

В. А. ФРЕЙНДЛИНГ

## О ТЕМПЕРАТУРНОМ РЕЖИМЕ ОЗЕРА СЯМОЗЕРА

Среди водоемов южной Карелии наиболее крупным и ценным в хозяйственном отношении является оз. Сямозеро, на котором в течение ряда лет Карельский филиал Академии наук СССР проводит научные исследования с целью создания рационального рыбного хозяйства.

В общем комплексе исследований озера значительное внимание уделяется изучению температурного режима как одного из основных факторов, определяющих интенсивность развития биологических и гидрохимических процессов в его водной массе.

В результате двухлетних наблюдений отдела гидрологии (1954—1956 гг.) была дана характеристика годового цикла температурного режима Сямозера и рассмотрено внутригодовое изменение количества тепла в озере и факторы, их определяющие (Фрейншлинг, 1955, 1958, 1959). Настоящее исследование преследует цель более широкого освещения температурного режима водоема на основе шестилетнего периода наблюдений (1954—1960 гг.) и установления его возможных отклонений от средних характеристик, что необходимо для познания природы и биологии водоема в разные годы.

В дополнение к материалам температурных съемок, выполненных отделом гидрологии филиала, в работе использованы сведения о температурах воды (1958—1960 гг.) в районе максимальной глубины озера, заимствованные из материалов Института биологии Карельского филиала Академии наук СССР.

Исследования велись круглогодично методом температурных съемок на сети станций, равномерно распределенных по акватории озера. Наиболее детально изучался слой температурного скачка, величиной и положением которого определяется степень прогретости водных масс озера и интенсивность развития биологических процессов в эпилимнионе и гиполимнионе. Число станций в различные сезоны года изменялось от 80 — в период температурной стратификации, до 4 — при гомотермии.

До осени 1958 г. температурные наблюдения проводились опрокидывающимся термометром при передвижении по водоему со скоростью 8—10 км/ч. Для выполнения съемки по всей акватории требовалось около двух дней. В последующем, когда появилась возможность применения малоинерционных электротермометров и передвижения по водоему на быстроходном судне со скоростью до 30 км/ч, ценность термической съемки значительно повысилась. Время съемки сократилось до 8—10 ч, что приблизило ее к одновременным наблюдениям.

Для подсчета теплосодержания в водной массе озера в предшествующих исследованиях мы применяли метод Гальбфасса (1896), основанный на вычислении количества тепла в водоеме с учетом его морфологических особенностей. Послойно вычислялась средняя температура как среднее из всей серии наблюдений для данного срока; ее произведение на объем слоя дает элементарный теплозапас; его последовательное суммирование по слоям составляет общий запас тепла в водоеме. Все величины выражались в единицах измерения: глубина в метрах, объем водной массы в кубических метрах, содержание тепла в тоннокалориях.

Этот метод удобен для общей тепловой характеристики как всего водоема, так и отдельных его слоев. Для сравнения теплового режима разных озер, каждое из которых имеет свои морфологические особенности, пользоваться методом Гальбфасса нельзя, поскольку им учитывается специфика только одного водоема.

Для рассмотрения теплового режима разных озер, а также сравнения их температурного состояния удобно пользоваться методом, предложенным американскими лимнологами Берджем и Джэдэй (1912). В нем для каждого слоя воды учитывается количество тепла, содержащееся в столбе воды сечением  $1 \text{ см}^2$  и высотой, равной отношению объема этого слоя к площади водоема. Россолимо (1929) для изучения явлений перемещения тепла в пределах водной массы одного озера, а также для оценки относительной прогремости его отдельных слоев предложил пользоваться относительными величинами.

Реймерс и Комс (1956) считают, что сравнение температурных условий различных водоемов удобнее вести методом градусо-дней, а не по запасам тепла. По их мнению этот метод не зависит от глубины, рельефа дна, объема водной массы и позволяет производить расчеты для любого отрезка времени и любой части водоема.

В нашей работе в дальнейшем, чтобы удобнее рассмотреть температурный режим различных по величине и морфологическим характеристикам водоемов, установить аналогии и различия между ними, мы пользуемся методом Берджа — Россолимо.

Основными факторами, обуславливающими тепловое состояние водной массы озер, являются широтное положение, метеорологические условия предшествующего и настоящего периодов, индивидуальные особенности водоема (морфология котловины, характер прилегающей местности, речное и грунтовое питание, тип донных отложений и т. д.).

Одновременная сложная зависимость температурного состояния водоема от большого числа факторов, ее определяющих, указывает на невозможность установления непосредственной связи термики с отдельными факторами. Известно, что термический режим озера зависит от температуры воздуха. Если исключить влияние прочих факторов и рассматривать связь только между температурами воды и воздуха, то представление о термике водоема будет неверным. Попытка установления связи между температурой воды и двумя элементами — температурой воздуха и ветром — также не приведет к положительным результатам, поскольку при этом не учитывается влияние морфологических особенностей котловины. При формировании температурного режима ряда озер (Пертозеро, Каскеснаволоцкое) этот фактор может быть определяющим.

Правильнее рассматривать те показатели температурного режима, которые отражают совокупность действия всех факторов, формирующих термику озера. К их числу относятся средняя температура воды, тепловой запас, устойчивость водной массы, работа ветра, затрачиваемая на перемещение тепла в глубь водоема.

Скорость перемешивания воды и выравнивания температур по глубине определяется не только величиной факторов, вызывающих это явление, но и сопротивлением, оказываемым нижележащими слоями. Чем значительнее разница плотности воды отдельных слоев, тем больше их сопротивление перемешиванию, иными словами, выше их вертикальная устойчивость. Ее характеристикой в озере служит градиент плотности  $E = \frac{d\rho}{dz} \text{ г/см}^4$ , где  $\rho$  — плотность воды,  $\text{г/см}^3$ ,  $z$  — глубина, см (Зайков, 1955).

