

УДК 551.589

Ш. А. МУСАЕЛЯН, Е. М. ПЕКЕЛИС

О КИНЕМАТИКЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НАД СЕВАНО-ГЕГАМСКОЙ СИСТЕМОЙ ОРОГРАФИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Проблема обтекания воздушным потоком такого высокогорного озера как Севан является весьма актуальной и вместе с тем очень трудной. Ее актуальность настолько очевидна и общеизвестна, что навряд ли стоит о ней подробно говорить в небольшой статье. Что же касается трудностей, с ней связанных, то их несколько. Во-первых, сама проблема является, строго говоря, сугубо нелинейной. Во-вторых, нет достаточно подробных данных наблюдений как над самим Севаном, так и над его окрестностью. Эти данные необходимы не только для решения рассматриваемой проблемы, но и для проверки полученных результатов. Существует и ряд других трудностей. Даже если ценой значительных упрощений ограничиться рассмотрением линейной задачи, как это будет сделано ниже, некоторые из этих трудностей остаются в силе.

Задача обтекания горных препятствий в различных ее вариантах рассматривалась многими авторами [5]. Что же касается проблемы обтекания комбинированных систем орографических и термических неоднородностей подобно Севано-Гегамской, то, насколько известно авторам, она не рассматривалась в научной литературе. Вместе с тем над подобными районами на процессы образования облачности и выпадения осадков в очень сильной степени влияют эффекты как орографических, так и термических неоднородностей. Неучет одного из этих факторов может привести к результатам, сколь угодно далеким от действительности. Одно из достоинств ниже излагаемой расчетной схемы заключается в том, что в рамках линейной теории удастся исследовать влияние Севано-Гегамской системы орографических и термических неоднородностей на воздушные течения. При этом результаты численных экспериментов вкладываются в рамки современных представлений, физически легко обозримы и, по крайней мере качественно, описывают реальную картину явлений.

1. Схема расчета вертикальных скоростей, порождаемых орографией и температурными неоднородностями рельефа

Известно, что основную роль в образовании мезомасштабных атмосферных волн играют орографические и температурные неоднородности. В настоящей работе делается попытка оценить важность этих факторов относительно друг друга и формы их возможного взаимодействия на основе фактического материала. При расчетах использовалась

модель [6]. Опишем кратко ее физическую и математическую стороны. Считая атмосферу невязким, идеальным газом, рассмотрим в ней горизонтальный «основной поток» постоянного направления, совпадающего с направлением оси OX . Пусть, далее, этот поток характеризуется заданными распределениями скорости $\bar{u}(z)$ и температуры $\bar{T}(z)$. Распределения давления $\bar{p}(z)$ и плотности $\bar{\rho}(z)$ могут быть найдены по $\bar{T}(z)$, из соотношений $\bar{p}' = -\bar{\rho}g$ (квазистатичность) и $\bar{p} = R\bar{\rho}\bar{T}$, где R — газовая постоянная, а «штрих» означает дифференцирование по вертикальной координате z . Через Y обозначим поперечную горизонтальную координату. Составляющие скорости по осям OY и OZ будем обозначать через v и w соответственно. В основном потоке, по предположению, $\bar{v} = \bar{w} = 0$. Пусть такой поток набегаёт на изолированное препятствие, и по истечении достаточного срока, в атмосфере устанавливается стационарная ситуация. Предположим, что возмущения основного потока достаточно малы, чтобы произведениями их и их производных можно было пренебречь, а процесс можно было считать адиабатическим. Наконец, если принять во внимание, что для обычных атмосферных условий $\frac{u^2}{c^2} \ll 1$, где c^2 есть квадрат скорости звука в основном потоке, а κ — отношение теплоемкостей, то с помощью линеаризованной системы уравнений гидротермодинамики можно получить следующее уравнение для функции w :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - S \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial z} + \left[\frac{\sigma g}{\bar{u}^2} - \frac{\bar{u}'}{\bar{u}} + \frac{\bar{u}'}{\bar{u}} \left(\sigma^2 - \frac{g}{c^2} \right) - \frac{\gamma g}{T c^2} \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\sigma g}{\bar{u}^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

