

ПРИКЛАДНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ

А. М. МХИТАРЯН

О БРИЗАХ В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА СЕВАН И НЕКОТОРЫХ
РЕЗУЛЬТАТАХ ИХ РАСЧЕТА ПО ФАКТИЧЕСКОМУ
РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ

Сообщение 2

В [7] приведено решение задачи о бризовой циркуляции на основании линеаризованных уравнений гидротермодинамики.

В настоящем сообщении результаты теории сопоставляются с данными наблюдений. Особое внимание уделяется вертикальным токам. [2, 3, 6]. Ветровому режиму оз. Севан и его изучению посвящены также [4, 5, 8, 9]. Многие вопросы освещены в [10]. Известный интерес представляет работа [1]. Список литературы по данному вопросу приведен в [7].

Прежде чем перейти к расчетам, кратко остановимся на полученных формулах.

§ 1. Анализ формул [7]

В [7] предполагается, что распределение температуры и влажности по подстилающей поверхности представлено в виде рядов Фурье (2.5) и (2.6). Ниже будет рассмотрен случай, когда суточный ход этих величин представлен в виде простой синусоиды, то есть $T_n = T_n^* - q_n = q_n - 0$, кроме T_1 и q_1 . Тогда будем иметь

$$\vartheta_0(x, y, t) = T_1(x, y) \sin \omega t,$$

$$q_0(x, y, t) = q_1(x, y) \sin \omega t. \quad (1.1)$$

Для упрощения расчетов примем береговую линию как прямую, достаточно большой длины, тогда ни одна из величин не будет зависеть от y .

Рассмотрим следующие случаи:

- I. $k = \text{const}$, $l = 0$;
- II. $k = \text{const}$, $l \neq 0$;
- III. $k \neq \text{const}$, $l = 0$;
- IV. $k \neq \text{const}$, $l \neq 0$;

В случаях I и II ϑ_0 и q_0 определяются выражениями (1.1); В случаях III и IV — выражениями (2.5) и (2.6) из [7].

Случай задания температуры по (1.1) назовем схематизированным, так как (2.5) [7] соответствует фактическому ее распределению. Тогда ясно, что сравнивая случаи I с II и III с IV, получим влияние ускорения Кориолиса, а сравнивая I с III и II с IV легко проследить каково влияние более точного учета температуры подстилающей поверхности.

Если решения из [7], соответствующие всем четырем случаям представить в виде

$$\psi(x, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\psi_n(x, z) \cos n\pi t + \psi_n(x, z) \sin n\pi t \right], \quad (1.2)$$

где ψ это θ , q , u , v или ω — попеременно, а ψ_n и ψ_n соответствующие им коэффициенты, то расчетные формулы примут вид:

В случае I в силу (2.8), (2.9), (2.18), (2.19) [7]

$$\theta_1 = -T_1(x) e^{-\alpha_1 z} \sin \alpha_1 z, \quad (1.3)$$

$$\theta_1 = -T_1(x) e^{-\alpha_1 z} \cos \alpha_1 z,$$

$$u_1 = -\frac{\lambda z}{4k\alpha_1^2} \frac{\partial T_1}{\partial x} e^{-\alpha_1 z} \cos \alpha_1 z,$$

$$u_1 = -\frac{\lambda z}{4k\alpha_1^2} \frac{\partial T_1}{\partial x} e^{-\alpha_1 z} \sin \alpha_1 z, \quad (1.4)$$

$$v_1 = \omega_1 = 0,$$

$$\omega_1 = -\frac{\lambda e^{-\alpha_1 z}}{8k\alpha_1^4} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \left[\alpha_1 z \cos \alpha_1 z - (1 + \alpha_1 z) \sin \alpha_1 z \right],$$

$$\omega_1 = \frac{\lambda e^{-\alpha_1 z}}{8k\alpha_1^4} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \left[e^{-\alpha_1 z} - \left[(1 + \alpha_1 z) \cos \alpha_1 z + \alpha_1 z \sin \alpha_1 z \right] \right].$$

В случае II в силу (2.8), (2.9), (3.10), (3.11), (3.12) [7],

$$u_1 = \frac{\lambda}{4\alpha_1 l} \frac{\partial T_1}{\partial x} \left[(\cos \alpha_1 z - \sin \alpha_1 z) e^{-\alpha_1 z} - (\cos b_1 z + \sin b_1 z) e^{-b_1 z} \right],$$

$$u_1 = \frac{\lambda}{4\alpha_1 l} \frac{\partial T_1}{\partial x} \left[(\cos \alpha_1 z + \sin \alpha_1 z) e^{-\alpha_1 z} - (\cos b_1 z - \sin b_1 z) e^{-b_1 z} \right], \quad (1.5)$$

$$v_1 = -\frac{\lambda}{4\alpha_1 l} \frac{\partial T_1}{\partial x} \left[(\cos \alpha_1 z + \sin \alpha_1 z) e^{-\alpha_1 z} - (\cos b_1 z + \sin b_1 z) e^{-b_1 z} - \right. \\ \left. - 2(\cos \alpha_1 z + \sin \alpha_1 z) e^{-\alpha_1 z} \right],$$

$$v_1 = \frac{\lambda}{4\alpha_1 l} \frac{\partial T_1}{\partial x} \left[(\cos \alpha_1 z - \sin \alpha_1 z) e^{-\alpha_1 z} + (\cos b_1 z - \sin b_1 z) e^{-b_1 z} - \right. \\ \left. - 2(\cos \alpha_1 z - \sin \alpha_1 z) e^{-\alpha_1 z} \right].$$

$$w_1 = - \frac{\lambda}{4\sigma_1 b_1 l} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \left[\frac{\partial_1}{a_1} e^{-a_1 z} \sin a_1 z + 0 - \sin b_1 z e^{-b_1 z} \right] - 1 + \cos b_1 z$$

$$w_2 = - \frac{\lambda}{4\sigma_1 b_1 l} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \left[\frac{b_1}{a_1} (1 - e^{-a_1 z} \cos a_1 z) - 1 + \cos b_1 z e^{-b_1 z} \right] + 0 - \sin b_1 z$$

Решение для температуры в случае II совпадает с (1.3).

Здесь также, как и в [7], верхние знаки в скобках при $e^{-a_1 z}$ и верхние выражения в последних скобках берутся при $\omega > l$, нижние — $\omega < l$.

