

О. А. АЗЕРНИКОВА

## ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕДОСТАВА НА ОЗЕРЕ СЕВАН И ВОЗМОЖНАЯ ЕГО ПОВТОРЯЕМОСТЬ В ДАЛЬНЕЙШЕМ

Озеро Севан принадлежит к числу крупнейших высокогорных озер мира. Оно расположено на высоте около 1900 м над уровнем моря. Климат Севанской котловины достаточно суров, и ежегодно у берегов озера, а иногда и в его открытой части появляется лед. И все же случаи полного замерзания озера (ледостава) до недавнего времени были очень редки и повторялись примерно раз в пятнадцать лет.

Однако, начиная с конца 40-х годов, озеро начало замерзать гораздо чаще — через два-три года.

Эта резкая перемена в ледовом режиме оз. Севан совпала с его спуском. Дело в том, что, начиная с 1937 г., уровень оз. Севан постепенно понижается в связи с использованием его вод в энергетическом хозяйстве Армении. К 1965 году уровень оз. Севан понизился на 16,4 м, а его объем уменьшился на 39%. Естественно было бы предположить, что именно это обстоятельство повлекло за собой учащение ледоставов на озере, как следствие изменения его теплового режима. Долгое время так и полагали, поскольку специальные исследования этого явления отсутствовали. Однако, значительные нарушения биологических процессов в озере в связи с учащением ледоставов (цикличности и степени развития планктона, размножения, роста и миграции некоторых рыб) вызвали необходимость серьезного исследования этого явления и возможностей его предсказания. В данной работе излагаются результаты этого исследования.

Для выяснения причин ледообразования на оз. Севан нами рассматриваются как влияние метеорологических условий, так и роль изменения глубин озера, связанного с его спуском.

Как показатель условий охлаждения водоема обычно применяются значения температуры воздуха в период охлаждения (фиг. 1).

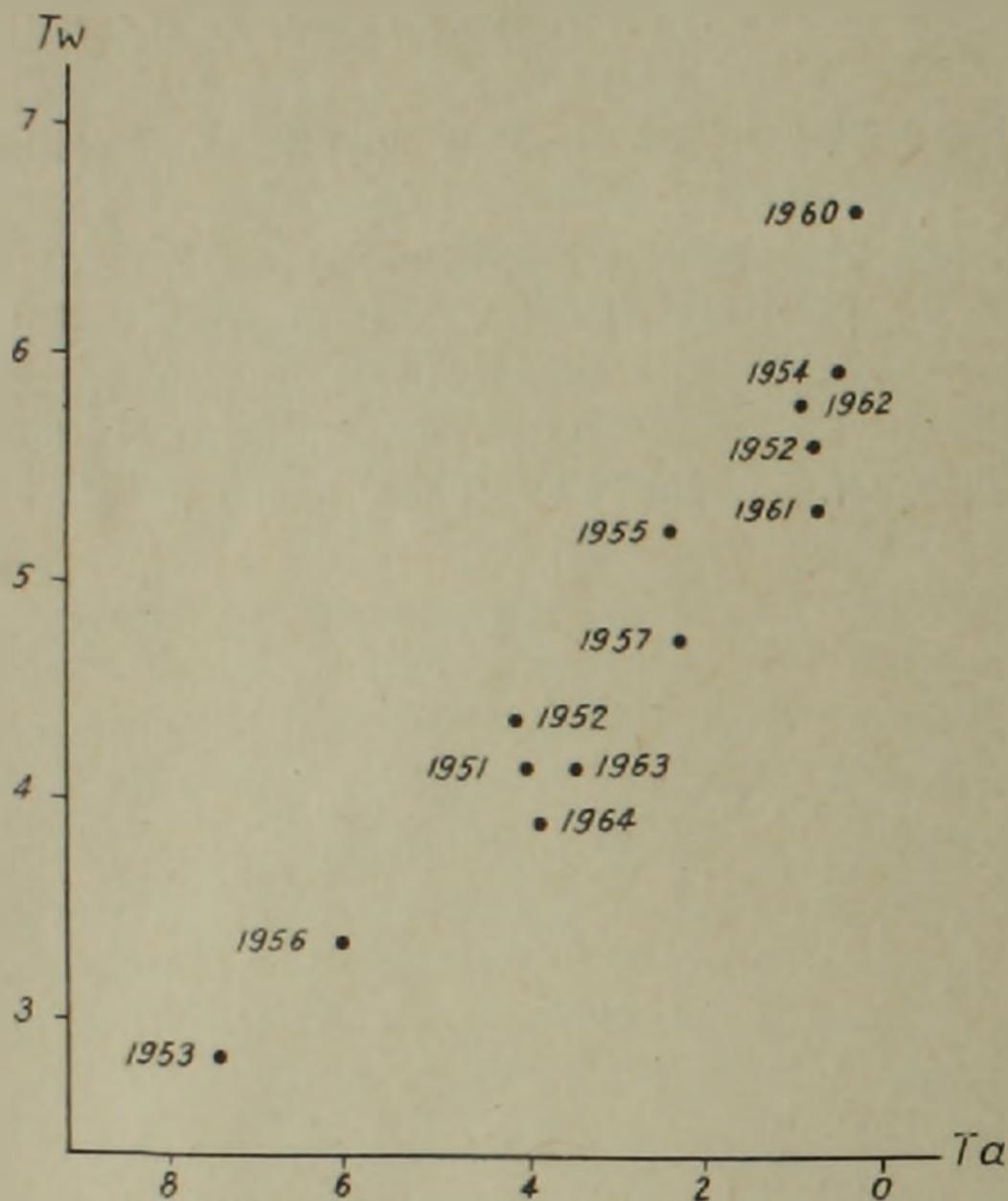
Учитывая, что неподвижный\* лед на Севане образуется к февралю (6, 7), степень охлаждения озера характеризовалась средней температурой воздуха за декабрь, январь и февраль (по наблюдениям на ГМС «Севан — остров»; ряд наблюдений был удлинен до 1890 г. по сведениям других станций).

