

ПРИКЛАДНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ

А. М. Мхитарян

Определение испарения с поверхности озера Севан
 методом теплового баланса

(Представлено академиком АН Армянской ССР И. В. Егназаровым 29/XI 1962)

Вопросу определения испарения с поверхности воды посвящено огромное количество работ. По озеру Севан также имеется ряд работ (1-8) и др. Ряд частных вопросов разобран в (2, 8, 9). Некоторые предварительные результаты по сокращению испарения приводятся в (10).

В нашей работе (4) дан расчет испарения по методу турбулентной диффузии. В (5) в этих целях используются также методы испарителей, водного и теплового балансов. Последний использован для получения нормы испарения. В настоящей работе приводится расчет годового хода испарения по методу теплового баланса.

Напишем уравнение теплового баланса в виде

$$R = LE + P + B, \quad (1.1)$$

$$E = -0,622 \frac{k_e \rho}{p} \frac{\partial e}{\partial z}; \quad P = -c_p \rho k_T \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (1.1')$$

Здесь: R —радиационный баланс; LE —затраты тепла на испарение (E); L —теплота парообразования; P и B —теплообмен с атмосферой и нижележащими слоями; e , ρ , p , T —влажность, плотность, давление и температура воздуха; c_p —теплоемкость; k_e и k_T —коэффициенты обмена для влаги и тепла; z —направлено вертикально вверх.

Радиационный баланс можно вычислить различными методами. Укажем, что в работе (7) подробно разобран этот вопрос. По методике, изложенной в (7) подсчитан годовой ход радиационного баланса по средним многолетним гидрометеорологическим данным (8).

В табл. 1 приведен годовой ход рассчитанного нами радиационного баланса для отдельных частей озера—Малого и Большого Севана.

Годовой ход радиационного баланса, $\text{ккал. см}^{-2} \text{ мес.}^{-1}$

М-цы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
М. Севан	-0,1	1,7	5,4	9,0	12,0	12,5	12,0	11,0	7,7	3,9	0,6	-1,3	74,4
Б. Севан	-0,1	1,7	5,5	9,1	12,1	12,5	12,0	11,0	7,6	3,5	0,5	-1,4	74,0

Пользуясь результатами нашей работы (6), рассчитан годовой ход теплообмена в воде. Для этого использовано большое количество профилей средней месячной температуры воды на различных вертикалях, а также результаты, полученные непосредственно в работе (6).

Результаты расчета сведены в табл. 2.

Годовой ход теплообмена в воде, $\text{ккал см}^{-2} \text{ мес.}^{-1}$

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
М. Севан	-7,9	-4,3	0,6	7,9	10,6	8,1	4,6	1,1	-3,0	-7,0	-9,9	-10,6	-9,8
Б. Севан	-6,3	-2,7	2,2	7,9	10,1	8,7	6,1	3,5	-1,2	-6,6	-8,5	-8,1	5,1

Получен любопытный результат. Оказывается из года в год в Б. Севане накапливается тепло в количестве 5 ккал см^{-2} . Это тепло переносится в М. Севан и таким образом искусственно увеличивается радиационный баланс М. Севана. Осредняя (1.1) за достаточно большой промежуток времени, получим

$$\bar{R} = L\bar{E} + \bar{P}. \quad (1.2)$$

Напишем теперь уравнение (1.1) для каждой части озера, обозначая индексом один величины для Малого и индексом два—для Большого Севана, принимая во внимание, что между ними осуществляется теплообмен.

$$R_1 = LE_1 + P_1 + B_1 + \Delta Q_1, \quad (1.3)$$

$$R_2 = LE_2 + P_2 + B_2 + \Delta Q_2.$$

Здесь: ΔQ_1 и ΔQ_2 горизонтальный приток (отток) тепла. Осредняя эти уравнения, получим

$$\bar{R}_1 = L\bar{E}_1 + \bar{P}_1 + \Delta\bar{Q}_1, \quad (1.4)$$

$$\bar{R}_2 = L\bar{E}_2 + \bar{P}_2 + \Delta\bar{Q}_2.$$

Помножив обе части первого уравнения на объем М. Севана (V_1), обе части второго—на объем Б. Севана (V_2) и складывая их и принимая с большой точностью $\bar{P}_1 = \bar{R}_2 = \bar{R}$, получим:

$$\bar{R} = L\bar{E} + \bar{P} + \frac{\Delta\bar{Q}_1 V_1 + \Delta\bar{Q}_2 V_2}{V_1 + V_2}. \quad (1.5)$$

$$L\bar{E} = \frac{L(\bar{E}_1 V_1 + \bar{E}_2 V_2)}{V_1 + V_2}; \quad \bar{P} = \frac{\bar{P}_1 V_1 + \bar{P}_2 V_2}{V_1 + V_2}. \quad (1.6)$$