Основным фактором перемешивания водных масс является ветер. Вертикальное распределение температуры в озере и ее изменение на глубинах во времени позволяют судить о работе ветра, оценить его роль в формировании температурного режима водоема. Американский лимнолог Бердж (1916) на основе работ на Фингерских озерах предложил формулу для вычисления работы, которую необходимо затратить при перемешивании воды для того, чтобы температуру данного слоя изменить от  $4^\circ\text{C}$  до температуры  $t$   $W = RT \cdot Z \cdot (1 - \rho_z)$ , где  $W$  — работа ветра,  $\text{г/см}$  на  $1 \text{ см}^2$  поверхности озера;

$RT$  — отношение объема слоя к поверхности водоема, иными словами, вес в граммах столба воды с основанием  $1 \text{ см}^2$  и высотой, равной относительной толщине слоя;

$Z$  — расстояние слоя от поверхности водоема, см;

$\rho_z$  — плотность воды при данной температуре.

Бердж предложил также формулу для вычисления количества тепла, перенесенного с помощью этой работы с  $1 \text{ см}^2$  поверхности водоема на данную глубину:  $\tau = RT (t_z - 4)$ , где  $\tau$  — тепло,  $\text{г/кал}$ ;  $t_z$  — температура на глубине  $Z$ .

За весь период летних наблюдений на Сязозере подсчитаны работа ветра, затрачиваемая на нагревание водных масс, и количество тепла, перенесенное ветром внутрь водоема. Их величины приводятся в разделах, где дается характеристика температурных периодов.

Для общего представления о водоеме и особенностях формирования его термического режима приводится краткая характеристика Сязозера. Подробные сведения о нем — гидрология, гидрохимия, хозяйственное использование — опубликованы в 1959 г.

Озеро Сязозеро (рис. 1) является третьим по величине среди водоемов южной Карелии и наиболее важным в рыбохозяйственном отношении. Площадь озера  $270,3 \text{ км}^2$ . Многочисленные острова (около 80), общей площадью  $3,28 \text{ км}^2$ , расположены преимущественно вблизи северного и восточного берегов, благодаря чему центральная часть озера остается открытой для ветров всех направлений. Береговая линия ( $159 \text{ км}$ ) сильно изрезана губами и заливами, наиболее крупные из них (залив Эссойльский, Кухагуба, Чуйнаволоцкая губа) имеют свободное сообщение с центральным плесом, ряд заливов (Лахтинский, Курмойльский, Сяргилахтинский) полутчленены от озера и имеют свой гидрологический режим. Рельеф дна водоема типичен для озер моренного происхождения и представляет собой сочетание отдельных впадин с мелководными участками. Максимальная глубина  $24,5 \text{ м}$ , средняя  $6,7$ . Глубины выше средней занимают около 25% общего объема озера, что характеризует Сязозеро при его значительных размерах как водоем сравнительно мелководный, в котором все температурные изменения определяются ветровым перемешиванием. Наблюдения за ветром, проведенные на водоеме в различных пунктах — в центре, на западном и восточном берегах (Фрейндлинг, 1959, — показали, что сила и направление ветра значительно изменяются по его акватории. В связи с этим данные о ветре

по ближайшей метеорологической станции Пряжа, расположенной в 25 км к юго-востоку от озера, могут быть использованы только для приближенной характеристики температурных условий водоема.

Число температурных вертикалей, необходимое для достаточно полного представления о тепловом состоянии озера, в разные периоды года различно. Исследования, проведенные для ряда лет, показали, что



Рис. 1. Схематическая карта Сямозера.

после освобождения водоема ото льда переход через температуру наибольшей плотности воды ( $4^{\circ}\text{C}$ ) происходит по акватории не одновременно. Водные массы в разных частях озера находятся в состоянии гомотермии, обратной стратификации (участки акватории, где заканчивалось таяние льда); в отдельных районах озера уже наблюдается прямая стратификация. Важность этого периода для развития биологической жизни требует детальной характеристики термических условий и, следовательно, значительного числа температурных станций по всей акватории водоема, особенно, если этот период проходит при ограниченном ветровом перемешивании.

Послойное распределение теплового запаса, вычисленного по различному числу станций (табл. 1), подтверждает вышеизложенное. Если переходный весенне-летний период ограничивается наблюдениями только на одной вертикали в районе максимальной глубины, то расхождение с содержанием тепла в центральной части водоема, вычисленного по ряду станций, охватывающих всю его акваторию, достигает 10—20%.

В период летнего прогрева эта разница сокращается до 0,5, при гомотермии до 1—2%.

На основании проведенного исследования можно принять, что для характеристики теплового состояния центральной части водоема, исключая закрытые губы с их особым гидрологическим режимом, вполне доста-

точные наблюдения на одной вертикали, расположенной в районе максимальной глубины. Сразу же после вскрытия необходима детальная температурная съемка с охватом всей акватории водоема.

В отчлененных частях озера интенсивность тепловых процессов, а также сроки наступления переходных периодов значительно отли-

Таблица 1

Послойное распределение теплозапаса 15 мая 1959 г.  
и 16 мая 1960 г., кал/см<sup>2</sup>

Нм	15 мая 1959 г.			16 мая 1960 г.		
	для всей акватории водоема	для центральной части без заливов	для района максимальной глубины	для всей акватории водоема	для центральной части без заливов	для района максимальной глубины
0,5	854	820	832	750	600	640
1	678	644	614	690	550	612
2	548	485	400	553	456	535
3	408	356	294	450	375	465
4	286	267	228	366	290	374
5	226	215	182	294	240	310
6	185	181	156	243	223	263
7	166	166	145	221	207	236
8	124	124	111	169	156	177
9	102	102	93	143	133	147
10	79	79	73	114	104	117
11	53	53	53	81	76	82
12	42	42	42	66	66	65
13	15	15	15	23	23	23
14	11	11	11	17	17	17
15	8	8	8	15	15	15
16	6	6	6	10	10	10
17	4	4	4	5	5	5
18	3	3	3	2	2	2
19	1	1	1	1	1	1
20	3799	3582	3271	4216	3549	4096

чаются от центрального плеса. Так, 19 мая 1959 г. в центральной части озера, в поверхностном слое, отмечалась температура 9,8, по всей вертикали 4,1°. В Курмойльском заливе в прибрежной зоне вода прогрелась до 15,6°. 14 мая 1960 г. в районе максимальной глубины по всей вертикали отмечалась температура 4,2°, в Курмойльском заливе она повышалась до 11,4°.