Анализ показал, что озеро покрывалось неподвижным льдом в том случае, когда средняя температура воздуха с декабря по февраль не превышала — 5°,6С (при многолетних изменениях этой величины от

---

\* Исследуются те случаи, когда неподвижный лед устанавливался на длительный срок — более месяца.

—1° до —7,4°C). Однако, в некоторые зимы, такие же холодные, как и в годы ледостава, полного замерзания озера не наблюдалось. Следовательно, для полного замерзания озера интенсивное охлаждение есть условие необходимое, но не достаточное.



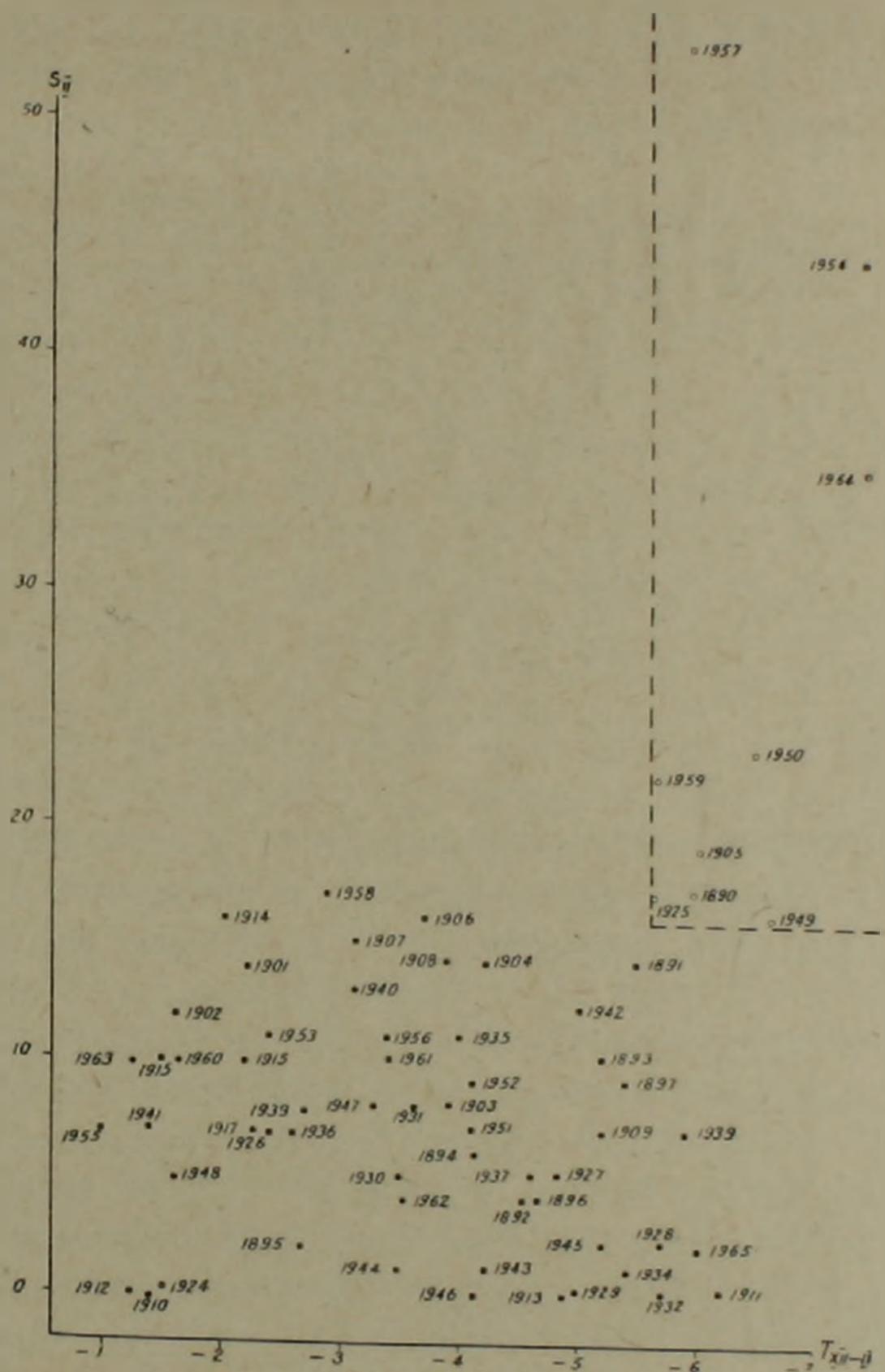
Фиг. 1. Связь между температурой воды ( $T_w$ ) и воздуха ( $T_a$ ) на озере Севан в декабре.

