

ГИДРАВЛИКА

Г. М. ТОРГОМЯН

ТЕЧЕНИЯ ОЗЕРА СЕВАН

По построенным для августа полям температуры воды и ветра были рассчитаны уровенная поверхность и течения озера Севан. Согласно расчетам, летом озеро Севан отличено двумя циклическими круговоротами, существующими на всех глубинах.

Научное и практическое значение изучения течений в озере Севан определяется важной ролью, которую играют они во многих физических, химических и биологических процессах, протекающих в озере. В будущем озеро Севан станет одним из туристических центров СССР, возрастет количество сбросных и водозаборных сооружений, при проектировании которых необходимо учитывать существующие в озере течения.

В имеющихся трудах [1, 3, 4], посвященных гидрологии и термике озера Севан, почти не освещен вопрос о течениях, что объясняется значительными трудностями их измерений. В то же время накоплены многочисленные данные измерений температуры воды на рейдовых вертикалях [3]. Хорошо изучен ветровой режим над озером [1]. Бароклинная модель А. С. Саркисяна [5, 6] позволяет, пользуясь этими данными, рассчитать течения в озере Севан.

Модель наиболее полно учитывает основные факторы, формирующие циркуляцию в водоеме: поле ветра над озером; плотностную неоднородность воды; рельеф дна и береговое очертание; отклоняющее действие силы Кориолиса.

В первом приближении, в гидродинамических уравнениях Павье—Стокса пренебрегаем инерционными членами и боковым турбулентным обменом. Так как инерционные члены всего лишь на порядок меньше основных и могут играть заметную роль в прибрежных сильных течениях, желателен их учет при будущих расчетах. В результате решения системы дифференциальных уравнений, описывающих движение воды в водоеме, получены расчетные формулы:

$$u = \frac{e^{-\lambda z}}{2\lambda\rho_0\nu} \{(\tau_x + \tau_y)\cos\lambda z + (\tau_y - \tau_x)\sin\lambda z\} -$$

$$\frac{1}{\rho_0 l} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{e^{\lambda(z-H)}}{\rho_0 l} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_H \sin\lambda(z-H) + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_H \cos\lambda(z-H) \right];$$

$$v = -\frac{e^{-\lambda z}}{2\lambda\rho_0\nu} \{(\tau_x - \tau_y)\sin\lambda z - (\tau_y + \tau_x)\cos\lambda z\} +$$

$$+ \frac{1}{\rho_0 l} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{e^{i(z-H)}}{\rho_0 l} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)_{II} \sin z (z-H) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{II} \cos z (z-H) \right], \quad (1)$$

где u , v — составляющие скорости течения по осям x , y прямоугольной системы координат (ось x направлена на восток, y — на север,

z — вертикально вниз); $\alpha = \sqrt{\frac{l}{2\tau}}$; $l = 2\alpha \sin z$ — параметр Карриолеса;

τ — коэффициент вертикального турбулентного обмена, принятый в расчетах $1 \text{ см}^2 \text{ сек}$; z — широта места; ρ_0 — среднее значение плотности воды, принятое равным 1 г/см^3 ; τ_x , τ_y — составляющие касательного напряжения ветра; H — глубина;

z_0 — приведенная уровня поверхность водоема;

σ — аномалия плотности воды, определяемая как $\sigma = \sigma_1 - \sigma_0$;

P — аномалия давления:

$$P = \rho_0 \kappa^2 + g \int_0^z \sigma dz. \quad (2)$$

В уравнениях (1) первые слагаемые определяют составляющие дрейфового течения, вторые — градиентного. Именно при расчете градиентного течения проявляется различие между основными моделями циркуляции. В баротропной модели пренебрегают неоднородностью воды по горизонтали, т. е. при расчетах градиентов давления пренебрегают производными типа $\partial \sigma_x / \partial x$, $\partial \sigma_y / \partial y$. При этом уровенная поверхность z_0 формируется, в основном, за счет ветра. В бароклинной же модели учитывается изменение плотности в горизонтальном направлении, и z_0 определяется как полем ветра, так и полем плотности воды.

