

О .А. АЗЕРНИКОВА

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ВОДНОСТИ
ОЗЕРА СЕВАН

В настоящей работе излагаются результаты попытки выявить гармонические составляющие в многолетних колебаниях аккумуляции вод в озере Севан и в основных определяющих ее факторах. Закономерности изменений аккумуляции вод в Севане представляют значительный интерес, учитывая, что этот водоем снабжает водой и электроэнергией важнейшие экономические районы Армянской ССР, и вопрос о рациональном использовании севанской воды является насущным.

Аккумуляция воды в водоеме является результирующей прихода и расхода воды. Уравнение водного баланса озера Севан можно представить в следующем виде:

$$\bullet \quad Q_1 + r + p_1 = E + Q_2 + p_2 \pm A_1$$

Здесь Q_1 —приток в озеро поверхностных вод; r —осадки на зеркало; p_1 —подземный приток; E —испарение; Q_2 —поверхностный сток; p_2 —подземный сток; A_1 —фактическая аккумуляция вод в озере.

Изменчивость естественной аккумуляции вод в Севане весьма значительна: годовой объем аккумуляции в период с 1891 по 1966 гг. изменялся от 750 до минус 350 млн. м³ (естественной аккумуляцией, в отличие от фактической, мы называем ту аккумуляцию, которая наблюдалась бы в бессточном озере).

Объем естественной аккумуляции можно вычислить по уравнению:

$$A = S (h_n - h_{n-1}) + Q_2.$$

Здесь A —естественная аккумуляция вод; S —площадь озера; h_n —уровень озера в конце данного года; h_{n-1} —уровень озера в конце прошедшего года.

Указанным способом мы рассчитали годовые объемы естественной аккумуляции вод за 1891—1919 гг. Данные за 1927—1966 гг. были приняты по расчетам Армглавэнерго, произведенным таким же способом. Разрыв ряда аккумуляции в 1920—1926 гг. связан с отсутствием данных о годовых уровнях в этот период.

Расчет аккумуляции вод за 1891—1919 гг. выполнен по данным об уровнях озера Б. Д. Зайкова [4]. Сток из озера в этот период не учтен, так как наблюдения над стоком р. Раздан начались лишь в 1926 г. Однако это едва ли сколько-нибудь заметно отразилось на результатах расчета: естественный годовой сток р. Раздан изменялся незначительно от года к году, в сравнении с изменчивостью аккумуляции вод в Севане. Многолетняя амплитуда колебаний стока р. Раздан составляла 50 млн. м³, то есть 5% от амплитуды многолетних колебаний аккумуляции.