Как известно, ледообразование в пресных относительно глубоких водоемах начинается при температуре воды выше 0°C в ее толще и даже в поверхностном слое. Наблюдения на Севане в глубоководных районах, непосредственно перед ледоставом и сразу после вскрытия, также ни разу не зафиксировали температуру ниже 0°C. Следовательно, ледообразование начинается с охлаждением до 0°C тонкой поверхностной пленки воды. Молекулярная теплопроводность воды очень мала, а конвективное перемешивание прекращается уже при 4°C. Единственный путь отепления поверхностной пленки — это ветровое перемешивание. Следовательно, второе условие для образования ледостава — это достаточно продолжительная безветренная погода, которая способствует переохлаждению поверхностной водной пленки и сохранению новообразовавшегося неподвижного льда.

За показатель безветрия на Севане было принято количество случаев затишья. Оказалось, что в годы ледостава штилевая погода в феврале отмечалась не менее 16 раз (при четырехсрочных метеона-

блюдениях). Продолжительность безветрия составляла, следовательно, около 96 часов и более, при многолетних колебаниях от 0 до 330 часов.

На фиг. 2 белыми кружками отмечены годы ледостава и погодные условия, при которых он устанавливался. Как видим, все эти случаи группируются в одной «погодной области», а именно, в неперменном сочетании холода и безветрия. При отсутствии одного из этих условий ледостав не образовывался ни разу за весь 76-летний период.



Фиг. 2.  $T_{XII-II}$  — средняя температура воздуха за декабрь, январь и февраль,  $S_{II}$  — число случаев штиля в феврале. В 1959 г., как исключение, в связи с поздним ледоставом, указано число штилей в начале марта. Пунктиром выделены условия образования ледостава.

Даже поверхностный анализ графика (фиг. 2) заставляет отказаться от версии исключительного влияния изменения глубины озера на его замерзание. Если бы ледоставы в последние годы были обусловлены только его спуском, то они устанавливались бы и в менее суровую зиму. Между тем, наоборот, ледостав образуется в условиях еще более суровых и безветренных зим, чем это было раньше. А

учащение таких зим отнюдь не является локальной особенностью района оз. Севан.