В случае III в силу (2.8), (2.9), (2.18), (2.19) и (2.5) [7].

$$v_n = e^{-n^2 z} (T_n \cos \sigma_n z - T_n' \sin \sigma_n z),$$

$$v_n = e^{-n^2 z} (T_n \sin \sigma_n z + T_n' \cos \sigma_n z),$$

$$u_n = - \frac{i z e^{-n^2 z}}{4k \sigma_n^2} \left(\frac{\partial T_n'}{\partial x} \cos \sigma_n z + \frac{\partial T_n}{\partial x} \sin \sigma_n z \right). \quad (1.6)$$

$$u_n = - \frac{i z e^{-n^2 z}}{4k \sigma_n^2} \left(\frac{\partial T_n}{\partial x} \cos \sigma_n z - \frac{\partial T_n'}{\partial x} \sin \sigma_n z \right).$$

$$\omega_n = \frac{\lambda}{8k \sigma_n^4} \left\{ \Delta T_n - e^{-n^2 z} \left[\left(\Delta T_n + \sigma_n z \Delta (T_n + T_n') \right) \cos \sigma_n z - \left(\Delta T_n' + \sigma_n z \Delta (T_n - T_n') \right) \sin \sigma_n z \right] \right\}. \quad (1.7)$$

$$\omega_n = \frac{\lambda}{8k \sigma_n^4} \left\{ \Delta T_n - e^{-n^2 z} \left[\left(\Delta T_n + \sigma_n z \Delta (T_n - T_n') \right) \sin \sigma_n z + \left(\Delta T_n' + \sigma_n z \Delta (T_n + T_n') \right) \cos \sigma_n z \right] \right\}.$$

В частности, решения (1.6) и (1.7) совпадают с (1.3) и (1.4) при $T_n = T_n' = 0$, кроме $T_n' \neq 0$.

В случае IV в силу (2.8), (2.9), (3.10) — (3.12) и (2.5) [7].

$$u_n = \frac{\lambda}{4l \sigma_n} \left[\frac{\partial}{\partial x} (T_n + T_n') (e^{-a_n z} \cos a_n z - e^{-b_n z} \cos b_n z) + \frac{\partial}{\partial x} (T_n - T_n') (e^{-a_n z} \sin a_n z + e^{-b_n z} \sin b_n z) \right],$$

$$u_n = \frac{\lambda}{4l \sigma_n} \left[\frac{\partial}{\partial x} (T_n + T_n') (e^{-a_n z} \sin a_n z + e^{-b_n z} \sin b_n z) - \frac{\partial}{\partial x} (T_n - T_n') (e^{-a_n z} \cos a_n z - e^{-b_n z} \cos b_n z) \right]. \quad (1.8)$$

$$v_n = \frac{\lambda}{4l \sigma_n} \left[\frac{\partial}{\partial x} (T_n - T_n') (e^{-a_n z} \cos a_n z + e^{-b_n z} \cos b_n z - 2e^{-n^2 z} \cos \sigma_n z) - \right.$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\partial}{\partial x} (T_n + T_n) (e^{-a_n z} \sin a_n z \pm e^{-b_n z} \sin b_n z - 2e^{-\gamma_n z} \sin \sigma_n z) \Big|, \\
v_n = & \frac{h}{4l z_n} \left[\frac{\partial}{\partial x} (T_n - T_n) (e^{-a_n z} \sin a_n z \pm e^{-b_n z} \sin b_n z - 2e^{-\gamma_n z} \sin \sigma_n z) + \right. \\
& \left. + \frac{\partial}{\partial x} (T_n + T_n) (e^{-a_n z} \cos a_n z + e^{-b_n z} \cos b_n z - 2e^{-\gamma_n z} \cos \sigma_n z) \right], \\
w_n = & - \frac{i \Delta T_n}{4l b_n z_n} \left[\frac{\partial}{\partial n} (1 - e^{-a_n z} \cos a_n z) - 1 + \cos b_n z e^{-b_n z} \right] - \\
& + 0 - \sin b_n z \\
& - \frac{i \Delta T_n}{4l b_n z_n} \left[\frac{\partial}{\partial n} e^{-a_n z} \sin a_n z - 0 - \sin b_n z e^{-b_n z} \right] - \\
& + 1 + \cos b_n z
\end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned}
\omega_n = & \frac{i \Delta T_n}{4l b_n z_n} \left[\frac{\partial}{\partial n} e^{-a_n z} \sin a_n z - 0 - \sin b_n z e^{-b_n z} \right] - \\
& + 1 - \cos b_n z \\
& - \frac{i \Delta T_n}{4l b_n z_n} \left[\frac{\partial}{\partial n} (1 - e^{-a_n z} \cos a_n z) - 1 + \cos b_n z e^{-b_n z} \right] - \\
& + 0 - \sin b_n z
\end{aligned} \quad (1.10)$$

Решение для температуры в случае IV совпадает с (1.6).

Здесь как и прежде верхние знаки и выражение соответствуют случаю $n\omega > l$, нижние — $n\omega < l$.

Найдем высоты, на которых элементы бриза (температура, влажность, составляющие скорости) достигают максимального значения. Эти высоты зависят, конечно, от времени. Из (1.2) имеем

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \sum_{n=1} \left(\frac{\partial \varphi_n}{\partial z} \Big|_{z_m} \cos n\omega t_\phi + \frac{\partial \varphi_n}{\partial z} \Big|_{z_m} \sin n\omega t_\phi \right) = 0, \quad (1.11)$$

Из этого выражения определяется высота, на которой элемент достигает максимума (обозначим ее через z_m) для данного фиксированного момента времени t_ϕ .

Для случая I согласно (1.3) и (1.4) имеем

$$\left. \operatorname{tg} \omega t_\phi \right|_m = \frac{\operatorname{tg} \sigma_1 z_m - 1}{\operatorname{tg} \sigma_1 z_m + 1}, \quad (1.12)$$

$$\left. \operatorname{tg} \omega t_\phi \right|_m = \frac{1 - \sigma_1 z_m (1 + \operatorname{tg} \sigma_1 z_m)}{\operatorname{tg} \sigma_1 z_m + \sigma_1 z_m (1 - \operatorname{tg} \sigma_1 z_m)}, \quad (1.13)$$

$$\operatorname{tg} \omega t_{\phi, \omega} = - \operatorname{ctg} \sigma_1 z_m. \quad (1.14)$$

Для случая II, согласно (1.3) и (1.5) получим для температуры (1.12), а для скоростей:

$$\left. \operatorname{tg} \omega t_{\phi, u} \right|_m = - \frac{a_1 e^{-a_1 z_m} \cos a_1 z_m - b_1 \cos b_1 z_m e^{-b_1 z_m}}{a_1 e^{-a_1 z_m} \sin a_1 z_m - b_1 \sin b_1 z_m e^{-b_1 z_m}}, \quad (1.15)$$

$$\operatorname{tg} \omega t_{\phi/v} = \frac{a_1 e^{-a_1 z_m} \sin a_1 z_m - 2a_1 e^{-a_1 z_m} \sin a_1 z_m + b_1 e^{-b_1 z_m} \sin b_1 z_m}{a_1 e^{-a_1 z_m} \cos a_1 z_m - 2a_1 e^{-a_1 z_m} \cos a_1 z_m + b_1 e^{-b_1 z_m} \cos b_1 z_m}, \quad (1.16)$$

$$\operatorname{tg} \omega t_{\phi/w} = - \frac{e^{-a_1 z_m} (\cos a_1 z_m - \sin a_1 z_m) - e^{-b_1 z_m} (\cos b_1 z_m + \sin b_1 z_m)}{e^{-a_1 z_m} (\cos a_1 z_m + \sin a_1 z_m) - e^{-b_1 z_m} (\cos b_1 z_m \pm \sin b_1 z_m)}. \quad (1.17)$$

Для случаев III и IV уравнения для определения $z_m = z_m(t_\phi)$ будут иметь вид (1.11). Некоторые из этих уравнений, как например, (1.12) и (1.14), решаются аналитически, остальные можно решить графически. Задаваясь различными значениями $\sigma_1 z_m$, на основании полученных формул легко построить зависимость вида

$$\omega t_\phi = f(\sigma_1 z_m). \quad (1.18)$$

По кривой (1.18), легко определить z_m .