где g — ускорение силы тяжести,

$$S = -\frac{\bar{p}'}{\bar{p}} = \frac{g/R - \gamma}{\bar{T}}; \quad \sigma = S - \frac{g}{c^2} = \frac{\gamma_a - \gamma}{\bar{T}}; \quad \gamma_a = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \frac{g}{R};$$

$$\gamma = -\bar{T}'.$$

Уравнение (1) — очевидное обобщение на случай переменного по высоте основного потока известного уравнения для вертикальной скорости при обтекании изолированного препятствия [4]. Коэффициенты (1) определяются по заданным $\bar{u}(z)$ и $\bar{T}(z)$. Поскольку уравнение (1) — второго порядка по вертикальной координате z , оно требует задания двух краевых условий по z . В качестве одного из них примем условие жесткой, горизонтальной стенки на некоторой, достаточно большой, высоте z_N ($z_N \sim 8$ км):

$$w(x, y, z_N) = 0.$$

Вторым условием должно быть условие на поверхности Земли. Его будем получать двояко: исходя либо из заданной формы рельефа, либо

из заданной температуры земной поверхности. Если задана форма рельефа $\zeta = \zeta(x, y)$ ($\zeta \equiv 0$ вне некоторого ограниченного участка в окрестности начала координат), условие для w получаем как линеаризированное условие равенства нулю нормальной к Земле составляющей скорости:

$$w(x, y, 0) = \bar{u}(0) \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x}.$$

Если же задана температура рельефа $T = T_0(x, y)$, воспользуемся линеаризированной формой условия адиабатичности, записанного в терминах p и T и подвергнутого упрощениям теории конвекции:

$$\bar{u} \frac{\partial T}{\partial x} = -(\gamma_a - \gamma) \cdot w. \quad (2)$$

Если предположить, что w , T , их производные и ζ — малые величины, то из (2), с точностью до величин второго порядка малости, следует:

$$w(x, y, 0) = - \frac{1}{\gamma_a - \gamma(0)} \cdot \frac{\partial T_0}{\partial x} \cdot \bar{u}(0).$$

По координате y примем условия:

$$w(x, -L, z) = w(x, L, z) = 0,$$

где L превосходит наибольшее (по модулю) значение y , при котором нас интересует решение, на 20—30 км, а что касается условий по x , то задача требует их существенно различными в случаях $\sigma > 0$ и $\sigma < 0$. Ограничиваясь случаем устойчиво стратифицированного основного потока ($\sigma > 0$), положим:

$$w(x_0, y, z) = \frac{\partial w(x_0, y, z)}{\partial x} = \frac{\partial^2 w(x_0, y, z)}{\partial x^2} = w(x_M, y, z) = 0,$$

где x_0 и x_M удалены от участка, на котором $\zeta = 0$ вверх и вниз по потоку соответственно.

Перейдем в уравнении (1) и в краевых условиях к безразмерным величинам, приняв за единицу длины некоторую характерную величину H , за единицу скорости $\bar{u}(0)$ и введя безразмерные коэффициенты:

$$SH = K; \quad \sigma H \cdot \frac{gH}{\bar{u}^2} = D^2;$$

$$D^2 - \frac{\bar{u}'}{\bar{u}} \cdot H^2 + \frac{\bar{u}'}{\bar{u}} H \left(\sigma H - \frac{gH}{c^2} \right) - \frac{\gamma H}{T} \cdot \frac{gH}{c^2} = Q.$$

Тогда для функции $\bar{w}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = w(H\bar{x}, H\bar{y}, H\bar{z})/\bar{u}(0)$ получим соответствующую безразмерную задачу, решение которой ищется в виде:

$$\bar{w} = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k(x, z) \sin \frac{\Pi k}{L} y + \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k(x, z) \cos \frac{\Pi \left(k + \frac{1}{2} \right)}{L} y. \quad (3)$$

Каждая из искомых функций $\alpha_k(x, z)$ и $\beta(x, z)$ определяется из дифференциального уравнения в частных производных четвертого порядка. После того как сформулированы граничные условия для этих функций, задача решается численно.