Метеорологические условия за годы наблюдений довольно разнообразны как по температурному, так и ветровому режиму. По сумме «тепла» (положительных температур воздуха) за май — август (табл. 2) наиболее теплыми были 1959 и 1960 гг., холодным 1958 г. (близкий к среднему 1955 г.).

По характеру распределения тепла в этот период, приведенному в табл. 3 в величинах отклонений средних месячных температур воздуха

Таблица 2

## Суммы тепла за V—VIII месяцы по ГМС Пряжа

	1955 г.	1956 г.	1957 г.	1958 г.	1959 г.	1960 г.	„Норма“
Сумма „тепла“, градусо-дни . . . .	1629	1505	1675	1404	1732	1773	1639

от средних многолетних значений — «нормы», принятая тепловая характеристика лет сохраняется за исключением 1955 г., который по величине отклонений следовало бы отнести к числу холодных.

Подобное деление лет по сумме «тепла» и его интенсивности накопления при ограниченном периоде наблюдений довольно условно, при удлинении ряда отклонения в ходе температур воздуха и суммах «тепла» могут достигать значительно больших величин.

Интегральные графики положительных средних суточных температур воздуха, построенные в абсолютном и относительном видах (рис. 2), дают наглядное представление о степени интенсивности нарастания суммы тепла за летние месяцы. Понижения температур воздуха отражаются на кривой уменьшением угла наклона ее относительно горизонтальной оси, потепление выражается его увеличением.

Таблица 3

## Отклонения средних месячных температур воздуха от „нормы“, °С

Год/месяцы	V	VI	VII	VIII	IX
1955	-3,0	-2,3	-0,8	+2,2	+3,2
1956	-0,5	+3,1	-3,8	-2,1	-2,0
1957	+1,2	-1,5	+1,4	+0,9	+0,2
1958	-1,2	-1,2	-1,6	-0,8	-1,3
1959	+0,2	+1,7	+0,3	+2,0	-2,5
1960	+1,8	+1,5	+3,3	+0,9	-0,8
Средние многолетние температуры	8,2	13,5	16,6	14,0	8,8

Для всех лет наблюдений, исключая 1958 г., в период с июня по сентябрь прослеживается довольно параллельный ход суммарных кривых, свидетельствующий об одинаковой интенсивности нарастания тепла. Май характеризуется значительными колебаниями температур воздуха. Особенно выделяется 1959 г., в котором плавное нарастание тепла в середине мая сменилось похолоданием, продолжающимся до первых чисел июня — на графике пологий участок кривой с последующим быстрым ростом суммы тепла — резкое изменение угла ее наклона. Осеннее похолодание в 1959 г. началось в последней декаде августа — кривая стала принимать более плавную форму. В 1955 г. угол наклона кривой, соответствующий летнему накоплению тепла, сохранялся до середины сентября.

Применение интегральных кривых нарастания тепла позволяет анализировать условия формирования температурного режима водоема в связи с изменением температур воздуха.

Для ветрового режима в районе озера характерны: постоянное изменение направлений ветра с преобладанием ветров южного, юго-западного и северо-восточного румбов. Скорости ветра за время наблюдений изменялись от 0 до 14 м/сек, средние месячные величины от 2,7 до