Если мы раньше считали $\Delta\bar{Q}_1 + \Delta\bar{Q}_2 = 0$, то теперь согласно (1.2) и (1.5), должны положить

$$\Delta\bar{Q}_1 V_1 + \Delta\bar{Q}_2 V_2 = 0,$$

откуда

$$\Delta\bar{Q}_1 = -\frac{V_2}{V_1} \Delta\bar{Q}_2. \quad (1.7)$$

Отношение объемов V_2/V_1 равнялось двум в естественных условиях. Учитывая, что значительное количество наблюдений на оз. Севан относится ко времени, когда озеро спускалось (с 1938 по 1961 г. спуск составил около 15 м), а в настоящее время это отношение равно $V_2/V_1 = 1,71$ и беря отношение $V_2/V_1 = 1,95$, соответствующее спуску 6—7 м⁽³⁾, получим

$$\Delta\bar{Q}_1 = -1,95 \Delta\bar{Q}_2. \quad (1.8)$$

Подставляя теперь в (1.8) значение $\Delta\bar{Q}_2 = 5,1$, получим

$$\Delta Q_1 \cong -10 \text{ ккал см}^{-2} \text{ год}^{-1}, \quad (1.9)$$

что почти в точности совпадает с результатом расчета для Малого Севана, согласно табл. 2.

Используя теперь соотношение Боуэна и пользуясь данными наблюдений, легко подсчитать испарение с поверхности М. и Б. Севана.

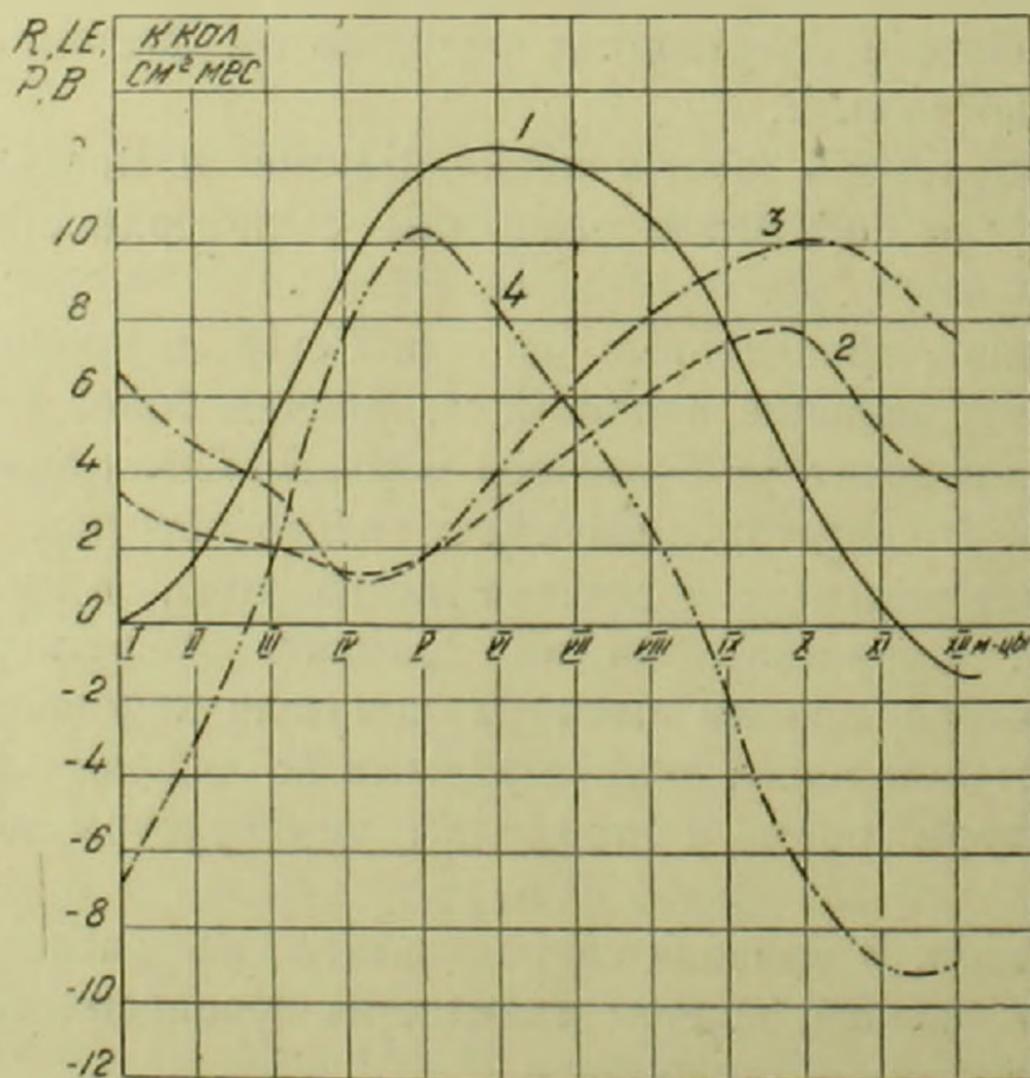
Наблюдения, проведенные на оз. Севан, в проливе между его чашами, показали наличие водообмена, причем более теплые поверхностные воды переносят из Большого в Малый Севан значительное количество тепла. По дну пролива имеет место обратное течение. Этот водообмен имеет место не в течение всего года, а лишь в его теплую половину. Скорости течений доходят до нескольких см/сек, иногда до десятков, причем расчеты показали хорошие соответствия между количествами тепла, рассчитанными по эпюрам скорости течения и температуры воды и профилям температуры для обеих чаш озера.