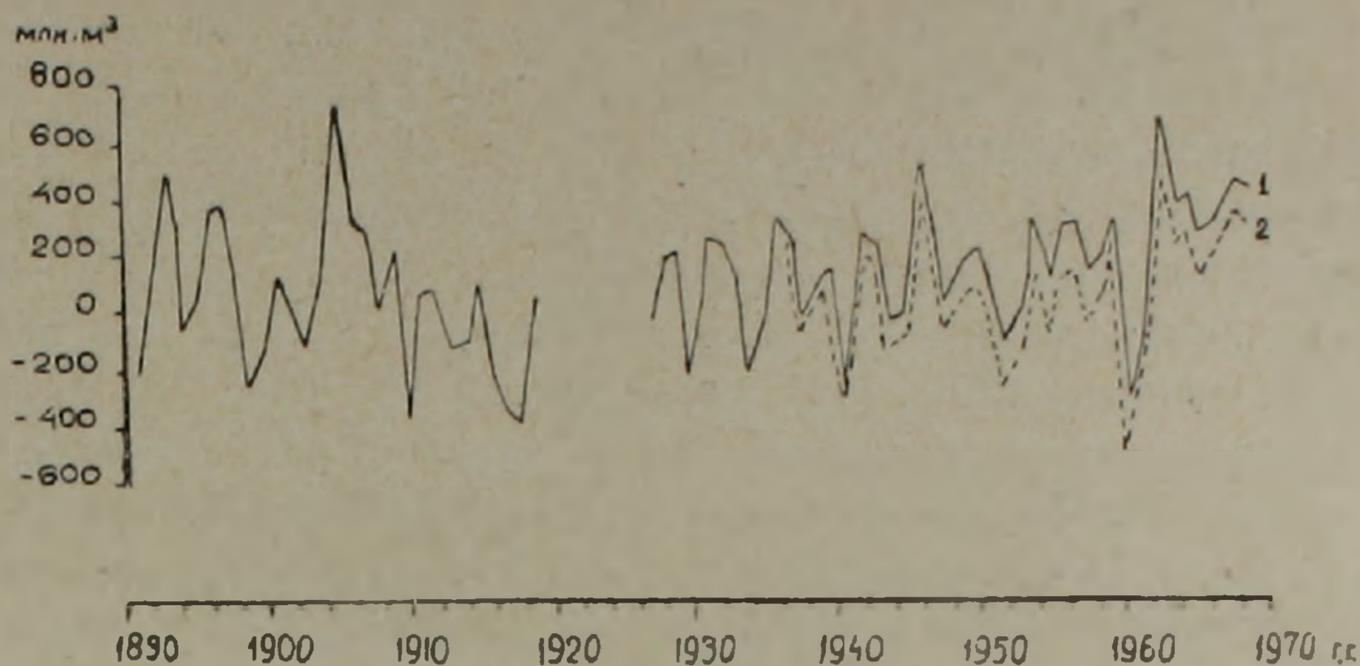
Способы нахождения скрытых регулярных явлений часто разделяют на прямые и косвенные. Для гидрометеорологических рядов, при наличии больших искажений в анализируемой зависимости, более пригодны косвенные методы. К ним можно отнести метод периодограмм, скользящее сглаживание, корреляционный и спектральный анализ.

Чтобы выявить цикличность в многолетних изменениях аккумуляции вод в Севане, мы применили несколько методов, уже апробированных разными авторами на гидрометеорологических рядах. Нами были выбраны метод автокорреляции [2] и две разновидности периодограмма-анализа — метод Кри [12] и метод Карузертс [13]. Каждая из этих методик имеет свои достоинства и недостатки и в совместном применении они дополняют друг друга. На особенностях каждого метода мы не останавливаемся, так как они подробно изложены в литературе. Все они основаны на теории вероятностных процессов, которая позволяет привязать статистические расчеты к координате времени. Таким закономерностям подчиняются обычно стационарные процессы, которые характеризуются постоянством во времени математического ожидания и дисперсии, и корреляционная функция которых зависит только от времени. Гидрометеорологические процессы в некотором приближении являются стационарными [2, 5, 8], поэтому к ним можно применить не только теорию вероятностей, но и теорию вероятностных процессов. Путем спектрального разложения можно установить цикличность, присущую в той или иной мере всем стационарным процессам.