Исходя из (1.2), можно найти момент наступления максимального значения данного элемента бриза t_m на данной фиксированной высоте z_ϕ , из выражения:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \Big|_{t=t_m} = \sum_{n=1}^{\infty} n\omega [-\psi_n(x, z_\phi) \sin n\omega t_m + \dot{\psi}_n(x, z_\phi) \cos n\omega t_m] = 0. \quad (1.19)$$

В частности, в силу (1.19) для случая I получим

$$\operatorname{tg} \omega t_{m/\phi} = -\operatorname{ctg} \sigma_1 z_\phi, \quad \omega t_m = \sigma_1 z_\phi + \pi/2, \quad (1.20)$$

$$\operatorname{tg} \omega t_{m/u} = \operatorname{tg} \sigma_1 z_\phi, \quad \omega t_m = \sigma_1 z_\phi, \quad (1.21)$$

$$\operatorname{tg} \omega t_{m/w} = \frac{1 - e^{-\sigma_1 z_\phi} [(1 + \sigma_1 z_\phi) \cos \sigma_1 z_\phi + \sigma_1 z_\phi \sin \sigma_1 z_\phi]}{e^{-\sigma_1 z_\phi} [(1 + \sigma_1 z_\phi) \sin \sigma_1 z_\phi - \sigma_1 z_\phi \cos \sigma_1 z_\phi]}. \quad (1.22)$$

Определим угол наклона α ветра, отсчитанный от нормали к берегу у поверхности земли.

Как известно, этот угол определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{u} \Big|_{z=0}. \quad (1.23)$$

Для случая I по (1.4), для случая II по (1.5) получается неопределенность. Раскрывая ее по общему способу, получаем $\alpha = 0$ для случая I. Для случая II получаем:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_1 - b_1}{(a_1 + b_1 - 2\sigma_1) \operatorname{tg} \omega t}, \quad \varphi < 30', \quad (1.24)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_1 - b_1 \operatorname{tg} \omega t}{-b_1 + (a_1 - 2\sigma_1) + \operatorname{tg} \omega t}, \quad \varphi > 0',$$

где φ — широта местности.

В первом случае когда $\alpha = 0$ бриз дует все время по нормали к берегу, днем с озера, ночью — с суши. Ветер усиливается днем, дости-

гает наибольшего значения к вечеру, затем начинает ослабевать, переходит через ноль и начинает усиливаться в обратном направлении, при этом меняется лишь величина скорости ветра, направление же останется неизменным. Наблюдения этот вывод не подтверждают.

В случае II получено $\alpha = \alpha(t)$, т. е. с течением времени изменяется не только скорость ветра, но и его направление согласно формулам (1.24). Полученные здесь результаты совпадают с данными [6].

Поступая также как и ранее, получаем для случая III $\alpha = 0$, а для случая IV:

$$\lg \alpha = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (x_n \cos n\omega t + \alpha_n \sin n\omega t)}{\sum_{n=1}^{\infty} (p_n \cos n\omega t + \beta_n \sin n\omega t)}; \quad (1.25)$$

$$x_n = \left(2 - \frac{a_n + b_n}{\sigma_n}\right) \frac{\partial T_n}{\partial x}; \quad \alpha_n = \left(2 - \frac{a_n + b_n}{\sigma_n}\right) \frac{\partial T'_n}{\partial x};$$

$$p_n = -\frac{a_n - b_n}{\sigma_n} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \beta_n = \frac{a_n - b_n}{\sigma_n} \frac{\partial T'_n}{\partial x}; \quad \varphi < 30^\circ. \quad (1.26)$$

$$x_n = \left(2 - \frac{a_n}{\sigma_n}\right) \frac{\partial T_n}{\partial x} + \frac{b_n}{\sigma_n} \frac{\partial T'_n}{\partial x}; \quad \alpha_n = \left(2 - \frac{a_n}{\sigma_n}\right) \frac{\partial T'_n}{\partial x} - \frac{b_n}{\sigma_n} \frac{\partial T_n}{\partial x};$$

$$p_n = \frac{1}{\sigma_n} \left(b_n \frac{\partial T_n}{\partial x} - a_n \frac{\partial T'_n}{\partial x}\right); \quad \beta_n = \frac{1}{\sigma_n} \left(a_n \frac{\partial T_n}{\partial x} + b_n \frac{\partial T'_n}{\partial x}\right); \quad \varphi > 30^\circ. \quad (1.26^1)$$

Определим момент наступления бриза из следующего условия

$$\left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = 0. \quad (1.27)$$

Для случая I, согласно (1.4) и (1.2), получим

$$\cos \omega t_0 = 0, \quad \omega t_0 = \pi/2. \quad (1.28)$$

Иначе говоря запаздывание хода ветра по отношению к температурному независимо от широты составляет 6 часов [6].

Для случая II согласно (1.5), имеем

$$\omega t_0 = \pi/2 \quad \varphi < 30^\circ; \quad \omega t_0 = \arctg \frac{a_1}{b_1}; \quad \varphi > 30^\circ. \quad (1.29)$$

Эти результаты также совпадают с данными [6].

Для случая III согласно (1.7), имеем

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sigma_n} \left(-\frac{\partial T_n}{\partial x} \cos n\omega t + \frac{\partial T'_n}{\partial x} \sin n\omega t \right) = 0. \quad (1.30)$$

Наконец, для случая IV согласно (1.8), имеем

$$\sum_{n=1}^{\infty} (\beta_n \cos n \omega t + \beta'_n \sin n \omega t) = 0, \quad (1.31)$$

причем β_n , β'_n имеют вид (1.26) для $\varphi < 30^\circ$ и (1.26') при $\varphi > 30^\circ$.

§ 2. Расчет бризов при синусоидальном ходе температуры поверхности (случаи I и II)

Как оговорено выше, температура подстилающей поверхности в этом случае имеет вид

$$\theta_0(x, t) = T_1(x) \sin \omega t. \quad (2.1)$$

Основной недостаток этой схемы заключается в том, что суточный ход θ_0 имеет один и тот же вид для всех x , отличается лишь амплитудой. Наблюдения не подтверждают этого. Рассмотрим схему (2.1), простую для выкладок и удобную для сравнений. Ниже будет рассмотрен случай расчета при фактическом распределении θ_0 .

Как показано в [17] из [7] $T_1(x)$ можно задать в виде гиперболического тангенса. Тогда используя наиболее характерные значения температуры поверхности воды озера Севан и суши в его бассейне, положим

$$\theta_0 = (2,8 + 2,2 \operatorname{th} \epsilon x) \sin \omega t. \quad (2.2)$$

На больших расстояниях от берега (x направлена от озера в сторону суши) получается для суши $\theta_{\text{суш}} = -5^\circ \text{C}$, в то время, как на центральных частях озера — $\pm 0,6^\circ \text{C}$, т. е. суточная амплитуда температуры суши принята равной 10°C , а поверхности воды — $1,2^\circ \text{C}$.