Ниже, в табл. 3 приводятся результаты по расчету составляющих теплового баланса, причем количества переносимого по горизонтали тепла включены в теплообмен.

Годовой ход составляющих теплового баланса, $\text{ккал см}^{-1} \text{мес.}^{-1}$

М-цы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Малый Севан													
<i>R</i>	-0,1	1,7	5,4	9,0	12,0	12,5	12,0	11,0	7,7	3,9	0,6	-1,3	74,4
<i>LE</i>	3,9	3,1	2,7	1,2	1,5	3,2	5,8	7,8	7,7	7,0	5,8	4,7	54,4
<i>P</i>	3,9	2,9	2,2	0,0	-0,1	1,3	1,6	2,2	3,0	3,8	4,7	4,7	30,2
<i>B</i>	-7,9	-4,3	0,6	7,9	-10,6	8,1	4,6	1,1	-3,0	-7,0	-9,9	10,6	-9,8
Большой Севан													
<i>R</i>	-0,1	1,7	5,5	9,1	12,1	12,5	12,0	11,0	7,6	3,5	0,5	-1,4	74,4
<i>LE</i>	3,2	2,2	2,0	1,3	2,2	2,7	4,4	5,5	6,2	6,6	4,8	3,4	44,0
<i>P</i>	3,1	2,3	1,5	-0,1	-0,1	1,2	1,6	2,1	2,7	3,5	4,3	3,6	25,7
<i>B</i>	-6,3	-2,7	2,2	7,9	10,1	8,7	6,1	3,5	-1,2	-6,6	-9,5	-8,1	5,1
Все озеро													
<i>R</i>	-0,1	1,7	5,4	9,0	12,1	12,5	12,0	11,0	7,6	3,6	0,5	-1,3	74,0
<i>LE</i>	3,4	2,4	2,2	1,3	1,7	3,1	4,5	6,1	6,6	6,7	5,1	3,7	47,1
<i>P</i>	3,3	2,5	1,7	-0,1	-0,1	1,2	1,6	2,1	2,8	3,6	4,4	3,9	26,9
<i>LE + P</i>	6,7	4,9	3,9	1,2	1,6	4,3	6,4	8,2	9,4	10,3	9,5	7,6	74,0
<i>B</i>	-6,8	-3,2	1,5	7,8	10,5	8,2	5,6	2,8	-1,8	-6,7	-9,0	-8,9	0,0

Результаты расчета составляющих теплового баланса для всего озера представлены на фиг. 1.