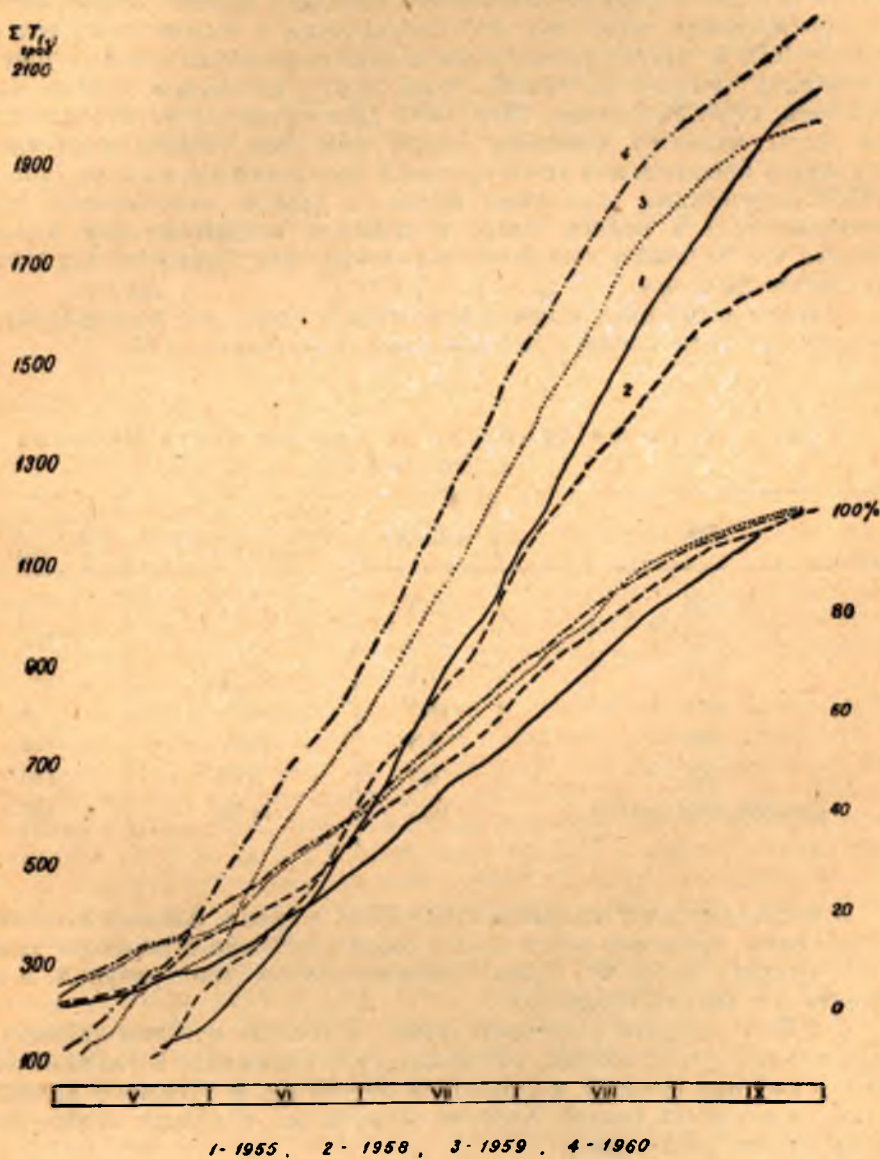


Рис. 2. Интегральные кривые нарастания тепла.

4,2 м/сек. Штилевые дни отмечались довольно редко, в большинстве случаев безветрие наблюдалось только в части суток.

Годовой цикл температурного режима озера и изменение его тепло-содержания рассматриваются в последовательности термических периодов с выделением внутри каждого из них тех особенностей режима, которые наблюдались в отдельные годы.

Весенний прогрев водоема проходит в двух фазах: подледной и после освобождения от ледяного покрова. Первая фаза начинается с момента исчезновения снега с поверхности льда и проникновения через лед солнечной радиации. На водоемах южной Карелии средние сроки таяния снегового покрова относятся к середине апреля. Солнечное тепло, проникающее через лед, концентрируется в тонком слое воды на глубине 0,75 м, откуда расходуеться в двух взаимопротивоположных направлениях: вверх — на таяние льда, вниз — на нагрев водной массы (Матвеев, 1928; Россолимо, 1929, 1930; Долматова, 1939). Началом второй фазы является очищение озера ото льда. Сроки наступления и характер прохождения этого процесса определяются, с одной стороны, метеорологическими условиями весны, с другой, количеством тепла, содержащегося в водной массе к моменту вскрытия. Для каждого водоема эта величина довольно постоянная, для Сязозера она составляет около 2200 кал.

Метеорологические условия вскрытия и сроки его наступления отличаются за годы наблюдений довольно значительно (табл. 4).

Таблица 4

Сроки вскрытия Сязозера по данным поста Угмойла  
за 1955—1960 гг.

Год	Дата вскрытия	Дата устойчивого перехода температуры воздуха через 0°	Сумма положительных температур воздуха, °С
1955	21/V	13/IV	149
1956	28/V	22/IV	169
1957	11/V	18/IV	140
1958	18/V	16/IV	94
1959	5/V	12/IV	115
1960	8/V	6/IV	110
Среднее многолетнее	10/V	11/IV	130

В последние годы вскрытие отмечалось в сроки, близкие к средним многолетним, примерно через месяц после устойчивого перехода температур воздуха через 0°. Сумма положительных температур к этому моменту составляла около 110°.

В 1956 г. в связи с суровой зимой, в течение которой накопилась значительная сумма холода, нашедшая свое отражение в толщине льда (до 110 см) при средней многолетней 50—60 см, и затяжной холодной весной на водоемах южной Карелии отмечалось вскрытие самое позднее за многолетний период.

Такие аномалии в сроках и характере его прохождения оказывают существенное влияние на развитие биологических процессов в водоеме. Весной 1956 г. 29 мая в Лахтинской губе, где сосредоточены многочисленные нерестилища щуки и карповых рыб, отмечалась температура воды около 12°. В 1960 г. такая же температура наблюдалась в первой декаде мая.

К сведениям о развитии и исчезновении ледовых явлений на озере, публикуемым в Гидрологических ежегодниках, следует относиться критически, поскольку систематические наблюдения за ними ведутся на водомерном посту, расположенном в самой южной части водоема. Зона



видимости поста ограничена пределами Эссойльской губы. Продолжительность прохождения ледовых явлений в различных районах акватории может отличаться от наблюдаемых в районе губы довольно значительно. Так, в 1956 г. пост отмечал начало разрушения льда 25 мая, очищение губы от него 28. Термическая съёмка, проведенная по всей акватории водоема 29 мая, показала, что в большинстве районов уже произошел переход через температуру наибольшей плотности. В центральной части, где завершался процесс таяния льда, сохранилась зона с температурами ниже 4°C. В значительной части озера отмечалось начало формирования термической стратификации (табл. 5).

Таблица 5

Распределение температур 29 мая 1956 г., °С

Глубина, м	Центральная часть	Западная часть	Южная часть	Сяргилахтинский залив
Поверхность	3,55	5,10	6,40	11,00
5	3,40	5,00	6,15	8,82
10	3,40	4,20	5,10	7,50

Общее количество тепла в озере 29 мая составляло 3500 кал на столб воды сечением 1 см<sup>2</sup> и высотой, равной средней глубине, что на 30% выше теплосодержания при температуре наибольшей плотности. Средняя температура для всего озера 5,24°. После достижения температуры 4° дальнейшее распространение тепла в водоеме происходит преимущественно за счет деятельности ветра.

Весной 1960 г. очищение ото льда отмечалось 8 мая. Термические наблюдения 16 мая свидетельствовали о прямой температурной стратификации по всей акватории, за исключением небольшого района в центральной части, где сохранялись температуры ниже 4° — область окончания таяния льда. Поверхностные температуры в открытом плесе изменились от 4,10 до 7,52°, придонные от 3,70 в районе таяния льда до 4,50° — в районе максимальных глубин. Средняя температура всей водной массы была 6,30°, теплосодержание — 4220 кал, что на 58% выше, чем при 4°.

Приведенные примеры указывают на различную длительность периода перехода водных масс всего водоема через температуру наибольшей плотности, зависящую главным образом от сроков и метеорологических условий вскрытия и очищения озера ото льда. Задержка этого явления в отдельных частях Сямозера в разные годы достигает 8—10 дней.