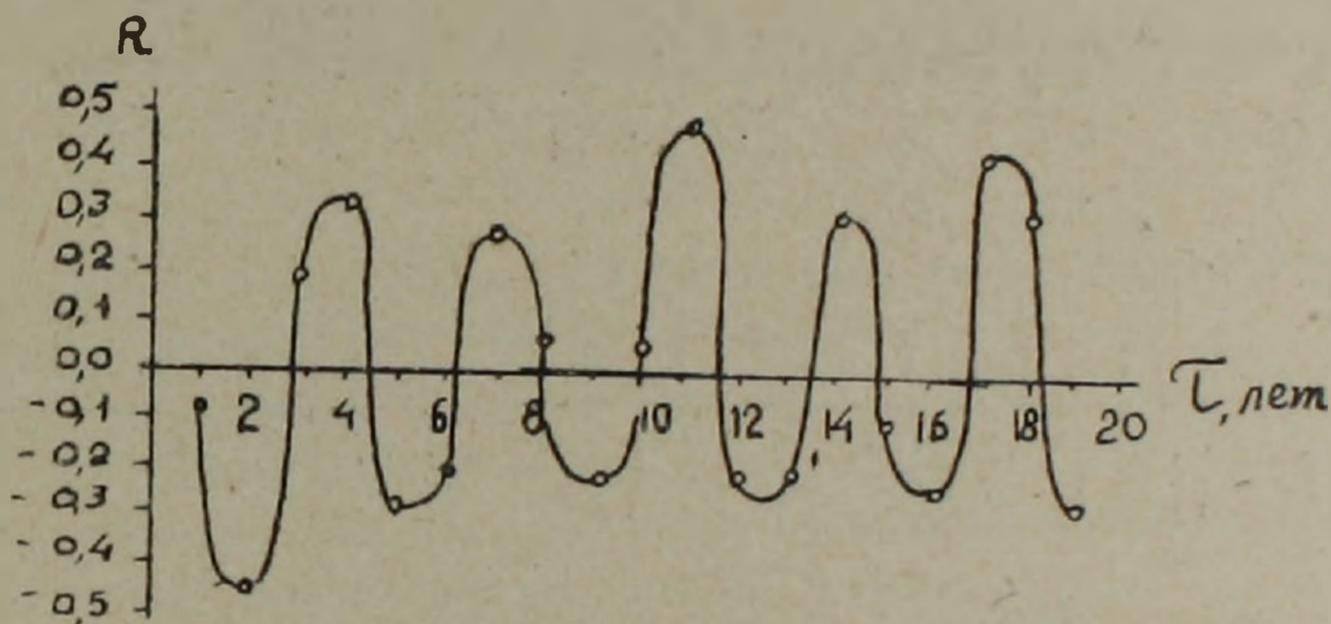
На первый взгляд подобный подход к гидрометеорологическим процессам кажется малообоснованным, так как любое макроявление природы имеет многоступенчатую схему формирования, и его можно рассматривать как последнее звено длинной (формально бесконечной) цепи причинно-следственных явлений. Иначе говоря, по абсолютному происхождению явление природы случайно. Но по своему непосредственному проявлению оно необходимо и поэтому проявляет определенные закономерности.

Колебания аккумуляции вод в озере Севан также относятся к категории неслучайных явлений. На рис. 1 представлен многолетний ход аккумуляции вод в Севане. Уже на приведенной кривой заметна та четырехлетняя ритмичность, с которой появляются экстремальные значения аккумуляции. Однако беспорядочное расположение экстремумов относительно средней линии не позволяет говорить о какой-либо четкой закономерности. Можно даже предположить, что рассматриваемый ряд является случайным и только имитирует цикличность колебаний. Однако, вычислив критерий реальности отличия наблюдаемого ряда от случайного, можно убедиться, что это не так. Мы выбрали критерий δ , предложенный А. В. Рождественским [8] для проверки гипотезы случайности колебаний сток рек: $\delta = \frac{q^2}{\sigma^2}$, где

$$q^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2; \quad \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$



Фиг. 1. Аккумуляция вод в озере Севан: 1 — натурные данные, 2 — данные, приведенные к условиям озера до спуска.



Фиг. 2. Корреляционная функция $R(\tau)$ аккумуляции вод в озере Севан.