Количество членов ряда (3), которыми мы ограничивались в практических расчетах, зависело от величины L и минимальной длины интегрирующих нас волн. Как правило, оно составляло от одного до трех безразмерных L .

2. Результаты численных экспериментов

По изложенной в предыдущем разделе схеме были проведены численные эксперименты применительно к квази-стационарным атмосферным процессам, а, следовательно, и к климатическим условиям различных месяцев года. В область, для которой авторы первоначально хотели провести эксперименты, входит полностью оз. Севан и Гегамский хребет. Однако, это желание осуществить было невозможно из-за ограниченных возможностей электронной вычислительной машины М-20, на которой решалась задача. В связи с этим была исключена из рассмотрения часть оз. Севан, расположенная севернее широты станции Шоржа. Для интегрирования уравнений задачи в этой области была использована сетка 10×10 с шагом $h=5$ км.

Для проведения экспериментов, необходимо иметь определенную исходную информацию о состоянии атмосферы над рассматриваемой областью. Но так как в данной статье нас интересует, прежде всего, климатический аспект проблемы (именно поэтому в предыдущем разделе и рассмотрена стационарная задача), то и исходная информация должна носить климатический характер. Климатический аспект проблемы важен в том отношении, что можно исследовать характерное состояние атмосферы над интересующей нас областью для различных месяцев года. Необходимая климатическая информация нами была заимствована из различных климатических атласов. Следует отметить, что, строго говоря, вся требуемая метеорологическая информация в настоящее время не имеется. Поэтому вместо некоторых данных наблюдений, которые необходимы для проведения расчетов, были использованы, конечно, с натяжкой, другие имеющиеся. Так, сведения о приземной температуре для рассматриваемой области были заменены соответствующими данными для уровня будки, заимствованными из атласа [1]. Значения скорости и направления ветра на уровне моря взяты по справочнику [7]. Направление и скорость ветра, а также температура для изобарических поверхностей 850, 700, 500, 300, 200 были взяты по данным радиозондирования для гор. Еревана [2].

Таким образом, численные эксперименты были проведены не с помощью требуемых в действительности данных наблюдений, а с помощью лишь весьма приближенно соответствующих им других данных. При проведении исследований, аналогичных данному, особое значение

придается результатам, полученным для апреля и октября месяцев. Эти месяцы являются средними для весны и осени и называются переходными. Как увидим ниже, термодинамические условия в атмосфере над районами оз. Севан в эти месяцы резко отличаются друг от друга.

По данным наблюдений для пяти прибрежных станций оз. Севан (Шоржа, Камо, Севан-Остров, Мартуни и Мазра), опубликованных в работе [7], были составлены средние значения общего количества облачности в баллах для всех месяцев года (табл. 1).

Таблица 1

Осредненная по пяти прибрежным станциям оз. Севан климатическая облачность

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Общая облачность в баллах	5,8	6,9	6,9	7,3	6,3	5,6	4,8	4,3	4,1	4,2	5,5	6,0

Легко видеть, что облачность весьма равномерно распределена по площади с некоторой тенденцией уменьшения балльности к юго-востоку. Среднее квадратичное отклонение для каждого из упомянутых двух месяцев не превосходит 0,16 балла. Таким образом, осредненные по всей рассматриваемой площади значения общего количества облачности для всех двенадцати месяцев можно считать характерными для всего оз. Севан. Из этой таблицы видно, что над оз. Севан наибольшее количество облачности наблюдается весной, в частности в апреле, а наименьшее — осенью, в частности в сентябре и октябре. Этот факт интересен с научной точки зрения и с точки зрения прикладной. В частности, его можно использовать при проведении работ по воздействию на облака и осадки в бассейне оз. Севан. Авторам неизвестны результаты аналогичного анализа материалов наблюдений для других горных систем. Что касается волновых облаков, то известно, что, например, для Скандинавских гор максимальное число дней с такими облаками приходится на март и апрель месяцы [5, 8]. Но в этом случае существует второй максимум, который приходится на сентябрь и октябрь месяцы и минимум в июне и июле. То есть между результатами, полученными в [8] для волновых облаков, и результатами, представленными в таблице 1, имеется некоторая аналогия лишь для весенних месяцев. В остальном эти результаты резко отличаются друг от друга. Напомним еще раз, что в работе [8] речь идет лишь о волновых облаках, в то время как данные таблицы 1 характеризуют годовой ход общей облачности.