Расчет z_0 наиболее трудный этап определения гидрологических характеристик водоема, так как приходится решать дифференциальное уравнение эллиптического типа с неоднородными граничными условиями [6.7].

$$\frac{1}{2\alpha} \Delta^2 z_0 - \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial z_0}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial z_0}{\partial y} =$$

$$\frac{1}{\rho_0 g} \left(\frac{\partial \tau_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau_y}{\partial y} \right) - \frac{1}{2\tau \rho_0} \int_0^H \Delta \sigma dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \int_0^H \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dz - \frac{\partial H}{\partial x} \int_0^H \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dz \right), \quad (3)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ — оператор Лапласа.

Значения уровенной поверхности на границе определяются из системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_r}{\partial x} \left(1 - \frac{1}{2\gamma H}\right) - \frac{1}{2\gamma H} \frac{\partial \tau_r}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0 H} \int_0^H (H-z) \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \\ - \frac{1}{\rho_0 g H} \tau_x - \frac{1}{2\gamma H} \left(\int_0^H \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \int_0^H \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \right); \\ \frac{\partial \tau_r}{\partial y} \left(1 - \frac{1}{2\gamma H}\right) + \frac{1}{2\gamma H} \frac{\partial \tau_r}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0 H} \int_0^H (H-z) \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \\ + \frac{1}{\rho_0 g H} \tau_y + \frac{1}{2\gamma H} \left(\int_0^H \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \int_0^H \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Алгоритм и численный метод решения уравнений (3) и (4) достаточно подробно описан в [5, 7]. Выбраны следующие шаги сетки: по вертикали 5 м, по горизонтали 2 км. В районе пролива шаг по горизонтали взят вдвое мельче—1 км.

Коротко остановимся на исходных данных, по которым велся расчет. Для августа, по данным ежедневно-каждых измерений температуры воды на 15 вертикалях, проведенных Севанской ГМО в 1963—1970 гг. [3], были построены среднемноголетние изотермы на 13 расчетных горизонтах: 0; 5; 10; ...; 60 м. Определение поля плотности по полю температуры для пресной воды не представляет трудности. Летом над Севаном преобладает восточный тип циркуляции ветра со скоростями 3—4 м/сек [4]. Касательные напряжения определялись по формулам:

$$\tau_x = \gamma W^2 \cos^2 \beta; \quad \tau_y = \gamma W^2 \sin^2 \beta, \quad (5)$$

где $\gamma = 8 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^2$; W —скорость ветра; β —угол между направлением ветра и осью x .

Очертание береговой линии и рельеф дна совмещались с подробной батиметрической картой [2] с учетом понижения уровня озера на 17 м (современное состояние).

В результате решения уравнения (3) с граничными условиями (4) была получена поверхность τ , которая приводится на рис. 1, где стрелками указаны направления градиентных течений на поверхности озера. Как видно из рис. 1, градиентные течения образуют два отдельных циклонических круговорота. На рис. 2 представлена суммарная скорость на поверхности. Если в Малом Севане дрейфовая часть преобладает над градиентной и течения направлены по северо-восточному ветру, то в Большом Севане уже заметно циклоническое вращение. С глубиной дрейфовые течения быстро затухают, и уже на 5—10 м картина определяется исключительно градиентной частью. На рис. 3 приводится карта течений на глубине 10 м. Хорошо видны циклонические круговороты Малого и Большого Севанов. Наиболее интенсивные течения получились