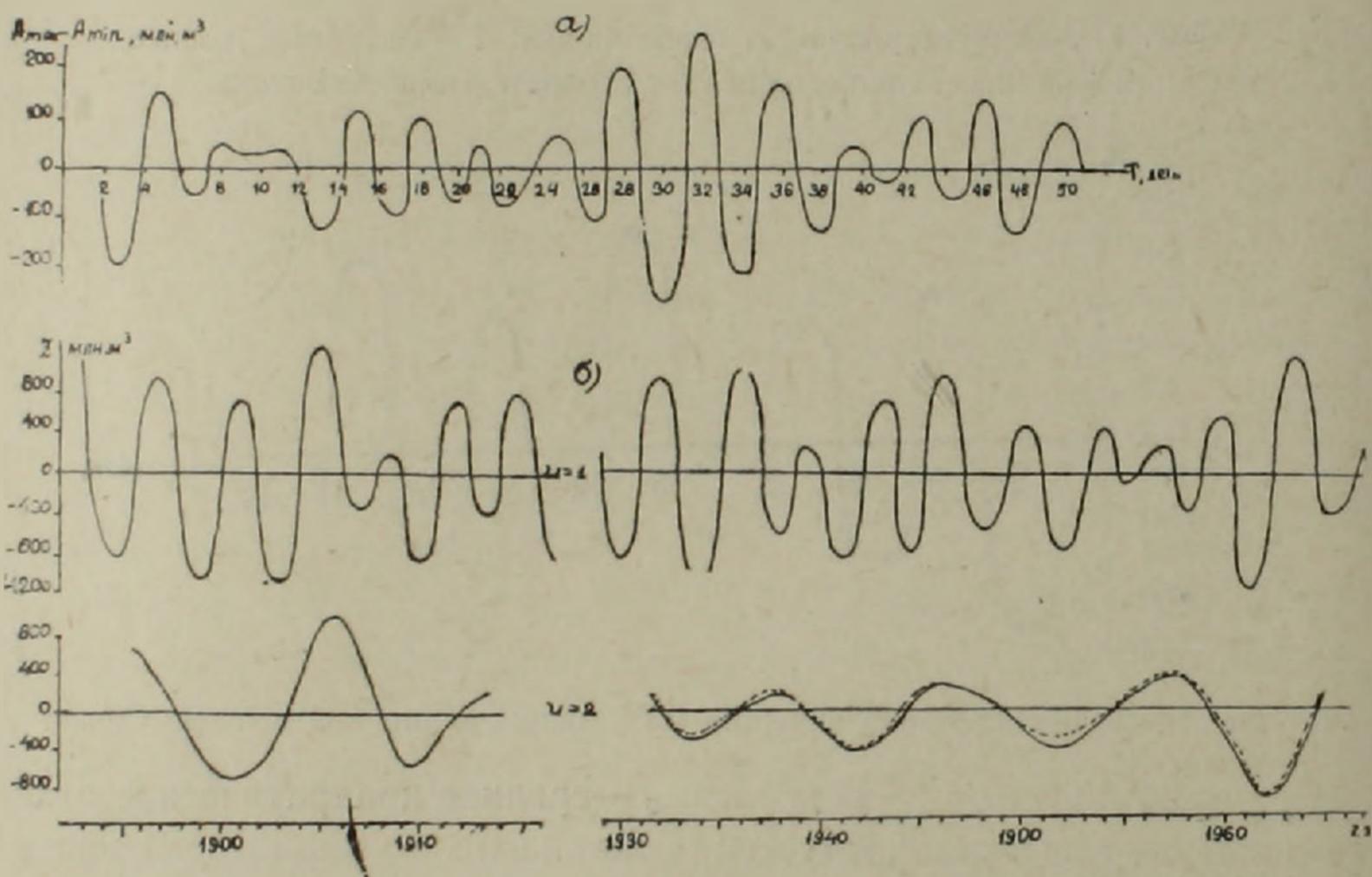
Здесь i — ряд чисел от $i=1$ до $i=n$; σ — среднее квадратическое отклонение ряда; q — тоже квадратическое отклонение, но характеризующее меру колеблемости около какого-то переменного уровня. Чем плавнее и закономернее движение средних значений по сравнению со случайными колебаниями около них, тем меньше значения δ . Эти значения колеблются от 0 до 2. При условии стохастической независимости ряда $S \gg 1$.

Величина δ для ряда аккумуляции в Севане оказалась равной 0,65 за 1891—1919 гг. и 0,78 за 1927—1966 гг. Такое значение δ свидетельствует о том, что колебания в исследуемом ряду являются неслучайными, и для их исследования может быть применена теория вероятностных процессов.