Фиг. 1. Тепловой баланс оз. Севан. 1—*R*;
2—*LE*; 3—(*LE+P*); 4—*B*.

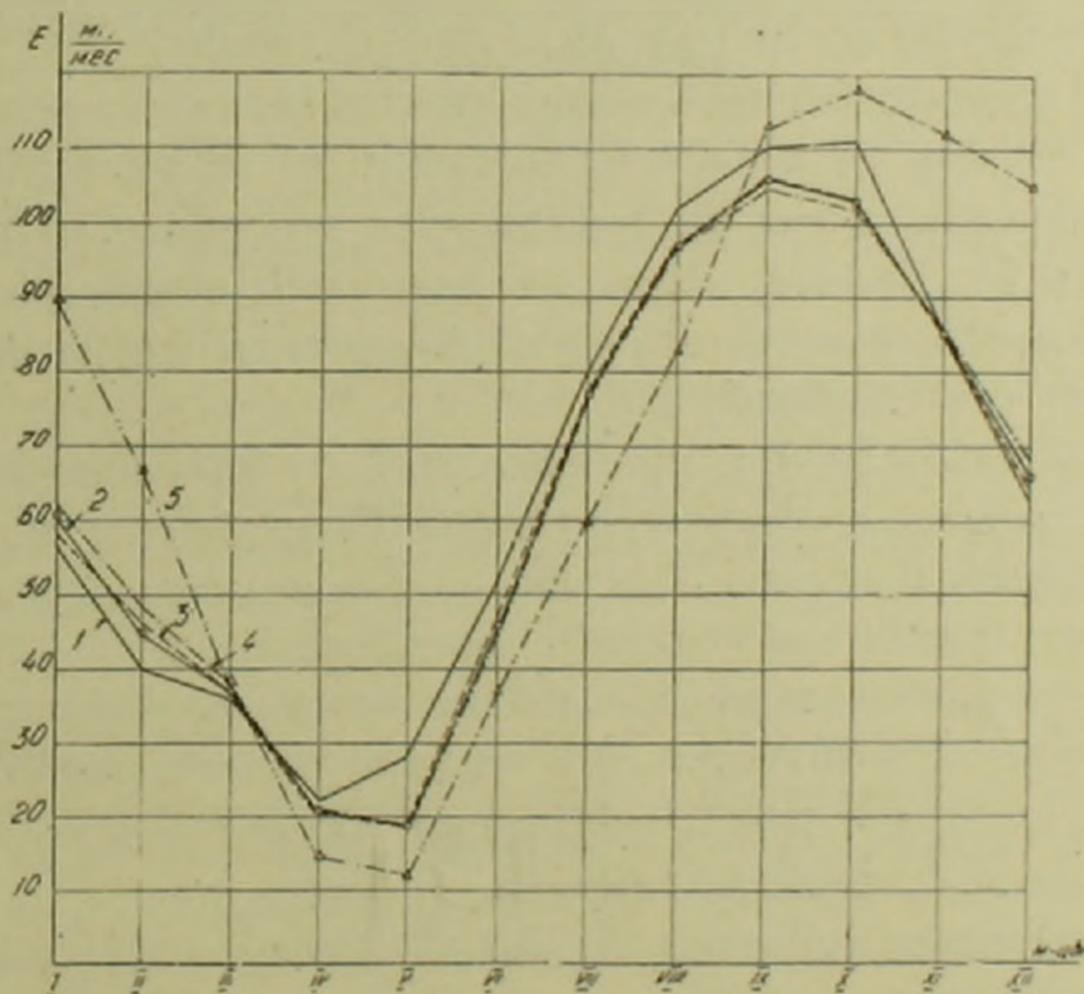
В табл. 4, проведен годовой ход испарения, рассчитанный нами по методу теплового баланса (E_T), водного баланса (E_b), гидрометеорологическим методом (E_r) и методом турбулентной диффузии (E_d). Первый взят на основании табл. 3 настоящей работы, остальные три заимствованы из нашей работы (5). Здесь же приводится годовой ход испарения, взятый из (1) (E_1).