Между метеорологическими условиями весны и нагреванием глубинных слоев водной массы озер существует определенная зависимость. При теплой и дружной весне при слабых ветрах быстро возникает прямая стратификация, вблизи от поверхности образуется слой температурного скачка, затрудняющий прогрев нижележащих слоев. При холодной и затяжной весне гомотермия продолжается значительно дольше; в глубинные слои проникает тепла больше, в связи с чем вода в гипolimнионе имеет более высокую температуру.

На Сямозере при значительных размерах его акватории и постоянном ветровом воздействии на водную массу эта зависимость не прослеживается. Ветровое перемешивание разрушает слой температурного

скачка; периодически в течение всего лета происходит выравнивание температур по вертикали.

**Летний прогрев** водоема начинается с момента установления термических зон (эпи-, — мет- — и гипolimниона) и изменения темпов накопления тепла. Продолжается он до наступления летнего максимума, наблюдающегося во второй половине августа (в среднем за многолетний период); в отдельные годы наибольший прогрев водных масс отмечается в конце июля. Существенное влияние на термику этого периода оказывают характер и интенсивность нарастания тепла в озере.

Особое внимание при рассмотрении термического режима уделяется поверхностному слою, в котором тепловые процессы (поглощение, отдача) происходят наиболее интенсивно, и слою между изобатами 6—7 м, соприкасающемуся с большей частью дна водоема. На Сязозере глубины, равные средней (6,7 м), занимают свыше 75% его общего объема.

Графики хода метеорологических элементов — средней суточной температуры воздуха и средней суточной скорости ветра совместно с кривыми изменения средней температуры воды, составленные для характерных лет (рис. 3, 6), дают наглядное представление о возможных аномалиях температурного режима водоема.

В 1955 г. вторая половина мая была холодной. Средние суточные температуры воздуха (рис. 3-а) снижались до 2°, ветры, преимущественно северного и северо-восточного направлений, достигали 10—12 м/сек. В течение последней декады в условиях непрерывного ветрового перемешивания отмечен переход через температуру наибольшей плотности воды, средняя температура водных масс увеличилась с 3,24 до 4,55°, содержание тепла возросло на 937 кал.

Незначительная устойчивость водных масс в первых числах июня (табл. 6) благоприятствовала интенсивному перемешиванию их по всей глубине, на что затрачивалась работа в 14 г/см. На слой между 3 и 4 м

Таблица 6

Устойчивость водных масс в 1955 г., г/см<sup>4</sup>

Слой, м	31/V	3/VI	25/VI	6/VII	16/VII	26/VII	30/VII	6/VIII	16/VIII	24/VIII	9/IX
0—1	0	21	100	309	0	0	171	34	215	0	17
1—2	0	28	107	278	19	0	195	36	76	20	17
2—3	0	33	63	147	19	0	136	51	19	0	17
3—4	0	35	0	30	19	0	81	17	37	19	17
4—5	0	16	12	45	76	0	47	17	18	57	0
5—6	0	10	0	30	130	0	30	17	36	76	0
6—7	0	9	12	44	207	0	30	17	34	38	0

глубины, где градиент плотности был наибольшим, приходилось около 18% общего количества работы.

Благодаря действию ветра внутрь водоема поступило около 2000 кал тепла. К этому времени относится наиболее интенсивное теплопоглощение: в среднем за сутки общее количество тепла увеличивалось на 540, в слое между изобатами 6—7 м на 30 кал.

Дальнейший прогрев водоема (до первых чисел июля) проходил с среднесуточной интенсивностью теплопоглощения около 180 кал. Пе-

реход средней температуры воды через  $10^{\circ}$  отмечался в середине июня. С этого момента разность между температурами воды и воздуха становится положительной. Понижение температур воздуха ниже  $10^{\circ}$  вызывает охлаждение водоема.

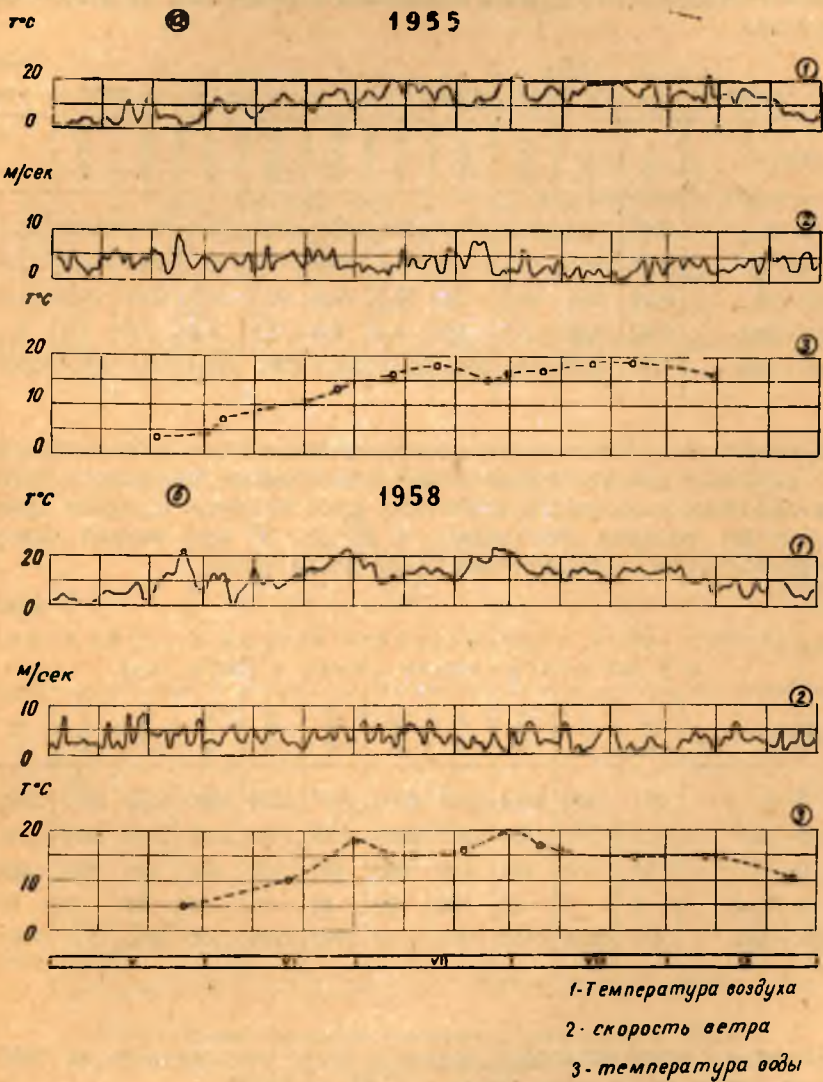


Рис. 3. а — график хода средних суточных температур воздуха, скорости ветра и средней температуры воды в 1955 г.;