В табл. 1 приводятся данные о повторяемости особо холодных и безветренных зим на оз. Севан, в Ереване и в Мегри. «Холодными» в Ереване и на оз. Севан условно приняты зимы, когда средняя температура воздуха в декабре-феврале не превышает  $-5^{\circ},6\text{C}$ . В Мегри, где климат значительно теплее, «холодный» считается зима с отрицательной температурой воздуха. Под «безветренными» подразумеваются зимы, когда продолжительность штилей в феврале на оз. Севан составляет не менее 96 часов, в Ереване — 240 ч., в Мегри — 300 ч.

Таблица 1

Годы	Повторяемость (%) холодных зим			Повторяемость (%) безветренных зим			Повторяемость ледостава на оз. Севан	Повторяемость особо ледовитых лет в Баренцевом море	Средние числа Вольфа
	Севан— остров	Ереван	Мегри	Севан— остров	Ереван	Мегри			
1834—1889	—	—	—	—	—	—	7	—	41
1890—1927	17	23	—	17	25	—	9	67	39
1928—1948	15	19	5	0	14	43	0	57	52
1949—1964	38	31	27	38	38	52	38	50	86

Все три станции значительно разнятся по климатическим условиям, т. к. расположены на разной высоте. И тем не менее во всех этих районах повторяемость холодных и безветренных зим за последние 15 лет намного больше, чем за предшествовавшие три десятилетия, так же, как и повторяемость ледоставов на оз. Севан. Следует особо подчеркнуть, что общего похолодания отнюдь не произошло. Климатические нормы остались прежними. Все дело в том, что увеличилась вариабельность погодных характеристик. За последние 15 лет велика не только повторяемость очень холодных зим, но и повторяемость исключительно теплых, таких, какие раньше составляли редкое исключение (например, зимы 1952/1953, 1954/55, 1959/60, 1962/63 гг.).

На современном этапе гидрометеорологические процессы испытывают резкие колебания не только в Закавказье, но и на всем земном шаре. 50-е годы и начало 60-х характерны необычайно бурной, контрастной погодой, которая, охватив северное и южное полушария, вызвала многочисленные бедствия. Достаточно упомянуть наводнения, вызванные исключительно обильными осадками в Индии, США, Бразилии и даже в таких «сухих» странах, как Иран и Афганистан, рекордные по силе ураганы в Тихом океане и Атлантике, необычные похолодания на юге и потепления на севере.

Гелиогеофизики связывают это с деятельностью Солнца [10]. Известно, что максимум последнего 11-летнего цикла солнечной актив-

ности совпал с вершиной ее векового цикла, и активность Солнца на этом последнем этапе была особенно велика. Из табл. 1, где приводятся значения чисел Вольфа видно, что за последние 15 лет они возрастают почти вдвое по сравнению с предшествующим периодом.

Особенно наглядно эта закономерность видна в табл. 2, где числа Вольфа и повторяемость ледостава на оз. Севан приводятся по двенадцати естественным циклам солнечной активности длительностью 8—13 лет (так называемые 11-летние циклы). Начало каждого цикла приурочено к эпохе максимума активности, даты которых известны [10].

Таблица 2

Годы солнечных циклов	Средние числа Вольфа	Повторяемость ледоставов на оз. Севан, %	Годы солнечных циклов	Средние числа Вольфа	Повторяемость ледоставов на оз. Севан, %
1837—1847	61	9	1907—1916	30	0
1848—1859	54	0	1917—1927	48	18
1860—1869	49	10	1928—1936	38	0
1870—1882	50	8	1937—1946	61	0
1883—1893	39	9	1947—1956	80	30
1894—1906	27	8	1957—1964	107	38

Как видно из табл. 2, средние числа Вольфа\* на протяжении 10 циклов (до 1947 г.) изменялись в пределах 30—61, в последние же два цикла они возросли до 80—107. Соответственно, повторяемость ледоставов на оз. Севан в первые 10 циклов, охватывающих 110 лет, колебалась преимущественно от 0 до 10% (только в одном цикле — 18%), а в последние два цикла она возросла до 30—38%.

Климат и погода Земли связаны с деятельностью Солнца через общую циркуляцию атмосферы. С увеличением солнечной активности оживляется атмосферная циркуляция [4]. Усиливается междуширотный воздухообмен. Встреча теплых и холодных воздушных масс, в свою очередь, создает бурную циклоническую деятельность, контрасты погоды, метеорологические катастрофы.