Таблица 4

Годовой ход испарения, мм/мес.

М-цы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
E_T	60	43	40	25	30	55	83	105	113	113	88	65	820
E_b	61	47	37	21	19	46	77	97	106	103	85	66	765
E_r	59	46	37	21	19	47	77	97	106	103	85	64	761
E_d	62	48	40	19	18	45	76	99	112	106	89	66	780
E_1	90	67	38	15	12	37	60	83	113	118	112	105	850

Эти результаты представлены на фиг. 2.



Фиг. 2. Годовой ход испарения.
1— E_T ; 2— E_b ; 3— E_r ; 4— E_d ; 5— E_1 .

Сравнение полученных результатов позволяет сделать ряд выводов.

1. Имея величину испарения, определенную по методу водного баланса (для оз. Севан водный баланс изучен достаточно хорошо), можно проверить, насколько справедливо допущение о равенстве коэффициентов турбулентного обмена в приземном слое воздуха для тепла и влаги.

Подставляя (1.1') в (1.2), предлагая $k_e \neq k_T$, получим

$$\frac{k_T}{k_e} \cong \frac{1,55 \cdot 10^3}{p} \cdot \frac{\Delta e}{\Delta T} \left(\frac{\bar{R}}{\bar{L}\bar{E}} - 1 \right). \quad (1.10)$$

В условиях оз. Севан имеем $\bar{L}\bar{E} = 51$, $\bar{R} = 74$, т. е. $\bar{L}\bar{E}/\bar{R} = 0,69$, $p = 0,81 \cdot 10^3$ мб, подставляя это в (1.10), получим

$$\frac{k_T}{k_e} = 0,858 \frac{\Delta e}{\Delta T}. \quad (1.11)$$

Беря средние годовые значения ($\bar{\cdot}$) $\Delta T \cong 3,0$, $\Delta e \cong 4,9$, будем иметь

$$\frac{k_T}{k_e} \cong 1,32. \quad (1.12)$$

Подробные подсчеты показывают, что это отношение очень близко к единице при стратификации, близкой к безразличной, т. е. когда $\Delta T = 0$. В зимних условиях, когда над водоемом имеет место неустойчивая стратификация и $\Delta T > 0$, отношение $k_T/k_e > 1$. Вообще это отношение имеет суточный ход (небольшой над водоемом и ощутимый над сушей), годовой ход изменяется при переходе с одной подстилающей поверхности (суша) к другой (вода).

2. Только преувеличением влияния стратификации на испарение можно объяснить тот факт, что расчеты по схеме из (9) привели к такому большому испарению в зимние месяцы, как это видно из графика на фиг. 2 (кривая 5). Правда, несколько завышены суммы радиационного баланса и, кроме того, несколько занижены затраты тепла на турбулентный теплообмен с атмосферой.

3. Расчеты показали, что примерно 70% от радиационного баланса тратится на испарение с поверхности озера. Подробные и тщательно проведенные измерения на суше в бассейне оз. Севан и последующие расчеты на большом материале наблюдений, проведенных в 1956—1961 гг. в различных пунктах, показали, что в условиях суши прибрежных районов озера на испаряемость тратится 70% тепла от радиационного баланса.

4. Данные табл. 4 и фиг. 2 показывают, что все четыре метода расчета испарения дают близкие результаты.

В целях проверки гипотезы $k_T/k_e > 1$ следует проводить тщательные экспериментальные работы при различных условиях стратификации атмосферы и различных значениях влажности воздуха.

Наиболее целесообразно при исследованиях гидрометеорологического режима водоемов одновременно привлекать два физически наиболее обоснованных метода — водного (закон сохранения массы) и теплового (закон сохранения энергии) балансов.

Анализ с привлечением обоих методов на большом материале по оз. Севан дает основание выдвинуть следующую гипотезу, позволяющую согласовать результаты, получаемые указанными выше двумя методами.

Если при переходе воздушной массы с одной подстилающей поверхности (суши) на другую (воду) трансформация воздушного потока (из-

менение скорости, влажности, температуры и т. д.) происходит в основном в узкой прибрежной полосе, турбулентные характеристики потока (например, коэффициент обмена и его изменения с высотой) являются более консервативными, трансформируются значительно медленнее, и для водоемов они в большей мере определяются условиями окружающей суши.