Имея θ_0 или

$$T_1(x) = 2,8 + 2,2 \operatorname{th} \epsilon x, \quad (2.3)$$

по (1.3) и (1.4) легко вычислить соответствующие коэффициенты для случая I и по (1.3), (1.5) — для случая II. По формуле

$$\psi = \psi_1 \cos \omega t + \psi_2 \sin \omega t \quad (2.4)$$

определяются элементы бриза.

При числовых расчетах примем

$$\lambda = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м сек}^{-1} \text{ град}^{-1}; k = 3,64 \text{ м}^2 \text{ сек}^{-1};$$

$$\epsilon = 10^{-4} \text{ м}^{-1}.$$

Тогда по формуле (2.7) из [7] при $n=1$ получим

$$\sigma_1 = 0,316 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}.$$

Необходимые для расчета величины представлены в табл. 1.

Результаты расчета для случаев I и II представлены на рисунках 1—6.

На рис. 1 представлены профили; а на рис. 2 — суточный ход отклонений температуры на берегу (δ) и на расстоянии 0,5 км от берега по обе его стороны — над озером (α) и над сушей (α). Для цен-

Таблица 1

Температура поверхности и ее производные для различных точек

x	-2,0	-1,0	-0,5	-0,1	-0,01	0	0,01	0,1	0,5	1,0	2,0
$x, \text{ км}$	-20	-10	-5	-1	-0,1	0	0,1	1	5	10	20
$T_1, ^\circ\text{C}$	0,68	1,20	1,78	2,58	2,78	2,80	2,82	3,02	3,82	3,88	4,92
$\partial T_1 / \partial x \cdot 10^4$	0,15	0,92	1,73	2,18	2,20	2,20	2,20	2,18	1,73	0,92	0,15
$\partial^2 T_1 / \partial x^2 \cdot 10^8$	0,299	1,410	1,600	0,436	0,044	0,0	-0,044	0,436	-1,600	-1,410	-0,299

Таблица 2

Суточный ход температуры подстилающей поверхности в различных пунктах в $^\circ\text{C}$

$x, \text{ км}$	в часах											
	7	9	11	13	15	17	19	21	23	1	3	5
-23	-0,4	-0,2	0,4	0,7	0,8	0,4	0,1	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,6
-0,6	-0,6	0,1	0,7	0,9	1,0	0,8	-0,1	-0,2	-0,3	-0,6	-0,8	-0,9
-0,1	-0,7	0,2	0,9	1,3	1,1	0,6	-0,1	-0,3	-0,4	-0,7	-0,9	-1,0
0,1	-7,4	0	8,5	13,6	13,2	9,0	-0,6	-3,8	-5,9	-7,4	-9,6	-9,6
10	-5,4	4,0	13,0	15,0	15,5	5,0	-2,9	-6,5	-8,6	-9,3	-10,3	-10,4

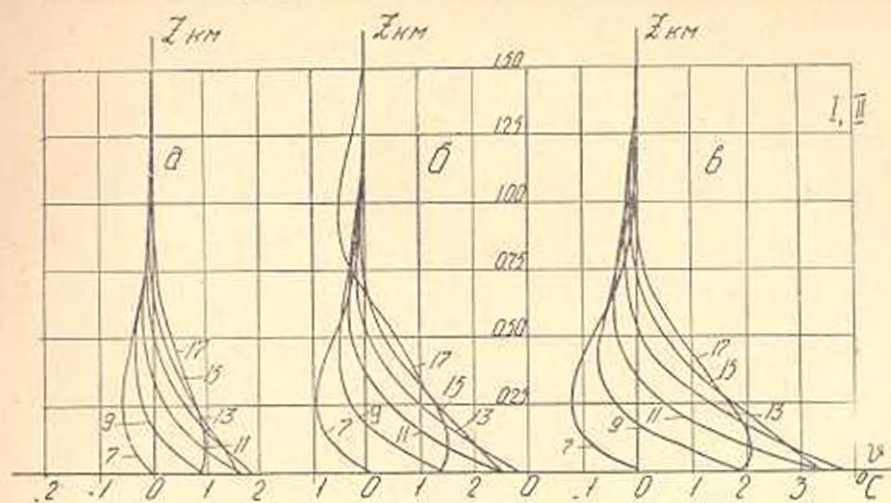


Рис. 1. Температурные кривые в различные часы суток. а—озеро; б—берег; в—суша.

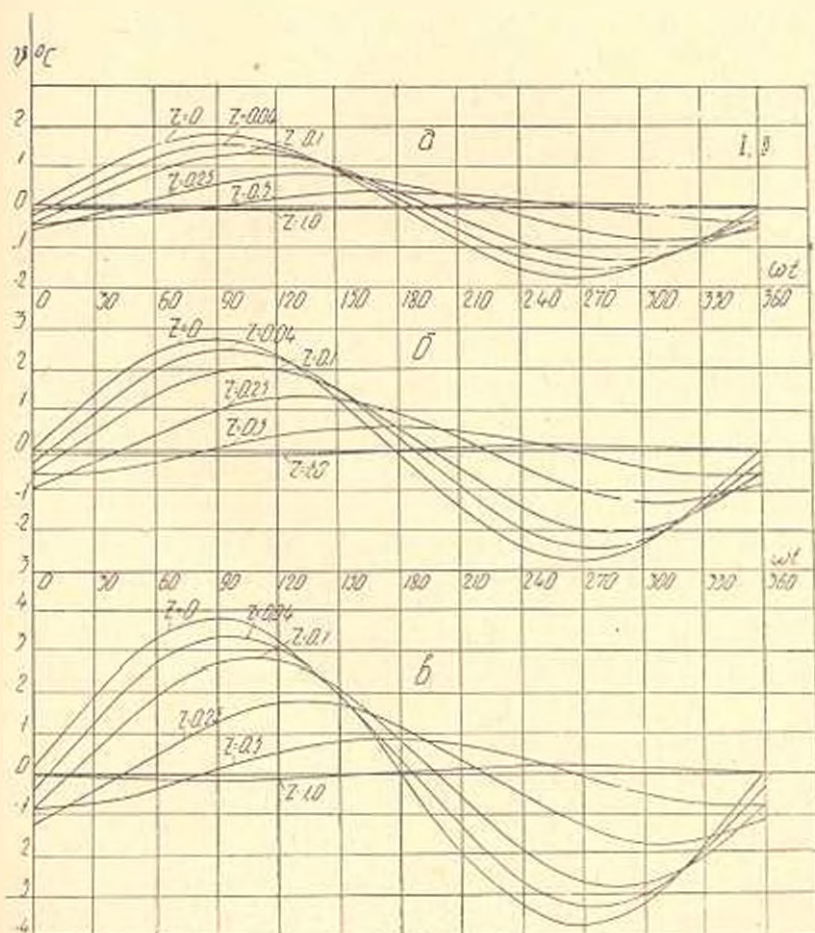


Рис. 2. Суточный ход температуры на различных высотах.