По-видимому, частое замерзание оз. Севан в последние годы тоже следует отнести к разряду климатических аномалий, обусловленных деятельностью Солнца. Подтверждением такой гипотезы служит сравнение динамики ледового режима оз. Севан и полярных морей. В табл. 1 указана частота особоледовитых лет\*\* в Баренцевом море. Как видим, колебания ледовитости в Баренцевом море и на оз. Севан хронологически противоположны. Усиление междуширотного обмена.

\* Среднегодовые числа Вольфа до 1959 г. заимствованы из работы М. С. Эйгенсона [10], а за более поздние годы рассчитаны по сведениям из бюллетеней „Солнечные данные“.

\*\* Годы, когда льды покрывали более 65% площади моря.

усилившее в последние годы затопки холода в Закавказье, одновременно способствовало выносу тепла в Арктику и, как следствие, понижению ее ледовитости. Что же касается связи ледовитости полярных морей с активностью Солнца, то она подтверждается всеми многочисленными исследованиями от трудов В. Ю. Визе до новейших работ.

Рассмотрим вопрос, насколько существенным для замерзания озера могло оказаться уменьшение его глубины в результате спуска. Чтобы количественно оценить этот эффект, было рассчитано, по методу Д. Г. Шуляковского [8, 9], время начала ледообразования на озере при современных глубинах и тех, которые имели место до спуска.

В общем виде сущность метода выражается неравенством:

$$\alpha_n v_n \leq -B_n \quad (1)$$

где  $v_n$  — температура воды, средняя в толще в момент  $n$ ,

$\alpha_n$  — коэффициент подачи тепла из толщи воды к поверхности,

$B_n$  — теплоотдача водной поверхности.

Физический смысл неравенства заключается в том, что ледообразование становится возможным в момент, когда теплоотдача с поверхности воды (правая часть неравенства) оказывается больше притока тепла, направленного к поверхности воды из глубины (левая часть неравенства), при  $v_{\text{поверх}} = 0$ .

Уменьшение глубины озера ускоряет процесс ледообразования, главным образом, из-за ускорения теплоотдачи водной массы.

Таким образом, следует сперва установить, как меняется по мере охлаждения температура воды в озере ( $v_n$ ) при современных глубинах и как бы она менялась при его прежней глубине.

Расчет этот производится по формуле:

$$v_n = v_{0e}^{-na} + \left[ \bar{\theta} + \frac{d}{k} + \frac{(x+k) \cdot q}{\alpha k} \right] \cdot (1 - e^{-na_0}), \quad (2)$$

где

$$a_0 = \frac{\alpha k}{(x+k) h c_p}$$

$v_0$  — начальная температура воды,

$e$  — основание натуральных логарифмов,

$n$  — число суток от начала расчета до момента  $n$ ,

$\alpha$  — коэффициент подачи тепла из водной массы к поверхности раздела «вода — воздух»,

$k$  — коэффициент теплообмен между водой и воздухом,

$h$  — средняя глубина,

$d$  — удельный теплообмен при температуре воздуха, равной температуре воды,

$c_p$  — объемная теплоемкость воды,

$\bar{\theta}$  — средняя температура воздуха за расчетный период,

$q$  — удельный русловый теплоприход.

Формула (2) получена для водоемов, перемешивание в которых достигает дна. Хотя оз. Севан — водоем, относительно глубоководный (максимальная глубина более 70 м, средняя — около 30 м), однако состояние, близкое к гомотермии весной и осенью, указывает на наличие перемешивания его вод по всей толще. Формула (2), следовательно, остается правомочной для расчетов в условиях оз. Севан.

В качестве конкретных условий для расчета температуры воды и сроков ледообразования были приняты условия четырех зим: 1954/1955, 1958/1959, 1963/1964 и 1964/1965 гг. Все эти зимы существенно различаются по условиям выхолаживания. Зима 1963/1964 гг. была одной из самых суровых на оз. Севан и сопровождалась ледоставом. Зимой 1958/1959 гг. озеро также покрывалось неподвижным льдом, но зима была теплее, чем зима 1963/1964 гг. Следующая зима 1964/1965 гг. была достаточно холодной, но ледостава на озере не было. И наконец, зима 1954/1955 гг. была одной из самых теплых за последние 76 лет.

Понижение температуры в каждую из этих зим рассчитывалось как для реальных глубин, так и для той, которая была в озере до спуска.