Если в качестве климатической характеристики облачности взять не общую облачность в баллах, а другую характеристику, например, повторяемость различных форм облаков, вывод о годовом ходе облачности над Севаном остается неизменным. В качестве иллюстрации в таблице 2 приведена повторяемость для станций Севан-Остров и Мазра (первая из этих станций расположена на крайнем северо-западе озера, а другая — на его крайнем юго-восточном берегу) [7].

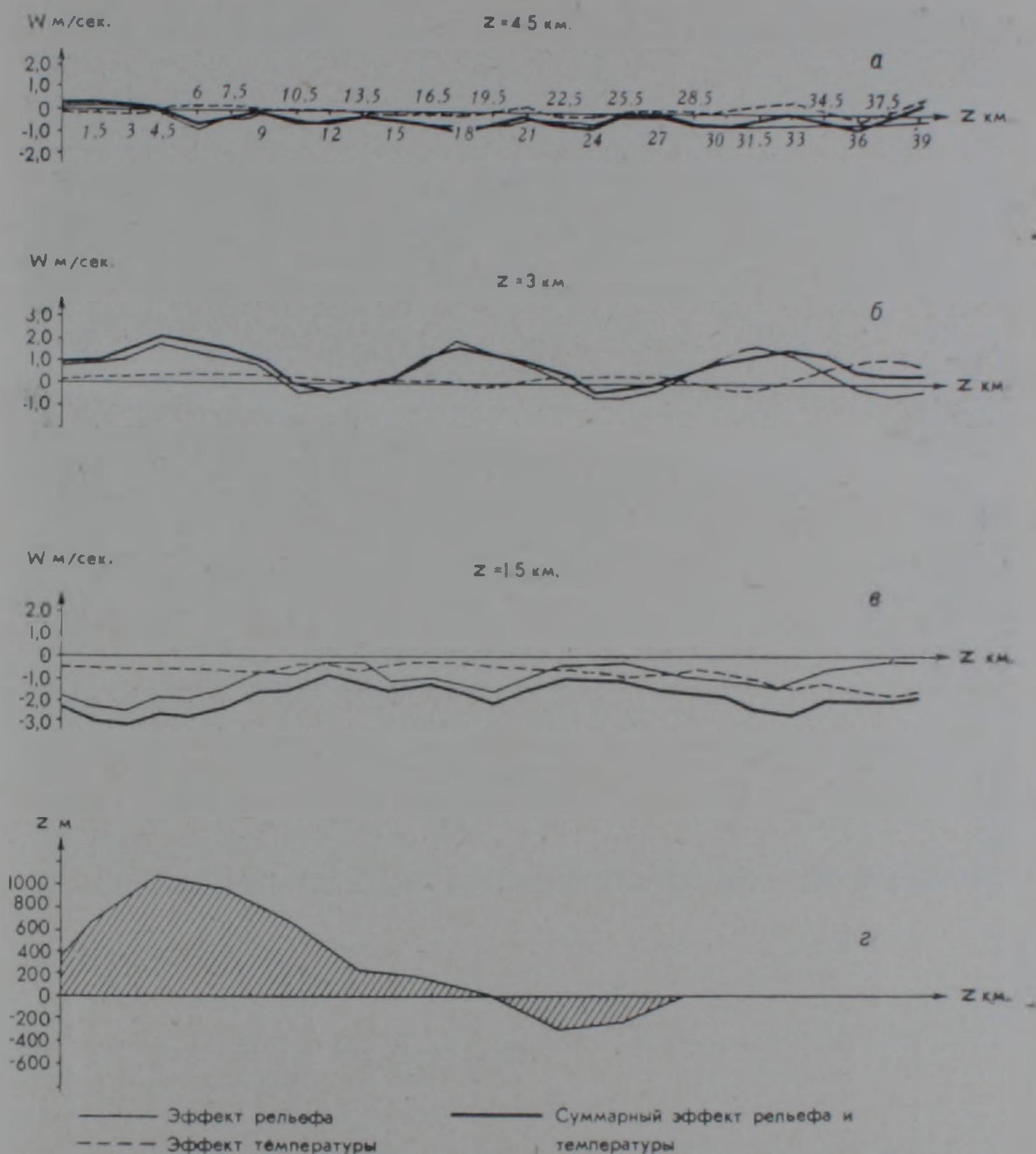
Таблица 2

№ п.п.	Наименование станции	М е с я ц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	Севан—Остров	203	192	222	240	243	236	209	199	194	196	197	216
2	Мазра	178	173	201	216	223	196	179	180	164	173	185	179

Эта таблица показывает, что действительно наибольшая повторяемость облачности различных форм приходится на апрель и май месяцы, а наименьшая повторяемость — на сентябрь и октябрь.

Как показал анализ результатов численных экспериментов, такой характер годового хода общей облачности над оз. Севан можно качественно объяснить теми вертикальными скоростями, которые генерируются орографическими и термическими неоднородностями Севано-Гегамской системы. Эти вертикальные скорости были вычислены для трех уровней атмосферы 1,5 км, 3 км, 4,5 км и они колеблются от 0,4 до 1,6 м/сек. Распределение вертикальных скоростей носит явно волновой характер, причем восходящие движения значительно превосходят нисходящие.