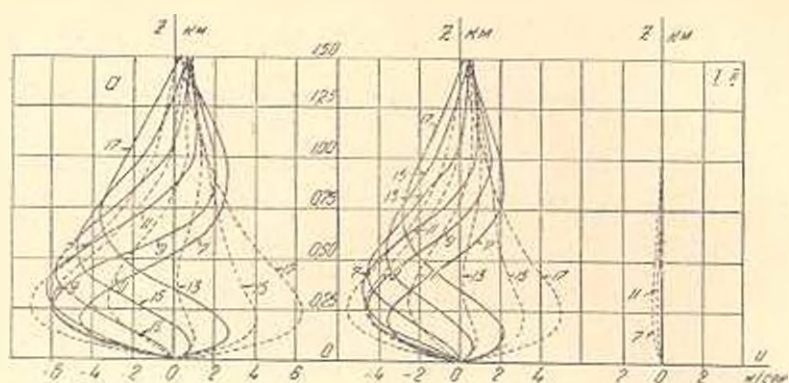


Рис. 3. Профили скорости u в пунктах наблюдения. Сплошные кривые при $l=0$; пунктирные — при $l \neq 0$.

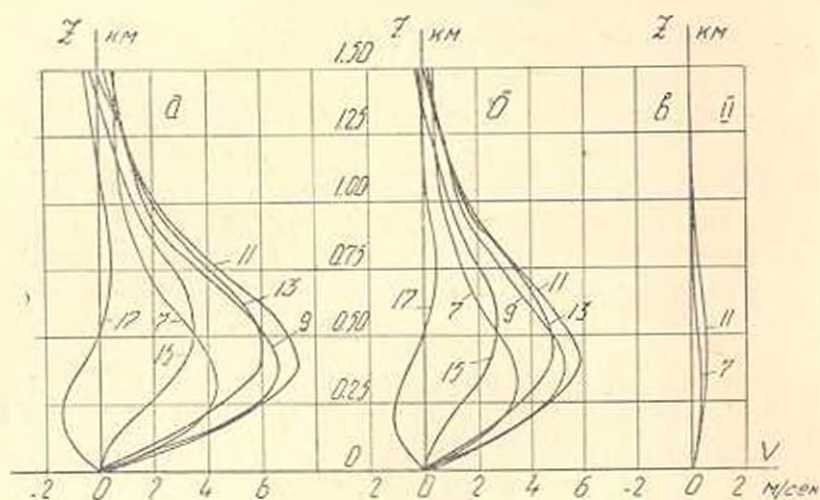


Рис. 4. Профили скорости v в пунктах наблюдения при $l \neq 0$.

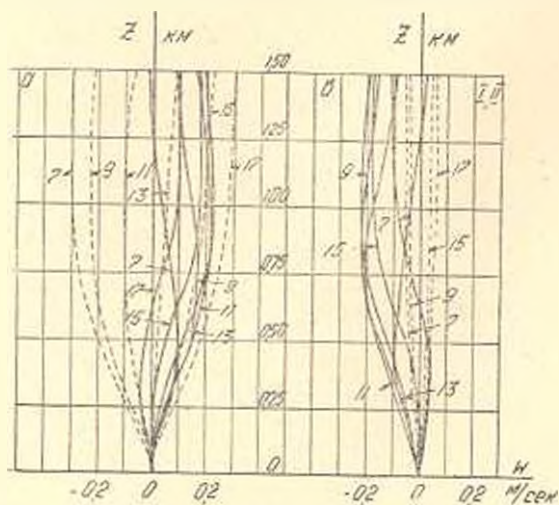


Рис. 5. Изменение вертикальных токов на различных высотах пунктов наблюдения.

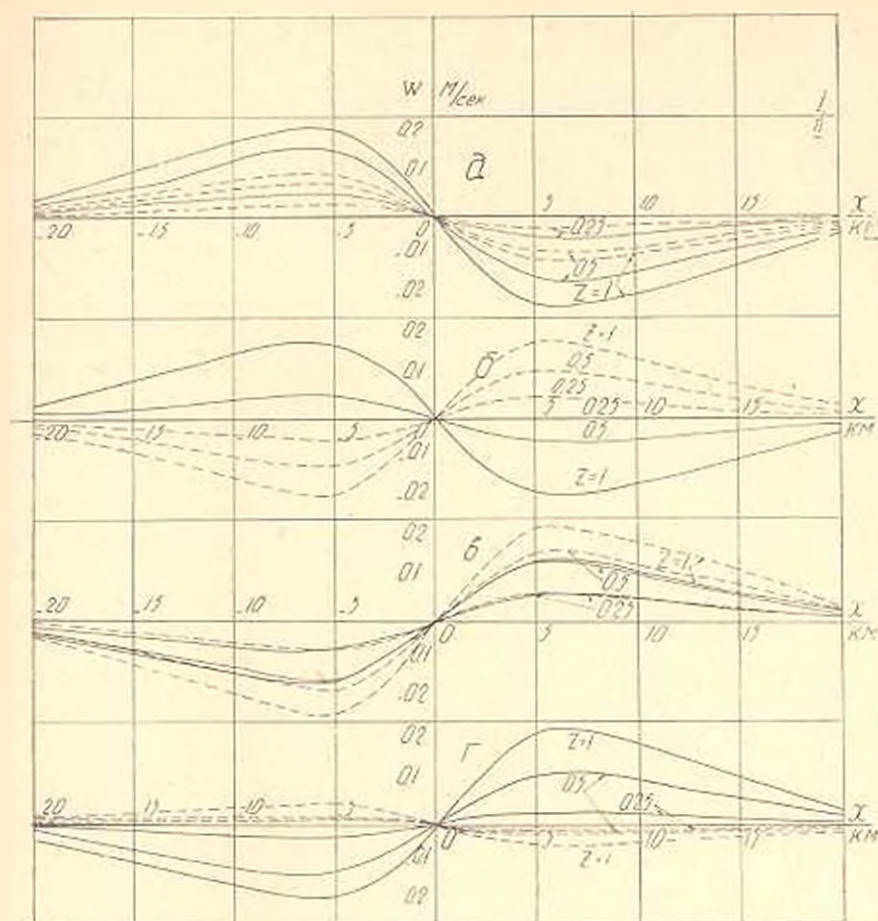


Рис. 6. Изменение вертикальных токов на различных высотах при $t=0$ (сплошные линии) и $t \neq 0$ (пунктирные линии) в моменты времени: а — 11 часов, б — 15 часов, в — 21 час, г — 1 час ночи.

тральных частей озера графики имеют такой же вид, но со значительно меньшими амплитудами отклонения, что легко усмотреть из данных табл. 1. На рисунках 3—5 представлены профили составляющих скорости ветра в различные моменты времени, а на рис. 6 — развитие вертикальных токов в пространстве и во времени. На графиках сплошные кривые (кроме рис. 4) соответствуют случаю $I=0$, а пунктирные — случаю, когда учитывается ускорение Кориолиса.

§ 3. Расчет бризов по фактическому распределению температуры подстилающей поверхности (случаи III и IV)

В летнее время, в дни хорошо развитой бризовой циркуляции на оз. Севан, были организованы специальные экспедиционные работы с целью изучения трансформации воздушного потока при переходе с суши на воду и наоборот.

Были выбраны следующие пять пунктов наблюдений: суточная станция в центральной части Большого Севана, в 23 км от берега, где стоял на дрейфе катер; специально оборудованный плот, на расстоянии 0,6 км от берега; плот в прибрежной мелководной части; на суше, недалеко от берега, с растительным покровом (территория лишь недавно вышла из-под воды озера, в связи со снижением его уровня) и, наконец, вдали от озера, на расстоянии почти 10 км от берега. Эти пункты были расположены на прямой—в створе центр озера—село Мазра.

