

Кривая 2 на фиг. 1 показывает, что как долго бы ни производился счет, стационарность не нарушается, что гарантирует математическую устойчивость принятой неявной схемы.

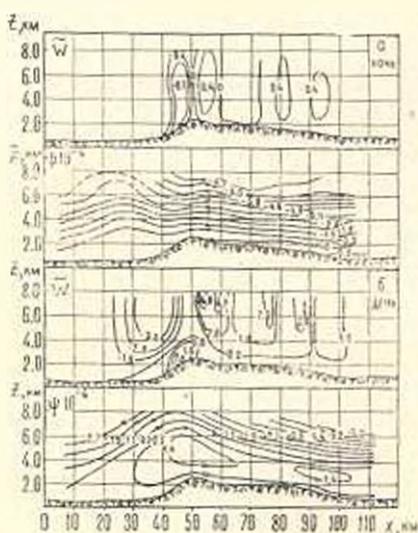
О точности решения можно судить по результатам, приведенным на фиг. 7. Здесь начерчены изолинии \bar{u} при $t=60$ час (пунктирные линии) и $t=85$ час (сплошные) по данным наблюдений за 15 час. Заметного расхождения между ними, как видно, нет. Для остальных функций имеем такую же картину.

На фиг. 8 приведены линии тока и вертикальные скорости для ночного (а) и дневного (б) периодов. В отличие от результатов расчета для свободной конвекции здесь наблюдается суточный ход воздушных потоков в пограничном слое по обоим склонам горы. Ночью воздушный поток по всей толще атмосферы имеет южное направление, кроме приземного слоя у г. Еревана, где имеются обратные очень слабые потоки ($u \approx 2$ м/сек). Этого мы не обнаружили при рассмотрении задачи о свободной конвекции, что является результатом взаимодействия местного барического градиента с внешним потоком в свободной атмосфере.

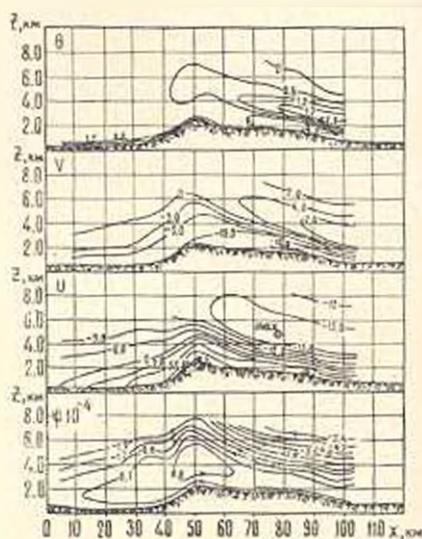
Днем воздушный поток в пограничном слое переваливает с северного склона на южный, имея максимальные скорости ветра как в районе г. Еревана, так и у вершины горы, при этом направление ветра северо-восточное. С высоты 1.5—2.0 км от поверхности Земли картина течений меняется: воздушное течение меняет направление на противоположное и на высоте 5 км над ур. м. становится юго-западным, то есть совпадает с течением в свободной атмосфере.

Здесь необходимо подчеркнуть, что большую роль в суточном ходе воздушных течений играет местный градиент температуры $\partial T/\partial x$ совместно с температурой подстилающей поверхности, так как в приведенных расчетах местный градиент давления был принят одинаковым как для дневного, так и ночного периодов.

Обращаясь теперь к анализу вертикальных токов (фиг. 8), наблюдаем ярко выраженный суточный ход их распределения, заключающийся в том, что вертикальные токи бурно развиты днем и менее — ночью, а их величина днем примерно на порядок больше ночного значения. На северном склоне ночью вертикальные скорости по всей



Фиг. 8. Пространственное распределение линий тока (ψ) и вертикальной составляющей скорости (w) на фоне внешнего потока ($U = -10$ м/сек, $V = 0$) а) ночной период; б) дневной период.



Фиг. 9. Пространственное распределение горизонтальных составляющих (u, v) вектора скорости, линий тока (ψ) и температуры (θ) на фоне внешнего потока ($U = -10$ м/сек, $V = 0$).

толще атмосферы отрицательны, не больше 0.7 м/сек, а на южном — положительны, порядка 0.4 м/сек.

Днем имеем точно такую же картину, лишь с той разницей, что она устанавливается с некоторой высоты, порядка 1.5—2.0 км от поверхности Земли и имеет значение порядка 3—4 м/сек, а ниже — имеет место обратная картина: на северном склоне восходящие токи порядка до 2.0 м/сек, а на южном, в районе г. Еревана, нисходящие порядка 1.0 м/сек. Это значит, что в отличие от ночного периода, днем в природе должен наблюдаться волновой процесс вертикальных токов по высоте, особенно в тех областях горного хребта, где его крутизна больше.

На фиг. 9 для наглядности приведены результаты расчетов для всех искомых функций по данным $t=15$ час.

Между местным барическим полем и полем скоростей существует фазовый сдвиг и происходит запаздывание на несколько часов. Поэтому приведенная картина течений должна соответствовать вечернему периоду дня, когда воздушное течение от Севанского бассейна достигает Араратской долины и в г. Ереване наблюдаются сильные северные ветры.