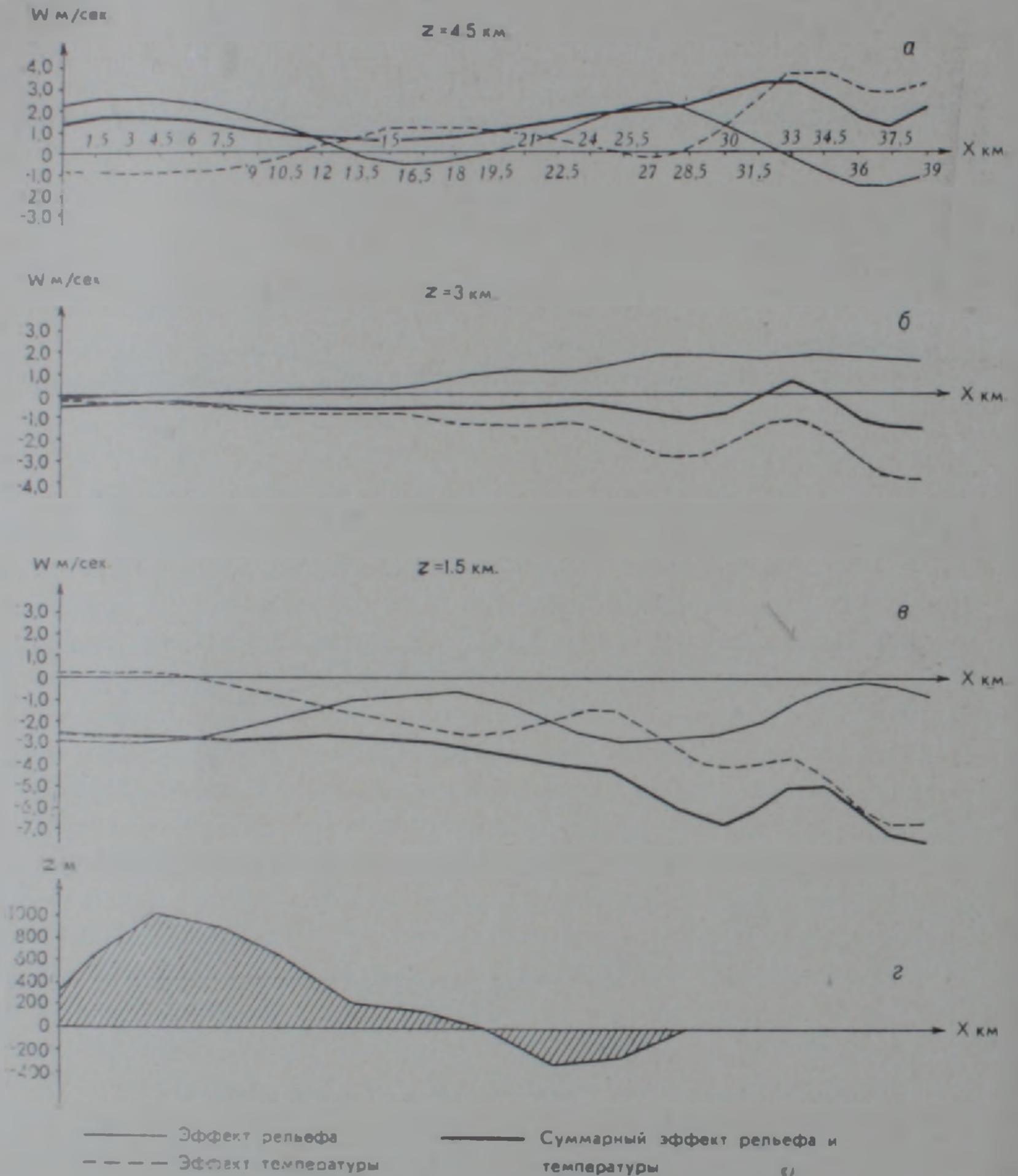
Примерно то же самое можно сказать о поле вертикальных скоростей, порождаемых температурными неоднородностями рельефа также применительно к условиям апреля. Здесь также распределение вертикальных скоростей носит волновой характер, на верхних двух уровнях положительные значения преобладают над отрицательными, но по величине они в несколько раз меньше соответствующих орографических вертикальных скоростей. Это наглядно видно на фиг. 1, где приведен вертикальный разрез вдоль одной из строк сетки. На этом рисунке внизу приведен профиль рельефа местности, высоты даны в метрах относительно уровня Севана. На высотах 1,5 км и 4,5 км вертикальные скорости, порождаемые орографией и температурными неоднородностями, почти всюду отрицательные, а на высоте 4,5 км к тому же еще малы. Следовательно, основным динамическим облакообразующим фактором здесь являются вертикальные скорости для высоты 3 км. Таким образом, для апреля месяца и для упомянутого уровня атмосферные условия таковы, что в процессах образования вертикальных скоростей орографический и термический эффекты взаимно почти не ослабляют друг друга, и положительные вертикальные скорости значительно превосходят отрицательные. Этот вывод, полученный в результате численных экспериментов, находится в соответствии с представленным в таблицах 1 и 2 материалом наблюдений и объясняет причину преобладания облачной погоды над Севаном в апреле. Рассмотрим теперь характер вертикальных скоростей, вычисленных применительно к условиям октября. На фиг. 2 приведен соответствующий вертикальный разрез. Как видно из этой фигуры, на всех уровнях вертикальные скорости приблизительно противоположны по фазе и в значительной степени взаимно ослабляют



Фиг. 1 Распределение вертикальных скоростей, порождаемых орографическими и температурными неоднородностями (апрель.)

друг друга, а на нижнем и среднем уровнях суммарная вертикальная скорость почти всюду отрицательна. Таким образом, в октябре месяце атмосферные условия над бассейном оз. Севан таковы, что орографический и термический эффекты взаимно ослабляют друг друга, а на нижних двух уровнях вертикальные скорости почти всюду отрицательные. Этот вывод объясняет причину того, что в октябре месяце над оз. Севан преобладает малооблачная погода.