б — график хода средних суточных температур воздуха, скорости ветра и средней температуры воды в 1958 г.

В конце июня в районе озера отмечались кратковременные штили, при которых в верхних слоях сформировался температурный скачок с максимумом в слое 2—3 м. 26 июня в этом слое градиент плотности составлял  $107 \text{ г/см}^4$ , к 6 июля он увеличился до  $278 \text{ г/см}^4$ . Работа ветра на его перемешивание соответственно возросла с 13 до  $29 \text{ г/см}$ , на перемешивание всей водной массы — с 150 до  $265 \text{ г/см}$  (табл. 7).

Общее количество тепла, перенесенного этой работой в глубь водоема, составляло около 8000 кал (табл. 8).

В табл. 7 и 8 приводится количество тепла, поступившего в каждый 5-метровый слой, и количество работы, затраченной на перенос его с поверхности водоема. Все суммы выражены в величинах на 1 см<sup>2</sup> поверхности озера.

Таблица 7

Работа ветра на 1 см<sup>2</sup> поверхности водоема в 1955 г., г/см

Слой, м	31/V	3/VI	26/VI	6/VII	16/VII	26/VII	30/VII	6/VIII	16/VIII	24/VIII	9/IX	24/X
0—5	0,59	9,43	56,2	103,9	140,6	103,4	130,3	142,4	166,9	185,0	125,7	0,25
5—10	0,78	3,57	78,5	112,6	161,7	116,0	119,1	159,1	170,0	187,5	142,9	1,34
10—15	0,34	0,85	49,6	42,6	52,5	41,4	40,9	51,3	53,7	58,0	51,0	1,21
15—дно	0,02	0,03	5,5	5,6	6,8	6,0	5,8	6,6	7,0	7,6	7,3	0,21
пов.—дно	1,73	13,88	189,8	264,7	361,6	266,8	296,1	359,4	397,6	438,1	326,9	3,00

Плавное увеличение тепла в озере продолжалось до середины июля. В последующие дни наступило резкое похолодание, явившееся результатом вторжения холодных арктических масс воздуха. Средние суточные температуры воздуха понизились с 20 до 8° при ветрах северного и северо-восточного направлений силой до 10 м/сек.

Таблица 8

Количество тепла, перенесенного ветром в глубь водоема с 1 см<sup>2</sup> поверхности озера в 1955 г., кал

Слой, м	31/V	3/VI	26/VI	6/VII	16/VII	26/VII	30/VII	6/VIII	16/VIII	24/VIII	9/IX	24/X
0—5	271	1596	3884	5307	6020	4997	5974	5286	6586	6911	5400	70
5—10	110	349	1735	2091	2566	1818	1858	2138	2248	2357	2047	190
10—15	29	69	491	542	602	423	420	465	484	503	469	77
15—дно	2	6	53	55	59	44	44	47	47	51	51	4
пов.—дно	412	2020	6163	7995	9247	7282	8296	7936	9365	9822	7967	341

В связи с этим теплосодержание в озере уменьшилось на 1965 кал, средняя температура воды упала с 17,85 до 14,90°.

Тепловая инерция поверхностных слоев воды очень мала. В них при незначительном понижении температур воздуха отмечается уменьшение теплозапаса, не затрагивающее нижние горизонты (рис. 4).

Кратковременное похолодание 30 июля — 6 августа вызвало снижение теплозапаса в верхнем метровом слое на 150 кал (со средней суточной потерей тепла 50 кал), в слое 1—2 м теплопотери составляли 10 кал в сутки. Глубже 2 м продолжалось дальнейшее нагревание водных масс озера. Придонные температуры за это же время увеличились на 1—2°.

Максимальный теплозапас в озере отмечался 24 августа, составляя 12 450 кал. Летний теплоприход, характеризующийся величиной накопления тепла за период с момента, когда во всем водоеме устанавливается температура наибольшей плотности, до летнего максимума, равнялся

9966 кал. На нагревание водных масс озера затрачивалась работа в 438 г/см на 1 см<sup>2</sup> поверхности, или 118 · 10<sup>8</sup> кг/м на всю акваторию водоема (табл. 9).

В 1958 г. переход через температуру наибольшей плотности проходил в условиях интенсивного ветрового перемешивания при сильных

Таблица 9

Содержание тепла летом 1955 г., кал/см<sup>2</sup>

Слой, м	21/V	31/V	3/VI	26/VI	6/VII	16/VII	26/VII	30/VII	6/VIII	16/VIII	24/VIII	9/IX
0—5	1403	1898	3219	5522	6944	7665	6042	7025	6949	7509	7713	6543
5—10	587	911	1153	2527	2910	3371	2990	3015	3331	3489	3629	3206
10—15	160	264	305	727	786	840	872	870	952	973	1000	935
15—дно	19	33	35	83	83	89	96	97	102	97	108	111
пов.—дно	2169	3106	4712	8859	10723	11965	10000	11007	11334	12068	12450	10795