Расчет корреляционной функции аккумуляции вод в озере Севан был произведен за 1927—1966 гг., т. е. за последние 40 лет. Предыдущие 29 лет пришлось отбросить из-за разрыва в наблюдениях, так как для отдельного расчета по этому методу ряд слишком мал. На рис. 2 представлена корреляционная функция аккумуляции $R(\tau)$, рассчитанная с максимальным сдвигом 19 лет. Как видим, скоррелированность членов ряда имеет хорошо выраженный циклический характер: $R(\tau)$ принимает максимальные значения через 3—4 года. Наибольшие коэффициенты корреляции имеют место при сдвигах 4, 11, 17 лет. Они равны соответ-

ственно 0,34; 0,51; 0,45. Надо отметить, что эти значения заметно выше, чем у температуры воздуха и у стока рек, когда максимальные значения R , как правило, не превышают 0,25 [2, 9]. Между тем даже такие значения R позволили Ю. М. Алехину успешно экстраполировать $R(\tau)$ и прогноз стока рек с заблаговременностью от одного до пяти лет*.

Далее была рассчитана дифференциальная кривая для аккумуляции вод в Севане за 1891—1966 гг. по методу Кри (рис. 3а). Как видим, ряд, обработанный указанным методом, значительно стабилизировался и обнаружил весьма четкую цикличность с периодом 3—4 года. Метод Карузертс [13] также широко применяется для выявления скрытых регулярных процессов. Этот метод имеет то преимущество, что позволяет



Фиг. 3. а) — дифференциальная кривая Кри, рассчитанная для аккумуляции вод в озере Севан, б) — периодоскоп аккумуляции. Пунктирная кривая — периодоскоп аккумуляции, приведенной к условиям озера до спуска.

определить амплитуду каждой волны. Для расчета периодоскопа аккумуляции в озере Севан по методу Карузертс были использованы все наблюдения за 1891—1966 гг. К сожалению, значительный разрыв в середине ряда ограничил выделение длиннопериодных волн. Как видно из рис. 3б, волна с периодом 3—4 года выделяется на периодоскопе так же четко, как и на коррелограмме и на дифференциальной кривой Кри. Кроме этой волны, на периодоскопе выделяется еще одна, с периодом 9—10 лет. Ее реальность подтверждается двумя кривыми периодоскопа — для $U=2$ и $U=3$ (на рис. 3б приводится только одна из них: $U=2$).

Средняя амплитуда цикла 3—4 года составляет 450 млн. м³, амплитуда цикла 9—10 лет вдвое меньше — 220 млн. м³. Однако, величина ам-

* Задача экстраполяции $R(\tau)$ довольно сложна и решается с помощью электронно-счетных машин. В данной работе вопросы экстраполирования пока не рассматриваются.

плитуды короткой волны периодически изменяется на протяжении ряда лет от минимального значения 120 млн. м³ до максимального 810 млн. м³. Изменчивость более длинной волны значительно меньше—от 150 до 340 млн. м³. Трудно объяснить, чем вызваны такие значительные колебания амплитуды меньшего цикла, но, по-видимому, они не являются случайными, так как такие же «биения» наблюдаются на кривой Кри (рис. 3а). В обоих случаях увеличения амплитуды наблюдаются через 14—15 лет.

В табл. 1 сведены основные результаты анализа цикличности аккумуляции вод в озере Севан.

Таблица 1

Метод выделения циклов	Число лет в цикле		
Автокорреляция	4	11	17
Метод периодограмм Карузерс	3—4	9—10	—
Синхронизирующий метод Кри	3—4	—	—

Примечание: прочерк означает невозможность выделения волн данного цикла из-за ограниченности метода, а не отсутствие волн.

Как видим, все три метода дают близкие между собой результаты, что свидетельствует о реальности выделенных циклов. Вполне достоверными можно считать циклы 3—4 и 9—11 лет.