Другой очень важный вывод заключается в том, что стратификация приземного слоя воздуха больше влияет на коэффициент обмена для тепла, что приводит к выражению типа (1.12). Некоторым объяснением этому может служить то обстоятельство, что при теплообмене температура частицы не является пассивной и в свою очередь влияет на развитие турбулентности. В то же время влага является более пассивной субстанцией и процесс ее переноса лучше соответствует представлениям полуэмпирической теории турбулентности.

Институт водных проблем
Академии наук Армянской ССР

Ա. Մ. ՄԽԻԹՍՐՅԱՆ

Սևանա լճի մակերևույթից գոլորշիացման որոշումը ԿԵՐՄԱՅԻՆ ԲԱՐԱՆՍԻ ՄԵՐՈՂՈՎ

Սևանա լճի մակերևույթից գոլորշիացման հարցի լուծումը ղեկավարելու կարևոր է շնայած նրա մակարդակը բարձր նիշի վրա պահպանելու հարցն արդեն լուծված է Այդ կարևորությունը բխում է նաև նրանից, որ այժմ հարց է դրվում հետազոտել գոլորշիացման կրճատման պրոբլեմը: Հողվածում բերվում է գոլորշիացման որոշման խնդրի լուծումը ջերմային բալանսի հավասարումից, որ ունի (1.1) տեսքը: Այդ հավասարումը միջինացվելուց հետո բերվում է (1.2) տեսքին: Ռադիացիոն բալանսի և ջրում ջերմափոխանակման որոշման արդյունքները բերված են համապատասխանաբար 1 և 2 աղյուսակներում: Ցույց է տրվում, որ լճի երկու մասերի միջև տեղի ունի հորիզոնական ջերմափոխանակում (1.8): Ելնելով դրանից, լճի առանձին մասերի համար ստացվում են բալանսի միջինացրած հավասարումները (1.12):

Ջերմային բալանսի բաղկացուցիչ մասերը բերվում են աղյուսակ 3-ում և ներկայացված են գծ. 1-ի վրա:

Գոլորշիացման հաշվման արդյունքները բերվում են աղյուսակ 4-ում և ներկայացված են գծ. 2-ի վրա: Վերջում բերվում են հետևություններ, ըստ որոնց տուրբուլենտ փոխանակման պորժակիցները խոնավության և ջերմության դիֆուզիայի համար թվապես իրարից տարբեր են (1.17): Ցույց է տրվում նաև, որ ռադիացիոն բալանսի 70% -ը ծախսվում է գոլորշիացման վրա: Ստացված արդյունքները համեմատվում են այլ մեթոդներով կատարված հաշվարկների արդյունքների հետ և ցույց է տրվում, որ նրանք բավական լավ համընկնում են:

Л И Т Е Р А Т У Р А Կ Ե Ր Ա Վ Ա Ն Ի Խ Թ Յ ՈՒ Ն

¹ Ս. Վ. Էզնազարов, Изв. АН АрмССР (серия техн. наук), № 3 и 6, 1960, № 2, 1961 и № 4, 1962. ² М. М. Айнбунд, Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме, т. 1, изд. АН АрмССР, Ереван, 1961. ³ В. К. Давыдов, Материалы по исследованию оз. Севан, ч. II, вып. 2, 1955. ⁴ А. М. Мхитарян, ДАН АрмССР, т. 30, № 3 (1960). ⁵ А. М. Мхитарян, Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме, т. 1, Изд. АН АрмССР, Ереван, 1961. ⁶ А. М. Мхитарян, ДАН АрмССР, т. XXXVI, № 4, 1963. ⁷ М. П. Тимофеев (ред.), Метеорологический режим оз. Севан, Гидрометеониздат, 1960. ⁸ М. П. Тимофеев, Основные вопросы физики нижнего слоя воздуха над водоемами, Автореферат докт. дисс., 1962. ⁹ Т. В. Кириллова, Тр. ГГО, вып. 78, 1958. ¹⁰ В. С. Макарова и А. М. Мхитарян, Изв. АН АрмССР (сер. техн. наук), № 4, 1961.