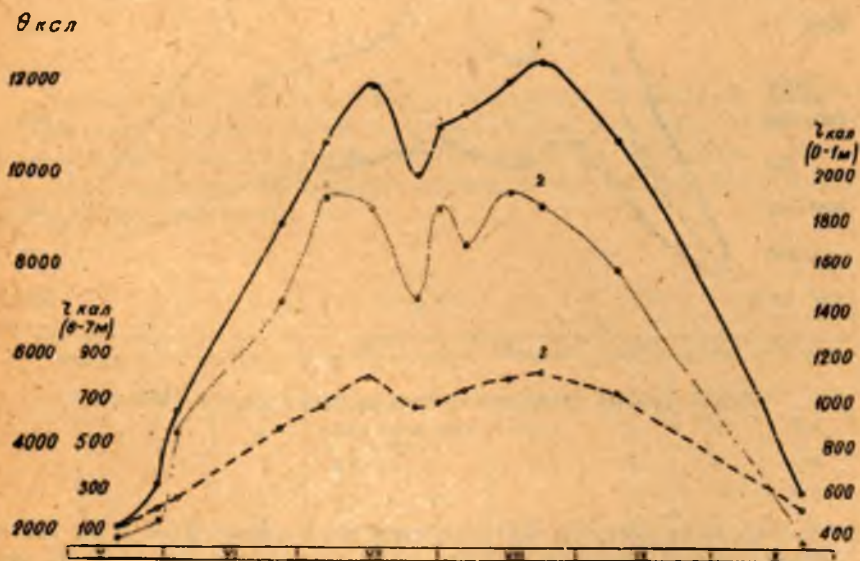


Рис. 4. Кривые изменения теплосодержания озера в 1955 г.

1. Теплосодержание всего озера
2. .. .. . слой 0—1 м
3. .. .. . слой 6—7 м

ветрах (5—10 м/сек) южных румбов и значительном повышении средних суточных температур воздуха от 10° (23 мая) до 23° (27 мая) — рис. 3-б.

Водные массы озера к 27 мая имели среднюю температуру 4,5°, в закрытых губах и заливах поверхностный слой прогрелся до 8—10°. Общее количество тепла составляло 3072 кал.

Смена ветров на северные и резкое похолодание до отрицательных температур воздуха (6 июня) замедлили интенсивность прогревания озера.

Переход температуры воды и воздуха через  $10^{\circ}$  отмечался в один день 17 июня. До конца месяца водоем быстро прогревался со средне-суточной интенсивностью теплопоглощения в поверхностном слое около  $64 \text{ кал}$ , в слое между 6 и 7 м —  $24 \text{ кал}$  в сутки, достигнув к концу срока  $12000 \text{ кал}$ , на что потребовалось  $364 \text{ г/см}$  работы.

Последующее похолодание, сопровождаемое сильными северными ветрами до  $7-8 \text{ м/сек}$ , со снижением средних суточных температур воздуха с  $19,5$  до  $9,0^{\circ}$  вызвало охлаждение всего водоема, включая его глубинные слои. Малая устойчивость водных масс (наибольший градиент плотности в  $95 \text{ г/см}^4$  отмечался на глубине  $2-4 \text{ м}$ ) благоприятствовала интенсивному перемешиванию и равномерному охлаждению озера. Общий теплоспас к 12 июня уменьшился на  $1900 \text{ кал}$  (рис. 5), поверх-

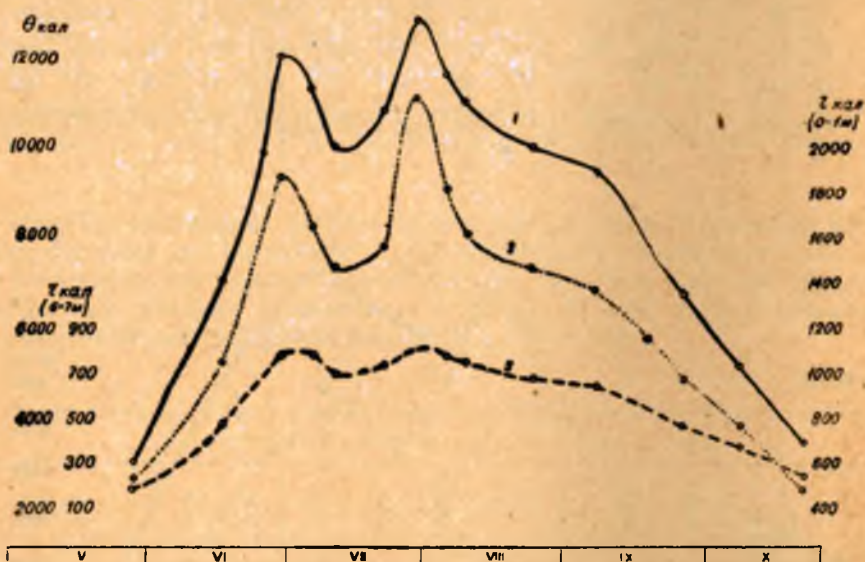


Рис. 5. Кривые изменения теплосодержания озера в 1958 г.

1. Теплоспас всего озера
2. „ „ слоя 0—1 м
3. „ „ слоя 6—7 м

ностный слой охладился на  $400 \text{ кал}$ , слой на глубине  $6-7 \text{ м}$  на  $100 \text{ кал}$ .

Максимальный прогрев водных масс отмечался 30 июля. К этому времени поверхностные температуры в центральной части озера достигли  $24$ , средняя температура воды поднялась до  $19,2^{\circ}$ , содержание тепла составляло  $12828 \text{ кал}$  (табл. 10).

Таблица 10

Содержание тепла летом 1958 г.,  $\text{кал/см}^2$

Слой, м	27/V	17/VI	30/VI	7/VII	12/VII	22/VII	30/VII	6/VIII
0—5	1987	4270	7635	6887	6085	6484	8235	7191
5—10	824	2024	3342	3372	3006	3195	3498	3373
10—15	240	633	867	935	880	909	988	954
15—дно	24	64	87	95	94	95	101	101
пов.—дно	3072	6990	11936	11297	10071	10790	12828	11625

Количество работы ветра, соответствующее наблюдаемому в летний период 1958 г. послойному распределению температуры, представлено в табл. 11. Наибольшие величины работы отмечались в слое между 7 и 8 м, где она составляла около 10% ее общего количества.