Здесь необходимо рассмотреть вопрос, является ли весь ряд аккумуляции вод в Севане за 1891—1966 гг. однородным в отношении колебательных процессов. Известно, что в результате спуска озера произошли некоторые перемены в его режиме, которые не могли не отразиться на водном балансе. Эти изменения частично исследованы и описаны в сборнике [7]. С учетом этих исследований мы рассчитали поправку для приведения ряда аккумуляции в период спуска к естественным условиям. Суммарная поправка ΔA вычислена как сумма поправок отдельных элементов водного баланса:

$$\Delta A = \Delta E + \Delta Q_1 + \Delta p_1 + \Delta p_2 - \Delta r.$$

Здесь ΔE —уменьшение испарения, рассчитанное по данным об испарении с зеркала озера в данном году и об уменьшении зеркала озера на этот год, по сравнению с естественным. Также рассчитано уменьшение осадков Δr ; ΔQ_1 —увеличение притока поверхностных вод, вычисленное из расчета, что с освободившейся из под воды территории стекает 55 мм осадков [7]; Δp_1 —дополнительный подземный приток, обусловленный снижением уровня озера. Его значения указаны в работе [11]; p_2 —уменьшение подземного стока из озера, рассчитанное по способу, предлагаемому В. А. Грабовниковым [3]. Значения всех указанных поправок приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Поправки элементов водного баланса для приведения его к естественным условиям (в млн. м³)

Год	ΔQ	Δp_1	$-\Delta E$	$-\Delta p_2$	$-\Delta r$	ΔA
1937	0	15	0	0	0	15
1938	0	20	0	2	0	22
1939	0	30	1	4	0	35
1940	0	40	1	8	0	49
1941	0	42	4	15	1	60
1942	0	45	7	18	3	67
1943	0	48	8	21	3	74
1944	0	50	10	24	4	80
1945	0	50	12	28	4	86
1946	0	50	12	31	7	86
1947	1	50	15	34	9	91
1948	1	50	17	36	7	97
1949	2	50	24	38	8	106
1950	2	50	25	43	10	110
1951	2	50	30	46	17	111
1952	3	50	37	49	10	129
1953	3	50	46	53	18	134
1954	4	50	43	56	20	133
1955	4	50	58	59	28	143
1956	4	50	68	60	31	151
1957	5	50	64	61	28	152
1958	5	50	70	62	37	150
1959	6	50	67	62	50	135
1960	6	35	76	64	44	137
1961	7	50	101	65	29	194
1962	7	50	108	66	54	177
1963	8	35	118	67	83	145
1964	8	12	105	67	47	145
1965	8	20	112	68	71	137
1966	8	0	123	68	60	139
1967	8	0	113	69	73	117
1968	8	0	119	69	64	132
1969	8	0	112	69	56	133

Как видно из табл. 2, изменение аккумуляции за счет изменений в морфологии озера носит достаточно закономерный характер. Примерно до 1961 г. поправка ΔA возрастала, а затем сравнительно стабилизировалась в связи с замедлением спуска озера. Колебания поправки аккумуляции (которые связаны с колебаниями климата озера) весьма незначительны, по сравнению с колебаниями самой аккумуляции.

На рис. 1 пунктиром обозначена кривая аккумуляции, исправленная поправкой ΔA и приведенная таким образом к условиям озера до его спуска. Как видно из рисунка, характер колебаний аккумуляции (т. е. хронология ее минимумов и максимумов) не изменился. Изменилось лишь среднее положение, относительно которого происходят эти колебания.

Из рис. 1 также видно, что тенденция к общему небольшому возрастанию аккумуляции за последние 30 лет (кривая 1) есть следствие морфологических изменений озера, т. к. в ходе приведенной аккумуляции (кривая 2) эта тенденция отсутствует.

Для более строгого контроля однородности имеющихся данных об аккумуляции в отношении их многолетних колебаний мы рассчитали периодоскоп ряда аккумуляции, исправленного поправкой ΔA , т. е. приведенного к условиям до спуска озера. Кривая периодоскопа нового ряда с циклом 3—4 года полностью совпала с кривой, вычисленной для натурального ряда аккумуляции. На кривой с циклом 9—10 лет лишь очень незначительно изменилась амплитуда циклов, период же не изменился (см. линию на рис. 3б, обозначенную пунктиром).