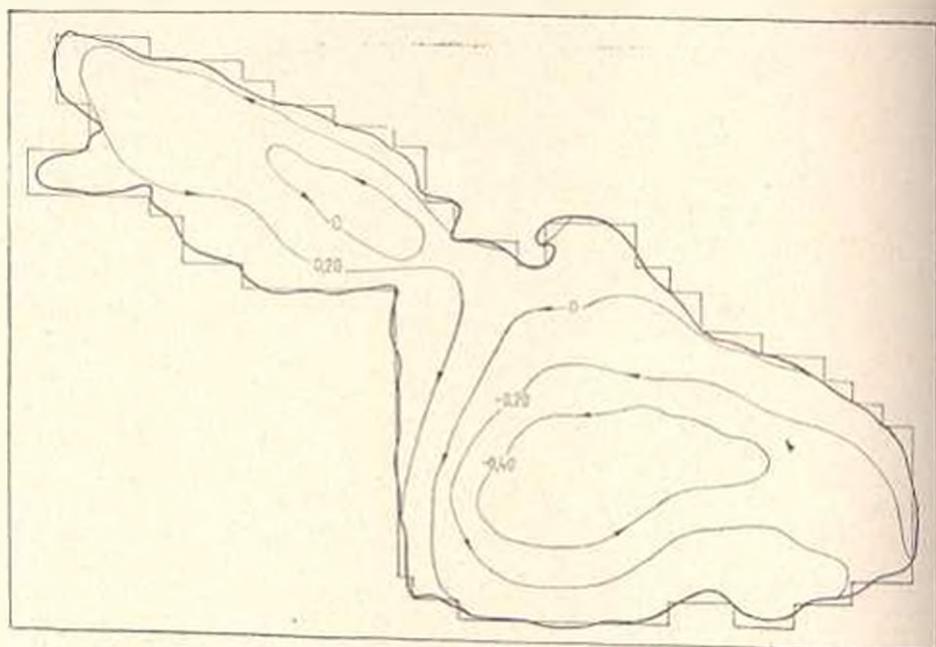


Рис. 1. Приближенная урвненная поверхность $z(x, y)$ в м, полученная путем решения уравнения (3)

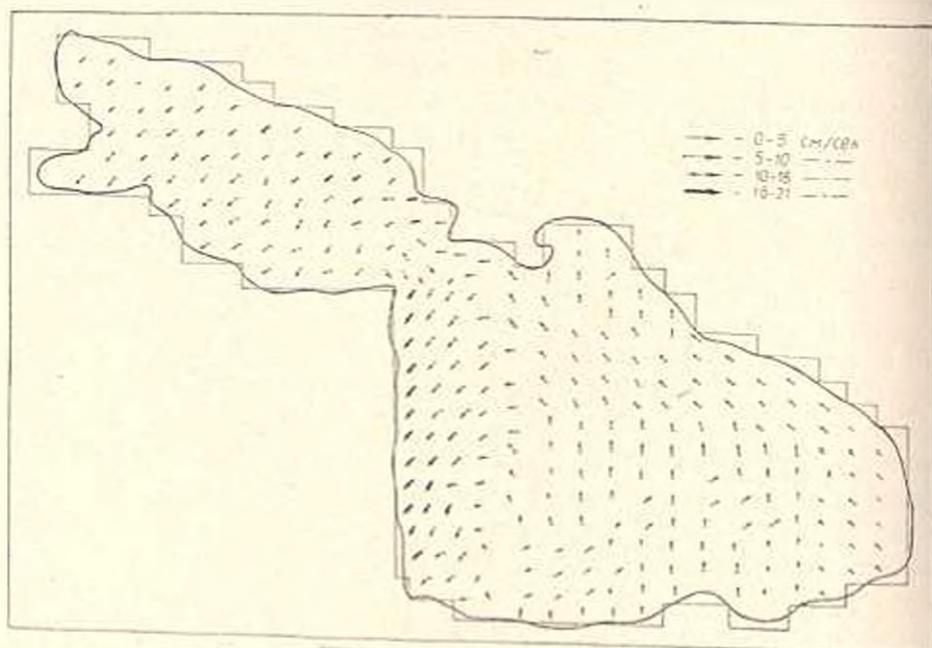


Рис. 2. Рассчитанные течения на поверхности

вдоль западного берега Большого Севана и в проливе, где скорости достигают до 15 см/сек, тогда как, в среднем, скорость на глубине 10 м составляет 5—7 см/сек. Основной инклинционный круговорот сохраняется на всех глубинах, а с 10 м начинают формироваться несколько антициклонических колец (в юго-восточной части Большого Севана, в Арташешском заливе, в Малом Севане).