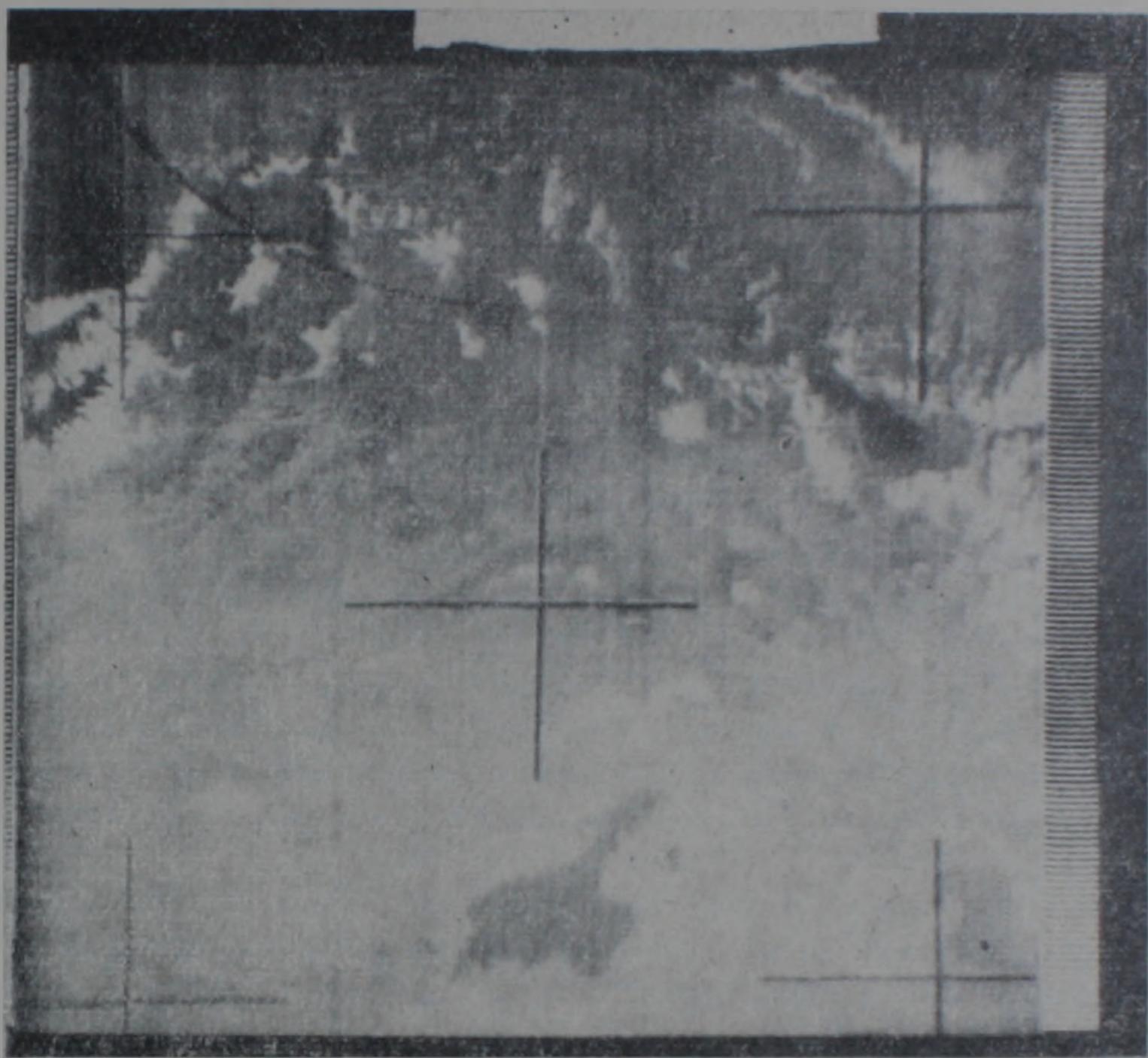
В качестве конкретного примера рассмотрим фотографию облачности, приведенную на фиг. 3. Эта фотография получена с помощью телевизионной аппаратуры советского метеорологического спутника «Метеор»-8 21 октября 1971 г. 12 час. 11 мин. московского времени (виток 2771). Благодаря высокой разрешающей способности аппаратуры,



Фиг. 2. Распределение вертикальных скоростей, порождаемых орографическими и температурными неоднородностями (октябрь).

покров получился до мельчайших подробностей. Совершенно отчетливо изображено оз. Севан с четко очерченными берегами. Вокруг озера почти сплошная облачность, а над самим Севаном совершенно ясное небо. То есть распределение облачности над озером Севан и над окружающими его районами находится в соответствии с результатами расчета, приведенными выше.