Проведенный анализ дает основание считать имеющийся натуральный ряд аккумуляции вполне репрезентативным относительно колебательных процессов, а выводы о характере цикличности аккумуляции—правомочными.

Чтобы получить представление о генетике циклов в аккумуляции вод озера Севан, была исследована цикличность основных составляющих водного баланса, сумма которых определяет объем аккумуляции в первую очередь. Были проанализированы ряды данных по притоку поверхностных вод в озеро Севан, осадки на его зеркало и испарение с поверхности озера, за 1927—1966 гг. Осадки и испарение за 1927—1958 гг. приняты по расчетам Г. А. Александряна и А. М. Мхитаряна [7]. За 1959—1966 гг. эти элементы рассчитаны нами по методике, рекомендованной теми же авторами. Приток поверхностных вод в Севан за 1927—1966 гг. рассчитан нами.

Результаты анализа цикличности элементов водного баланса приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Циклические составляющие элементов водного баланса озера Севан

	Метод выделения циклов	Число лет в цикле		
		нет	есть	нет
Осадки	Автокорреляция	нет	9, 11	нет
	Метод периодограмм Карузера	3—4	9—10	—
	Синхронизирующий метод Кри	3—4	—	—
Приток	Автокорреляция	нет	7, 11	19
	Метод периодограмм Карузера	3—4	нет	—
	Синхронизирующий метод Кри	3—4	—	—
Испарение	Автокорреляция	нет	нет	нет
	Метод периодограмм Карузера	нет	нет	—
	Синхронизирующий метод Кри	нет	—	—

Как видно из табл. 3, циклы в осадках выражены достаточно хорошо и составляют 3—4 и 9—11 лет.

В притоке поверхностных вод так же хорошо выражен цикл 3—4 года. Более длинный цикл менее четок, его длина колеблется от 7 до 11 лет.

Цикличность в ходе испарения настолько неустойчива, что нет оснований считать ее реальной (хотя и здесь слабо намечаются те же циклы, что и в других элементах водного баланса).

Таким образом, циклы в аккумуляции вод длительностью в 3—4 года и 9—11 лет можно считать следствием цикличности тех факторов, которые ее определяют—в первую очередь, осадков и притока поверхностных вод. Нужно заметить при этом, что цикличность в аккумуляции выражена отчетливее, чем в любом из элементов водного баланса. По-видимому, само озеро играет некую регулирующую роль (например, путем подземного водообмена) и делает колебания водонакопления в своем ложе более плавными, более стационарными.

Что касается физической интерпретации полученных результатов, то при современном уровне знаний о причинно-следственных связях в системе «Земля—атмосфера—космос» наши возможности пока еще очень ограничены. Пока здесь можно сказать лишь следующее.

Цикл длиной в 3—4 года в колебаниях гидрометеорологических элементов встречается нередко. Несколько лет тому назад нам, в частности, удалось выделить четырехлетний цикл в колебаниях зимней температуры воды в Баренцевом море [1]. Как было установлено группой авторов [10], в колебаниях годовой температуры воды Баренцева моря присутствует целый ряд гармоник, с периодом 4, 7, 11 и 18 лет. Наличие близких по длине циклов в колебаниях таких разных элементов, как температура воды в Баренцевом море и водность Севанского бассейна, а также множество других подобных примеров в разных районах Земли позволяет говорить о глобальном характере первопричин, вызывающих эти колебания.

О происхождении 4-летнего цикла пока трудно сказать что-либо определенное. Что же касается цикла 9—11 лет, то он встречается повсеместно [5, 6, 9, 10], и обычно его связывают с физической переменностью Солнца. Как известно, активность Солнца имеет относительно упорядоченный характер, который выражается, в частности, хорошо известным 11-летним циклом (период в этом цикле изменяется от 8 до 13 лет).