В указанных пунктах проводились одновременные двенадцатичасовые наблюдения, во время которых измерялись температура воды, величина и направление скорости ветра, температура и влажность воздуха, фиксировалась облачность и т. д., причем каждое наблюдение проводилось непрерывно в течение часа. В двух пунктах—на плоту и на берегу были установлены мачты, высотой 12 м, на которых были смонтированы электроконтактные анемометры на высотах 0,5; 1; 2; 4; 8; и 12 м, показания которых записывались самописцами. Это давало возможность изучать распределение скорости ветра и слое до 12 м причем отдельно рассматривались профили ветра для различных его направлений. Скорость ветра в пунктах, где не было градиентных мачт, измерялась ручным анемометром, установленным на высоте 2 м, причем ручные и электроконтактные анемометры, а также другие приборы проверялись до наблюдений.

Полученные синхронные данные температуры поверхности осреднялись с целью получения среднего суточного хода отклонений температуры при развитой бризовой циркуляции, когда другие местные ветры (фöhn, горнодолинные) и общий поток мало влияли на эту циркуляцию. Полученные данные приведены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что суточный ход температуры поверхности существенно различен в различных пунктах, поэтому нельзя этот ход принимать подобным во всех точках оси x , как это сделано в случаях I и II. Здесь явно видно, во-первых, что суточная амплитуда колебаний наибольшая для суши, вдали от берега и наименьшая—для центральной глубоководной части озера. Во-вторых, если максимальная температура в Мазре ($x = 10^4$ м) наступает в 12—13 часов, на берегу—13—14 часов, то в центре озера—в 15 часов и позже. В остальных точках максимум наступает между 12 и 16 часами, причем это запаздывание закономерно увеличивается при движении в обратном направлении оси x . Мы задались целью определить влияние этого фактора на развитие бриза. Для этого каждая строка табл. 2 была разложена в ряд Фурье по времени, а полученные таким обра-

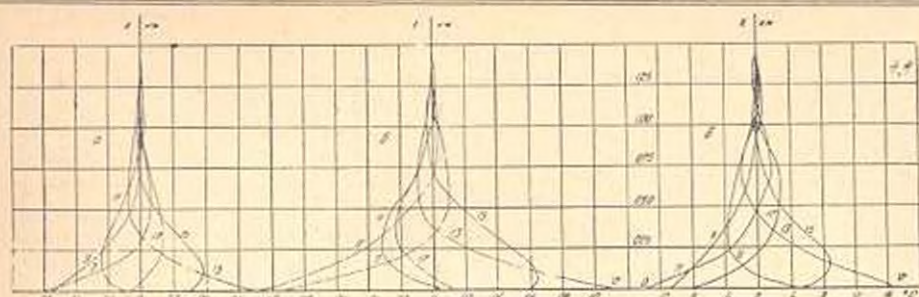


Рис. 7. Отклонения температуры в пунктах наблюдения: а — озеро; б — берег; в — суша.

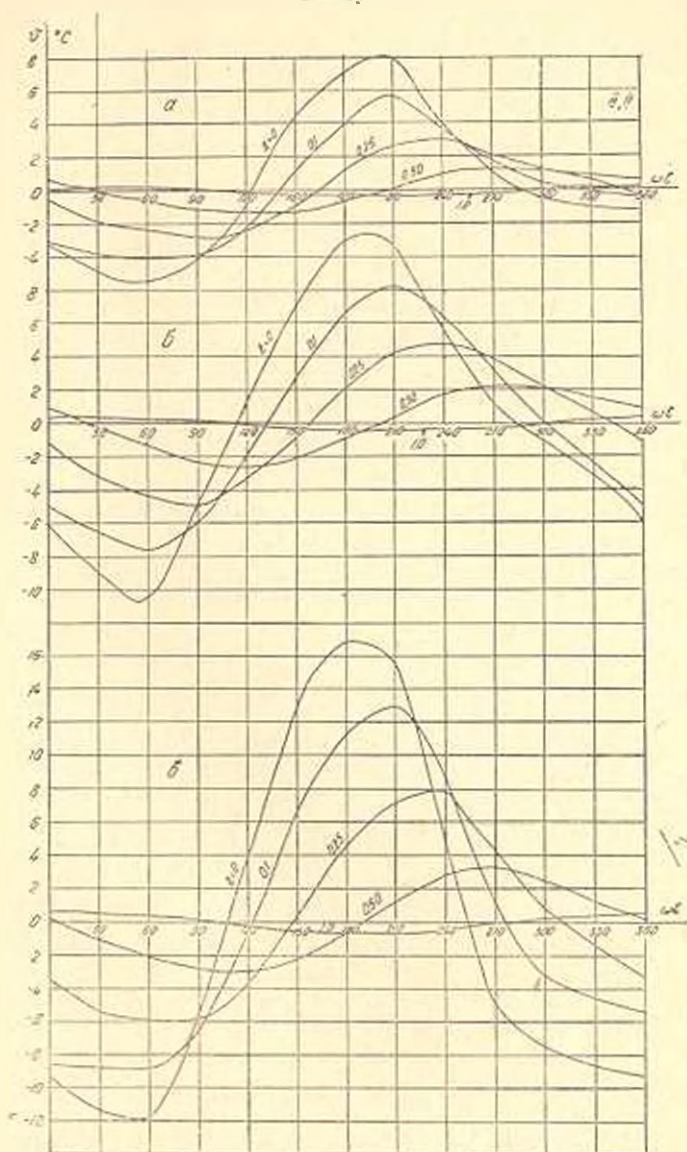
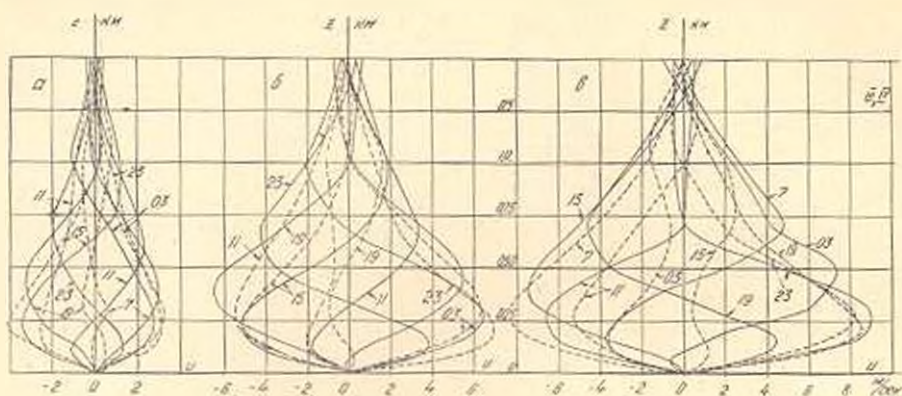


Рис. 8. Графики температуры на различных высотах пунктов наблюдения.