Хотя в данной статье не ставилась цель дать полную интерпретацию фотографии, представленной на фиг. 3, хочется обратить внимание читателя также на оз. Ван. Мы никаких расчетов не проводили для областей, включающих озеро Ван, но его географическое положение весь-



Фиг. 3 Фотография облачности, полученная со спутника «Метеор—8», за 12 часов 11 минут 21 октября 1971 (виток 2771).

ма сходно с географическим положением Севана, поэтому можно предположить, что картина воздушных потоков над обоими озерами аналогична с точки зрения качественной. Во всяком случае, как видно на упомянутой фотографии, облачный покров над оз. Ван и над прилегающими районами в общих чертах качественно похож на облачный покров Севана и его окрестностей. Над оз. Ван также совершенно ясное небо, а над окружающими его районами наблюдаются облака кучевых форм.

Таким образом тот факт, что над оз. Севан весной, в среднем, бывает больше облачности, чем осенью, объясняется совместным влиянием топографии и температурных неоднородностей рельефа на кинематику воздушного потока.

В заключение отметим, что даже с помощью рассмотренной значительно упрощенной модели обтекания Севано-Гегамской системы топографических и термических неоднородностей удастся получить физически обозримые качественные результаты. Это позволяет надеяться, что при рассмотрении более строгой, как с математической, так и с физической точек зрения, задачи можно будет получить более близкие к данным наблюдений количественные результаты. В свою очередь, такая

задача может явиться первым шагом на пути решения проблемы математического моделирования процесса образования облачности и выпадания осадков в бассейне оз. Севан.

Гидрометцентр СССР

Поступила 2.X.1973.

Շ. Ա. ՄՈՒՍԱԵԼՅԱՆ, Ե. Մ. ՊԵԿԵԼԻՍ

ՍԵՎԱՆԱ-ԳԵՂԱՄԱ ՕՌՈՎՐԱՑԻԿ ԵՎ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ԱՆՀԱՄԱՍԵՌՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՕԴԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ԿԻՆԵՄԱՏԻԿԱՅԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում քննարկվում է Սևանա լճի՝ որպես օռոգրաֆիկ և ջերմային անհամասեռությունների համալիր սիստեմի, օդային հոսանքի կողմից շրջահոսման խնդիրը:

Մանրամասն շարադրված է հեղինակների կողմից մշակված ուղղաձիգ արագությունների հաշվարկման սխեման, որոնք պայմանավորված են օռոգրաֆիայով և ռելյեֆի ջերմային անհամասեռություններով. բերված են թվային փորձարկումների արդյունքներն ըստ տարվա տարբեր ամիսների կլիմայական պայմանների:

Հետազոտությունների արդյունքները կարող են կիրառվել Սևանա լճի ավազանում ամպագոյացման և տեղումների երևույթների մաթեմատիկական մոդելացման խնդրի լուծման մեջ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Атлас Армянской Советской Социалистической Республики, Ереван—Москва, 1961.
2. Аэроклиматический атлас характеристик ветра Северного полушария. Под ред. И. Г. Гутермана, НИИАК, М., 1963.
3. Аэроклиматический атлас Северного полушария. Гидрометиздат, т. 2, 1963.
4. Кибель И. А. Пространственная задача обтекания неровностей поверхности Земли воздушным потоком. ДАН СССР, т. 100, № 2, 1955.
5. Мусаелян Ш. А. Волны препятствий в атмосфере. Гидрометиздат, 1962.
6. Пекеллис Е. М. Конечно-разностное решение линейной задачи об обтекании изолированного препятствия потоком постоянного направления в устойчиво стратифицированной атмосфере. Метеорология и гидрология, № 1, 1971.
7. Справочник по климату СССР, вып. 16. Армянская ССР, часть V, «Облачность и атмосферные явления», Л., 1969.
8. Larsson L. Observations of Lee—Wave Clouds in the Jamtland Mountain Sweden Tellus, vol. 6, № 2, 1954.