Гидрометеорологические данные для расчета были приняты по наблюдениям береговых гидрометстанций на оз. Севан. Методически расчет проведен в соответствии с имеющимся руководством [8].

За начальный момент расчета принято 30 ноября. Средняя температура воды определялась по глубоководным данным с учетом объема вод каждой зоны, по способу, предложенному М. М. Айнбундом [1].

В табл. 3 приводятся результаты расчета температуры по формуле

Таблица 3

Г о д ы	1954/55	1958/59	1963/64	1964/65
Снижение уровня озера (м)	8,58	12,11	16,02	16,44
Малый Севан				
Расчетная температура (°С) воды для реальных глубин . . . . .	3,99	2,30	1,74	1,52
Фактическая температура . . . . .	3,95	2,14	1,70	1,66
Ошибка расчета . . . . .	+0,04	+0,16	+0,04	-0,14
Расчетная температура для прежней глубины озера . . . . .	4,38	2,90	2,60	2,42
Изменение температуры за счет уменьшения глубин . . . . .	-0,43	-0,76	-0,90	-0,76
Большой Севан				
Расчетная температура (°С) воды для реальных глубин . . . . .	4,10	2,39	1,54	1,22
Фактическая температура . . . . .	3,93	2,61	1,70	1,21
Ошибка расчета . . . . .	+0,17	-0,22	-0,16	+0,01
Расчетная температура для прежней глубины озера . . . . .	4,49	3,20	3,45	2,94
Изменение температуры за счет уменьшения глубин . . . . .	-0,56	-0,59	-1,75	-1,73

(2) для конкретных гидрометеорологических условий четырех зим, к 1 февраля, в реальных современных глубинах и для той глубины, которая была до начала спуска вод.

Из табл. 3 видно, что расчетные значения температуры воды хорошо совпадают с фактическими. Это дает основание полагать, что и расчет фиктивной температуры воды для допусковой глубины озера тоже достаточно точен.

Сравнение температур показывает, что с понижением уровня озера на 8 м температура воды к началу февраля уменьшилась на  $0^{\circ},6\text{C}$  по сравнению с той, которая имела бы место при тех же гидрометеорологических условиях, но при прежней, допусковой глубине озера. С дальнейшим понижением уровня до 16 м это уменьшение температуры достигло  $0^{\circ},9$  в Малом Севане и  $1^{\circ},7$  в Большом Севане.

Теперь, имея данные об охлаждении вод оз. Севан в разных условиях, можно определить и сроки ледообразования в современный и допусковой период. Дата начала ледообразования рассчитывается по неравенству (1). Результаты расчета приводятся в табл. 4.

Таблица 4

	1954/55	1958/59	1963/64	1964/65
Малый Севан				
Дата появления льда в реальных условиях	льда нет	17/II	26/I	15/II
Дата появления льда при прежней глубине	льда нет	26/II	5/II	30/II
Большой Севан				
Дата появления льда в реальных условиях	льда нет	17/II	23/I	30/I
Дата появления льда при прежней глубине	льда нет	25/II	5/II	17/II

Таким образом, в открытой части озера, даже в самую суровую зиму и при современных глубинах, лед появляется не ранее, чем в конце января. В особенно теплые зимы лед не появляется совсем.

Далее, если бы глубина озера была равна допусковой, то лед в условиях рассматриваемых зим появился бы на 8—18 дней позже, чем теперь.

Приходится констатировать, что до сих пор более раннее появление плавучего льда на озере, по сравнению с прошлым, не было первопричиной учащения ледоставов. В этом убеждает анализ графика замерзания (фиг. 2): если бы уровень озера оставался неизменным, то оно все равно бы замерзало в те же самые годы, что и после спуска. В период понижения уровня озеро ни разу не замерзало при отсутствии условий, вызывавших ледостав в допусковой период. Все равно без штилевой погоды новообразовавшийся лед не мог бы превратиться в ледостав.

Так было до сих пор. Можно ли, однако, утверждать, что при дальнейшем спуске озера не проявится эффект уменьшения глубины? Это-

го полагать не следует. До сих пор оз. Севан замерзает сравнительно редко, потому что по своему термическому состоянию оно бывает подготовлено к ледообразованию не ранее, чем в феврале или в самом конце января (речь идет об открытом озере, а не о прибрежной части). Если в феврале не бывает безветренной погоды, ледостав уже не образуется — в марте наступает потепление. Однако, уже в настоящее время, в связи с понижением глубин, озеро бывает готово к замерзанию на 15—18 дней раньше, чем до спуска. Если спустить озеро еще на 5—6 м, новый лед станет появляться уже на 20—25 дней раньше. Следовательно, если озеро, готовое к замерзанию, попадет в условия штиля уже в январе, то ледостав, безусловно, образуется.