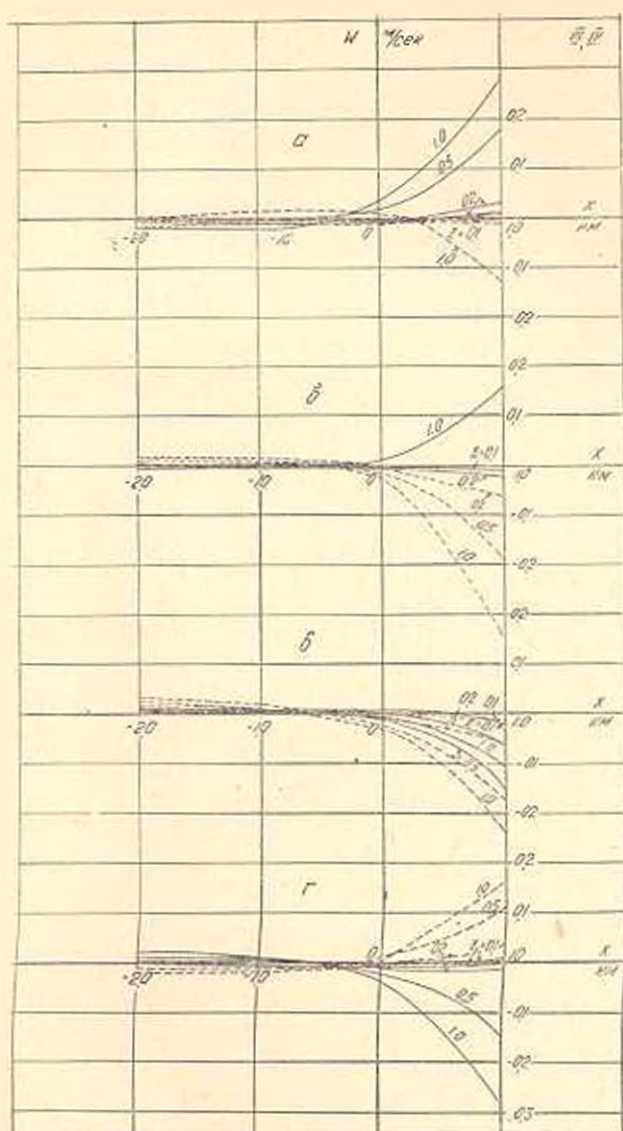


Рис. 12. Изменение вертикальных токов на различных высотах по горизонтали в моменты времени: а—11 часов; б—15 часов; в—21 час; г—1 час ночи.

зом коэффициенты $T_n(x)$ и $T_n^*(x)$, зависящие от x — разложены в ряд по x . Для расчетов было взято $n=12$. Полученные результаты сводились в специальные таблицы с двумя входами (n и x) и были использованы в примерах расчета, соответствующих случаям III и IV. Результаты расчетов приведены на рисунках 7—13.

§ 4. Краткий анализ полученных результатов

1. Как показывают графики на рисунках 1, 3—5, бриз охватывает слой немногим более километровой высоты. На высотах имеется

течение обратного направления, правда с меньшими скоростями. Вертикальные токи хотя и не затухают с высотой, но обнаруживают максимум на некоторых высотах, различных в различные моменты времени. Для отрицательных значений x (над озером) картина для u повторяется как по величине, так и по направлению, в то время, когда для w величины совпадают, а направление — обратное.

На рис. 3 и 4 хорошо видно, как бриз быстро затухает при удалении от берега. Рис. 6 показывает, что вертикальные токи изменяют свой знак над самой береговой чертой, где они обращаются в ноль.

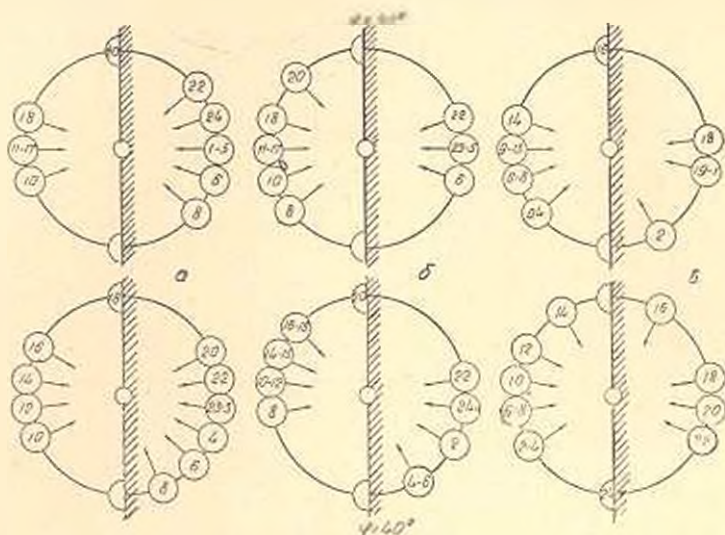


Рис. 13. Суточный ход направления ветра в пунктах наблюдения (а—озеро, б—берег, в—суша). В кружочках указано время в часах.

2. Сравнение этих рисунков показывает, что даже в простом случае (случай I) видна роль ускорения Кориолиса. Пунктирные кривые на рис. 3, 5 и 6 и график на рис. 3 значительно более близки к действительности, чем сплошные.

Появление составляющей скорости v по оси y является следствием учета ускорения Кориолиса. Правда, и в случае I можно было получить $v \neq 0$ за счет того, что береговая черта не прямая и производные по y отличны от нуля. Но все же поворот бриза и зависимости от времени в основном объясняется влиянием ускорения Кориолиса. Такая же картина получается и при более точном учете температуры подстилающей поверхности. В этом случае соответствие с фактическими данными значительно лучше.

3. Как показывают (1.28) и (1.29), запаздывание хода ветра от хода температуры составляет 6 часов для случая I и для случая II при $\varphi < 30^\circ$, независимо от широты. При $\varphi > 30^\circ$ запаздывание зависит от широты. Для условий озера Севан запаздывание получается равными 4 ч. 40 мин.

4. Угол наклона ветра у поверхности земли для случаев I и III $\alpha = 0$, для случаев II и IV этот угол определяется по (1.24) и (1.25).

5. Перепишем формулу (3.7) из [7], подставляя значение l . Пользуясь (2.7) из [7], получим

$$b_n = a_n \sqrt{1 - \frac{2}{n} \sin \varphi} \quad (4.1)$$

Как показывает (4.1) для всех $n \geq 2$ b_n имеет действительное значение на всех широтах. Это означает, что все волны с $n \geq 2$ с высотой затухают, кроме волны с $n=2$ на полюсе, где $\varphi=90^\circ$ и $b_n=0$. При $n=1$ (суточная волна) $b_n=0$ при $\varphi=30^\circ$. Этот результат был получен в [6] и верен лишь для волны с суточным периодом.

6. Момент наступления бриза для случая III определяется из (1.30), для случая IV — из (1.31).

Полученные формулы показывают любопытный результат. Момент наступления бриза и угол наклона нетра зависят от x . Этот результат не мог быть получен в случае I — простейшей схеме представления температуры подстилающей поверхности в виде одной синусоиды с амплитудой, зависящей от x . Расчеты показывают, что $t_0=6$ часов для случая I по всей оси x . В случае III бриз сначала возникает на суше, затем на озере и на берегу почти одновременно. Для случая I $\neq 0$ момент наступления бриза зависит от φ и x .