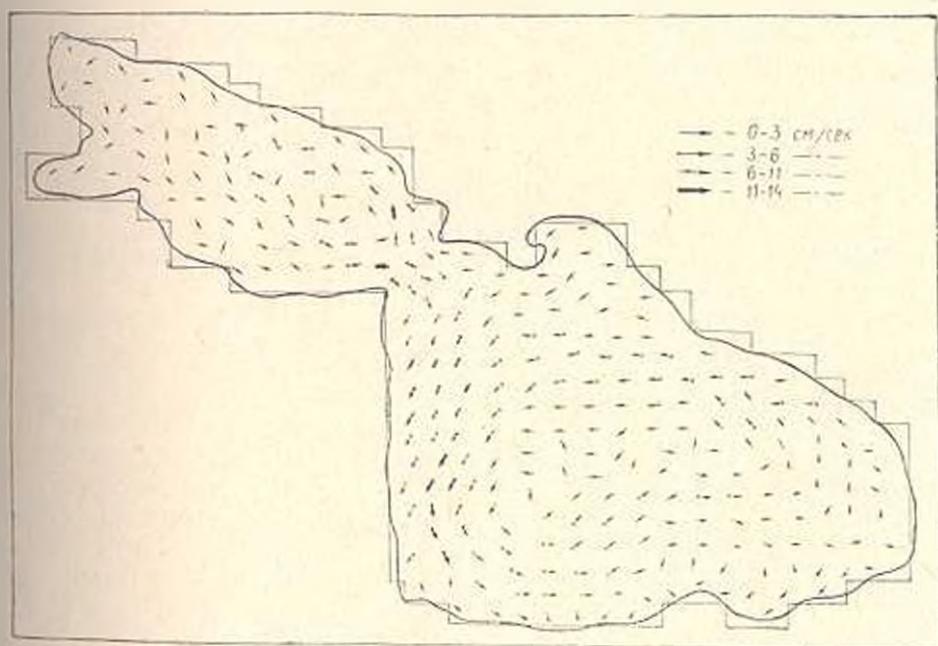


Рис. 3. Рассчитанные течения на глубине 10 м

При циклоническом вращении в центральной части озера происходит выдавливание холодных глубинных вод наверх, что качественно объясняет существование хорошо известного из наблюдений «купола» холодной воды.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными немногочисленных измерений [1] и вполне реальны с географической точки зрения, что говорит о возможности расчета циркуляции во внутренних подложах по бароклинной модели.

Գ. Մ. ԹՈՐՈՄՅԱՆ

ՍԵՎԱՆԻ ԼՃԻ ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Հողվածում բերված են Սևանա լճում հոսանքների դիագնոստիկական հաշվարկների արդյունքները: Հաշվարկներում օգտագործված է ջրի խտության միջին դաշար օգոստոսին, որը կառուցված է բառ դիտումների:

Համաձայն այդ հաշվարկների ամռանը Սևանում դերակշռում է բավական ինտենսիվ՝ 10—15 սմ/րկ արագությամբ, ցիկլոնիկ գիրկուլացիա, որը սլայմանավորված է ջրի հորիզոնական անհամասեռությամբ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Либунд М. М.* Об особенностях термического режима и приливе между Б. и М. Севаном. «Известия АН АрмССР, Науки о Земле», 1964, т. 17, № 1.
2. *Киреев А. И.* Гидрографические работы на озере Севан. «Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна», ч. 5, вып. 1, Редиздат ЦУМЕТМС, Л., 1933.
3. Материалы наблюдений над озером Севан за 1961—1965 гг. Тбилиси, 1970.
4. Метеорологический режим озера Севан. Под ред. М. И. Тимофеева. Л., Гидрометеоиздат, 1960.
5. *Саркисян А. С.* Основы теории и расчет океанических течений. Л., Гидрометеоиздат, 1966.
6. *Саркисян А. С.* О недостатках баротропных моделей океанической циркуляции. «Известия АН СССР Физика атмосферы и океана», т. 5, № 8, 1969.
7. *Саркисян А. С., Ажигов Т. З.* Численная модель и расчет течений в Черном море. «Метеорология и гидрология», № 3, 1974.