Таким образом, при дальнейшем спуске озера вероятность его полного замерзания увеличивается в значительной степени.

Попытка предсказания повторяемости ледоставов на оз. Севан может быть сделана при условии, что спуск озера будет приостановлен на отметке 20 м, как это сейчас планируется. В этом случае можно считать, что в дальнейшем, как и до сих пор, ледостав будет определяться, в первую очередь, климатическими условиями, т. е. той же погодной областью, которая выделяется на графике замерзания (фиг. 2). Иначе говоря, будем считать, что повторяемость ледостава попрежнему будет определяться повторяемостью холодных и безветренных зим, которая, в свою очередь, зависит от глобальных изменений климата.

Как сказано выше, последний 11-летний цикл (№ 19) солнечной активности проходил на очень высоком уровне, т. к. совпал с вершиной векового цикла. Последний максимум (1957 г.) характеризовался числом Вольфа  $W_{\max} = 190$ . Следующий максимум солнечной активности, (цикл № 20), будет значительно ниже, с числами Вольфа от 48 до 100, по прогнозу разных авторов [2, 5]. Такой же невысокий ожидается солнечная активность и в последующем цикле № 21 [3, 5]. Среднегодовые числа Вольфа, если учесть прогнозы максимумов, будут, видимо, в пределах 30—50, т. е. такими же, как в период 1834—1948 гг.

На основании этого можно предполагать, что в ближайшие 20 лет повторяемость ледостава на оз. Севан будет значительно меньше, чем это было за последние 15 лет. Подчеркиваем при этом, что так можно полагать лишь в том случае, если спуск озера будет приостановлен в ближайшие годы.

## Օ. Ա. ԱԶԵՐՆԻԿՈՎԱ

ՍԵՎԱՆԱ ԼՃԻ ՍԱՌՑԱՊԱՏՄԱՆ ԿԱԶՄԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ ՆՐԱ ԿՐԿՆՈՒՄՆԵՐԻ  
ԿԱՆԽԱԳՈՒՇԱԿՈՒՄԸ

## Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում քննարկվում են վերջին տարիների ընթացքում հաճախակի դարձած Սևանա լճի սառցապատման պատճառները: Որոշված են օդերևութաբանական պայմանների և լճի խորության ազդեցությունները սառցապատման առաջացման վրա և պարզված է կլիմայական փոփոխությունների որոշիչ գերը: Սևանա լճի սառցապատման հաճախականության և արեգակնային ակտիվության միջև հայտնաբերված կապի հիման վրա կանխագուշակություն է արվում, որ հաջորդ 20 տարիների ընթացքում սառցապատումները կնվազեն, եթե միայն դադարեցվի լճի մակարդակի իջեցումը:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Айнбунд М. М. К вопросу о термическом режиме озера Севан. Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме. Т. 1, Изд. АН Арм. ССР, 1961.
2. Безрукова А. Я. Прогнозы чисел Вольфа в четных и нечетных 11-летних циклах солнечной активности. Солнечные данные, № 11, 1959.
3. Бонов А. Д. Относительно векового цикла солнечной активности. Солнечные данные, № 3, АН СССР, 1964.
4. Вительс Л. А. Магнитные бури как солнечный репер атмосферной циркуляции. Бюллетень комиссии по исследованию Солнца, № 1 (15), 1949.
5. Витинский Ю. И. О возможных параметрах 20-го и 21-го солнечных циклов. Солнечные данные, № 1, АН СССР, 1961.
6. Гидрогеологический ежегодник, т. 3, вып. 2—5, 1941—1962.
7. Марков Е. С. Озеро Гокча. СПб, 1911.
8. Руководство по гидрологическим прогнозам, вып. 4 (ред. Л. Г. Шуляковского) ГИМИЗ, Л., 1963.
9. Шуляковский Л. Г. Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах. ГИМИЗ, М., 1960.
10. Эйгенсон М. С. Солнце, погода и климат. ГИМИЗ, Л., 1963.