Цикл 17—19 лет, который обнаружен нами в колебаниях аккумуляции и притока вод в Севан, может быть связан с вариацией приливобразующей силы Луны [6], период которой изменяется от 17 до 21 года.

Наряду с дальнейшим изучением генетики циклических колебаний, уже в настоящее время делаются успешные попытки использовать эти данные для прогнозирования гидрометеорологических элементов [2, 6].

В этом аспекте может быть использована также цикличность аккумуляции и других элементов водного баланса озера Севан, поскольку она выражена не хуже (а в некоторых отношениях и лучше), чем цикличность других природных процессов. Предварительные расчеты по приближенным методам показали, что такая возможность является вполне реальной.

Օ. Ա. ԱԶԵՐՆԻԿՈՎԱ

ՍԵՎԱՆԱ ԼՃԻ ԶՐԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՑԻԿԼԱՅԻՆ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում դիտարկվում են Սևանա լճի ջրերի կուտակման և այն որոշող էլեմենտների-մակերևույթային ջրերի հոսքի, տեղումների և գոլորշիացման բազմամյա տատանումների գոյություն ունեցող ցիկլայնության անալիզի արդյունքները: Հետազոտությունները կատարված են երեք ձևերով՝ ավտոկորելյացիայի, Կրիի և Կարուզերսի մեթոդներով: Զրային բալանսի բոլոր էլեմենտների տատանումներում, բացառությամբ գոլորշիացման, հայտնաբերված են ցիկլայնության բաղադրիչներ 3—4 և 9—11 տարի պարբերությամբ: Մակերևույթային ջրերի հոսքի և լճի ջրերի կուտակման համար ևս գոյություն ունի ցիկլ 7—19 տարի պարբերությամբ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Азерникова О. А. Долгосрочный прогноз температуры воды в Баренцевом море. Труды Полярного науч.-иссл. ин-та морского рыбного хоз.-ва и океанографии. Вып. 20, 1967.
2. Алехин Ю. М. Статистические прогнозы в геофизике. Изд. Ленинградского ун-та, 1963.
3. Грабовников В. А. Фильтрация из озера Севан и ее изменение в процессе понижения уровня озера. В сборнике «Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме». Т. 1, 1961.
4. Зайков Б. Д. Гидрологический очерк бассейна озера Севан. Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна. Ч. 1, вып. 3, 1933.
5. Калинин Г. П. Некоторые закономерности колебаний стока рек Северного полушария. В сборнике «Многолетние колебания стока рек и вероятностные методы его расчета». Изд. Московского гос. ун-та, 1967.
6. Максимов И. В. и Смирнов Н. П. Опыт построения долгосрочного прогноза форм атмосферной циркуляции в Северном полушарии компонентно-гармоническим методом. Тр. Арктического и Антарктического ин-та, т. 262, 1966.
7. Мхитарян А. М., Александрян Г. А. и Атаян Э. А. Водный баланс озера Севан. Результаты комплексных исслед. по Севанской проблеме. Том 1, 1961:
8. Рождественский А. В. Статистический анализ циклических колебаний некоторых стоковых рядов. Тр. Ленинградского гидрометинститута, вып. 26.
9. Рубинштейн Е. С., Полозова Л. Г. Современное изменение климата. ГИМИЗ, Л., 1966.
10. Смирнов Н. П., Саруханян Э. И., Бочков Ю. Я. Многолетние колебания гидрологического режима Баренцова и Норвежского морей и возможности их прогнозирования. В сборнике «Материалы сессии Ученого совета ПИНРО по результатам исследований в 1965 году», вып. 8, Мурманск, 1967.
11. Суицов М. А. Подземный приток в озере Севан. Материалы комплексных исследований по Севанской проблеме, т. 1, 1961.
12. Хомерики И. В. К вопросу исследования циклических вариаций речного стока. В сборнике «Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета». Изд. Московского ун-та, 1967.
13. Carrutners N. A. simple periodoscope for meteorological data. J. Roy. Met. Soc.; vol. 70, № 7305, 1944.