Расчеты показывают, что наилучшее совпадение с наблюдениями имеет место в случае IV. Здесь бриз возникает на суше почти на 2 часа раньше, чем на озере и еще через час он появляется на берегу.

7. Вычисленные значения угла наклона α в случае IV представлены на рис. 13 для условий озера Севан ($\varphi=40^\circ$) и по данным озера Севан, но при другой широте ($\varphi=20^\circ$). Как показывает график, явно выраженный озерный бриз имеет место с 10 до 16 часов, береговой бриз — с 22 до 6 часов. Если на берегу ветер дует вдоль берега в 20 и 7 часов, то на озере ветер имеет указанное направление в 18 и 9 часов, а на суше в 15 и 24 часов.

8. Наибольший интерес представляют результаты расчетов вертикальных токов (рис. 6 и 12). Если сравнение случаев I с II (рис. 6) и случаев III с IV (по фактической температуре, рис. 12) указывает на влияние ускорения Кориолиса, приводящего, лишь к некоторому сдвигу картины во времени, то сравнение случаев I с III ($l=0$) или случаев II с IV ($l=0$) приводит к выяснению роли более точного учета температуры подстилающей поверхности. В этом последнем случае (рис. 12) перемена знаков вертикальных токов, направленных вниз над озером и вверх над сушей днем и, наоборот, вверх над озером и вниз над сушей ночью, происходит не над самой береговой чертой, как это было в случаях I и II (рис. 6), а над озером. Кроме того, вертикальные токи над сушей по величине значительно превосходят таковые над озером. Это дает объяснение довольно интенсивному облакообразованию днем над сушей, тогда как над озером ночью наблюдается слабое развитие об-

лаков. Этот факт подтверждается прямыми наблюдениями в бассейне озера Севан.

9. Хотя вертикальные токи с высотой не затухают (порядок системы уравнений не позволяет налагать на них такое условие), а стремятся к некоторому пределу, все же они обнаруживают максимальные значения на конечных высотах, различных для разных моментов времени. По-видимому на этих высотах и происходит интенсивное развитие облаков.

В заключение отметим, что учет ускорения Кориолиса и более точного распределения температуры подстилающей поверхности позволяет получить ряд выводов, хорошо согласующихся с наблюдениями.

Институт водных проблем
Академии наук Армянской ССР

Поступило 31.VII 1952

Ա. Մ. ՄԽԻՏՅԱՆ

ՍԵՎԱՆԱ ԼՃԻ ԱՎԱՋԱՆԻ ՈՐԻՋՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ, ԵՎ ԾԱԾԿՈՒՅԹԻ
ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ԻՐԱԿԱՆ, ԲԱՇԽԵՄԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ ՆՐԱՆՑ ՀԱՇՎՄԱՆ
ՄԻ ՔԱՆԻ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԸ

(Հաղորդում 2)

Ա մ փ ո լ ի ու մ

Հոդվածում բերվում է [7]-ում լուծված խնդրի օրինակների հաշվարկը Դիտարկված են հետևյալ 4 դեպքերը: Առաջին և երկրորդ դեպքում ծածկույթի ջերմաստիճանը տրվում է (1.1) սլարդ տեսքով, իսկ III և IV դեպքերում՝ Ֆուրյեի շարքերի տեսքով, հիշելով դիտումների արդյունքից, բնորոշում I և III դեպքերում արհամարքում է Կորիոլիսի արագացումը, իսկ II և IV դեպքերում այն հաշիվի է առնվում: Հաշվարկի բանաձևերը I դեպքի համար ունեն (1.3) — (1.4) տեսքը, II-ի համար՝ (1.3), (1.5), III-ի՝ (1.6), (1.7), IV-ի՝ (1.6), (1.8) — (1.10), (1.11) բանաձևի միջոցով որոշվում է ժամանակի տվյալ մոմենտի համար այն բարձրությունը, որտեղ բրիզի էլեմենտը ունի իր մեծագույն արժեքը, (1.19)-ով՝ ժամանակի մոմենտը տվյալ բարձրության համար, (1.24), (1.25) բանաձևով որոշվում է բամու թևբույլյան անկյունը, իսկ (1.29), (1.30), (1.31)-ով՝ նրա ծագման ժամկետը:

Ծածկույթի ջերմաստիճանի (2.2) և (2.3) տեսքի դեպքում կատարված են հաշվարկներ, արդյունքները ներկայացված են ջերմաստիճանի պրոֆիլի և օրական ընթացքի համար դժ. 1 և 2-ի վրա, բամու հորիզոնական և ուղղահայթ բաղադրիչների համար՝ 3—6-ի վրա: Հաշվարկների արդյունքներն այն դեպքում, երբ ծածկույթի ջերմաստիճանը վերցվում է փաստական դիտումների արդյունքների հիման վրա, որոնք բերված են աղյուսակ 2-ում, ներկայացված են դժ. 7—13-ի վրա: Արդյունքները ցույց են տալիս, որ այն դեպքում, երբ իրականությանը համապատասխան ծածկույթի ջերմաստիճանի օրական ըն-

թաղեր վերցվում է տարրեր նրա տարբեր կետերում, հնարավոր է լինում ստանալ բրիզային ցիրկուլացիայի զարգացման պրոցեսի մի շարք առանձնահատկություններ, որոնք չեն ստացվում, երբ ջերմաստիճանը տրվում է սխեմատիկ ձևով:

Վերջում բերվում են հիմնական եզրակացությունները, ըստ որոնց պարզվում է, որ Կորիոլիսի արագացման հաշվի առնելը բերում է որակապես ավելի լավ արդյունքների, չնայած նրկույթի մասշտաբի փոքրությունը:

Ընդհանուր սխեմայի դեպքում իրական պատկերին շատ մոտ են ստացվում և ուղղաձիգ հոսանքները, որոնց հետ կապված են ամպառաջացման պրոցեսները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Буз А. М. К вопросу о влиянии береговой линии на воздушные течения и распределение осадков. Сб. по региональной синоптике, Вып. 5, II., 1960.
2. Бурман Э. А. К вопросу о распределении вертикальных токов при бризах. Тр. ОГМИ, вып. 5, 1953.
3. Воронцов П. А. Вертикальные движения над озером Севан. Тр. ГГО, вып. 78, 1958.
4. Воронцов П. А. Некоторые особенности термического и ветрового режима над озером Севан. Тр. ГГО, вып. 78, 1958.
5. Воронцов П. А. Температурный режим озера Севан по метеорологическим исследованиям. «Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме», т. I, Изд. АН Армянской ССР, Ереван, 1961.
6. Гутман Л. Н. О структуре бризов. Тр. ИИП, вып. 8, 1948.
7. Мхитарян А. М. О бризах и бассейне озера Севан и некоторые результаты их расчета по фактическому распределению температуры подстилающей поверхности. Сообщение I. «Известия АН Армянской ССР», сер. III, № 5, 1962.
8. Николаев Н. Г. Ветры в бассейне озера Севан. Материалы по исследованию озера Севан, ч. III, 1933.
9. Селезнева Е. С. О происхождении местных северо-восточных ветров в бассейне озера Севан. Тр. ГГО, вып. 78, 1958.
10. Тимофеев М. П. (ред.) Метеорологический режим озера Севан. Гидрометиздат. 1950.