Была рассмотрена также задача местной циркуляции с граничными условиями (11' и 12'), то есть на боковых стенках были заданы фактические профили ветра по данным зондирования на станциях Тбилиси и Ереван.

Эта задача интересна тем, что в этом случае можно более точно определить распределение метеорологических элементов внутри области интегрирования. Необходимо отметить также, что в этом случае процесс устанавливается гораздо быстрее, чем в предыдущих случаях (через десять часов).

Расчеты показали, что независимо от направления ветра в свободной атмосфере поле скоростей в приземном слое обуславливается местным барическим градиентом, температурой подстилающей поверхности и рельефом местности.

Сравнивая результаты расчетов с картиной течения, наблюдаемой в природе как по нашим, так и по результатам других исследователей [6, 9, 10], приходим к выводу, что результаты теоретических исследований хорошо согласуются с данными натурных наблюдений.

Ереванский отдел Закавказского
научно-исследовательского гидро-
метеорологического института
по изучению гидрометеорологического
режима
Армении

Поступила 19 III 1971

Չ. Ն. ԳՐԻՅԱՆ, Ա. Ե. ԱՌՅԱՆ

ՏԵՂԱԿԱՆ ՑԻՐԿՈՒՆԵՑԱՑԻԱՅԻ ՌԻՈՒՐԱՍՏՈՒՄԻՔՅՈՒՆԷՐ ՏԵՂԱՑ
ՌԵՍՆԵՑԻ ԵՎ ԱՐՏԱՔԻՆ ԷՈՍԱՆՔԻ ԱՌԿԱՅՈՒՔՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Հոդվածում ուսումնասիրվում է Արարա և Քուր գետերի հովիտների միջև աճուան ամիսներին զոյուվյալուն ունեցող ցիրկուլյացիայի հարցը հիդրոգինամիկայի մեխոդներով:

Հիդրոմեթեոլոգինամիկայի հավասարումների սխտեմը այդ գեպրի համար պարզեցվում է և կորագիծ կոորդինատական սխտեմում ներկայացվում

[4]—[7] տեսքով, որը [9]—[12] եզրային պայմաններում լուծվում է թվային մեթոդով: Հաշվարկները իրականացվել են РЭУИ-6 էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի վրա:

Դիտարկված են ինչպես ազատ կոնվեկցիայի, այնպես էլ արտաքին նոսանքի առկայության դեպքում տեղական ցիրկուլյացիայի ստացիոնար խրոնիկները:

Հաշվարկները ցույց են տալիս, որ ցիրկուլյացիայի ղալպացումը պլաստիկորային կախված է տեղական թերմոդարձիկ գրադիենտից-ցածր ռեջիման արտոյթից, որն առաջանում է ամռանը տրոպիկական դանպվածների ներխուժման հետևանքով Հայաստանի վրա մթնալուրտի ներքին շերտերում ծովի մակերևույթից մինչև 3 կմ բարձրության վրա, ինչպես և սելլեֆից, ծածկույթի մակերևույթի շերտաստիճանից ու ազատ միևնույնությամբ արտաքին հոսանքից:

ON LOCAL AIR CIRCULATION WITH THE TERRAIN RELIEF SPECIFIED AGAINST THE BACKGROUND OF EXTERNAL AIR FLOW

Z. A. ZORIAN, A. E. ALOYAN

S u m m a r y

The problem of local air circulation, occurring between the valleys of the Arax and Kura rivers at summer period is investigated by means of complete hydrothermodynamic equation.

The stationary problems of free convection and circulation against the background of external air flow are discussed.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Воронцов П. А. Некоторые особенности термического и ветрового режимов над оз. Севан. Тр. ГГО, вып. 78, 1958.
2. Кибель И. А. Некоторые новые задачи гидродинамического краткосрочного прогноза погоды. Тр. ММЦ, вып. 3, 1964.
3. Катков В. А. О решении задач метеорологии численными методами. Метеорология и гидрология, № 7, 1965.
4. Марчук Г. И. Численные методы в прогнозе погоды. Гидрометеоиздательство, Л., 1967.
5. Матвеев А. Т. Исследование турбулентной структуры воздушного потока в районе оз. Севан с помощью самолета. Тр. ГГО, вып. 78, 1958.
6. Метеорологический режим оз. Севан. Гидрометеоиздат, Л., 1960, под ред. М. П. Тимофеева.
7. Николаев И. Г. Ветры в бассейне оз. Севан. Материалы по исследованию оз. Севан и его бассейна, ч. III, вып. 6, 1934.
8. Нарсесян А. Г. Ветровой режим территории Арианской ССР. Сб. работ Ереванской Гидрометеорологической обсерватории, вып. 1, Ереван, 1966.
9. Селазнева Е. С. О происхождении лютых северных ветров в бассейне оз. Севан. Тр. ГГО, вып. 78, 1958.
10. Честная И. И. Воздушные течения над оз. Севан. Тр. ГГО, вып. 78, 1958.
11. Фицуровский И. В. Опыт исследования вихрятов Кавказа. СПб. Изд. ИГГО 1912.