Наибольшее количество работы, затраченное ветром на перемешивание водных масс озера и их нагревание от 4° до максимальной температуры, отмеченное 30 июля, составляло 426 г/см на единицу поверхности водоема, или, в пересчете на всю его акваторию,  $114 \cdot 10^8$  кг/м.

Таблица 11

Работа ветра на 1 см<sup>2</sup> поверхности озера летом 1958 г., г/см

Слой, м	17/VI	30/VI	7/VII	12/VII	22/VII	30/VII	6/VIII
0—5	29	137	110	80	96	150	117
5—10	41	161	168	126	146	184	166
10—15	19	57	70	60	65	80	74
15—дно	3	8	10	10	11	12	12
пов. — дно	93	364	358	276	318	426	369

Летний теплоприход в 1958 г. составлял 10 144 кал. Устойчивость водных масс озера в течение всего лета была незначительной (табл. 12). В отдельные дни в разных частях водоема возникали значительно большие градиенты температур, однако и они быстро разрушались ветровым перемешиванием.

Таблица 12

Устойчивость водных масс в 1958 г., г/см<sup>4</sup>

Слой, м	27/V	17/VI	30/VI	7/VII	12/VII	27/VII	30/VII	6/VIII
0—1	4	11	20	0	0	0	454	151
1—2	3	10	20	0	0	0	354	70
2—3	1	10	95	0	0	0	117	18
3—4	3	10	95	0	0	0	76	36
4—5	2	20	91	0	0	0	112	18
5—6	0	0	88	0	0	0	36	33
6—7	0	0	84	33	0	0	0	17

В 1959 г. начальный период летнего прогрева (рис. 6-а) проходил при низких температурах воздуха и ветрах переменных направлений с кратковременными штилями. Образовавшиеся в поверхностных горизонтах градиенты плотности (до 95 г/см<sup>4</sup>) быстро разрушались ветрами переменных направлений, чем обеспечивалось их медленное прогревание (рис. 7) и передача тепла в глубь водоема. За 15 дней мая содержание тепла в поверхностном слое увеличилось всего на 50, а в слое между 6 и 7 м глубины на 220 кал. Общее количество тепла возросло на 2400 кал (табл. 13).

Максимальный прогрев водоема отмечался 20 августа. Средние температуры воды в озере к этому времени увеличились до  $20,4^{\circ}$ , запас тепла достиг 13602 кал. Летний приход тепла составил 10925 кал.

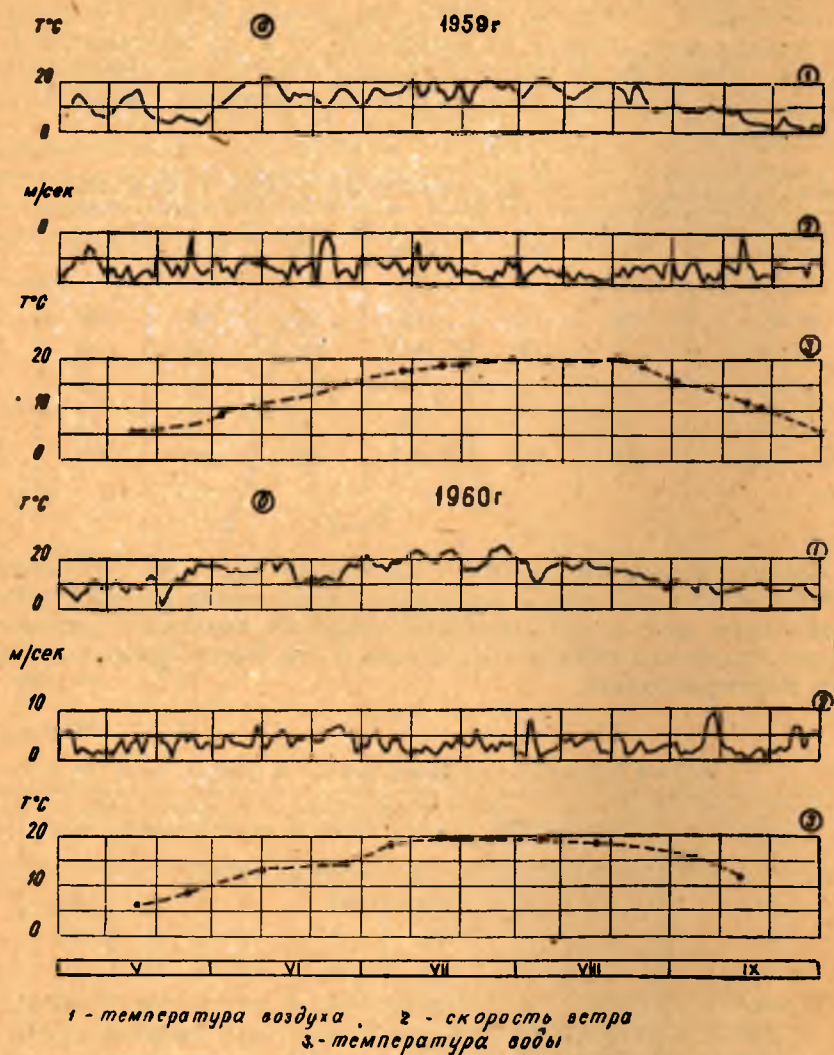


Рис. 6. а — график средних суточных температур воздуха, скорости ветра и средней температуры воды в 1959 г.;

б — график средних суточных температур воздуха, скорости ветра и средней температуры воды в 1960 г.

На перенос этого количества тепла с поверхности и распределение его внутри водоема потребовалось  $556 \text{ г/см}$  работы ветра на единицу площади, или, в пересчете на всю акваторию озера,  $149 \cdot 10^8 \text{ кг/м}$  (табл. 14).

Устойчивость водных масс озера в период летнего прогрева в среднем для всего водоема была незначительной (табл. 15), достигая максимума около  $200 \text{ г/см}^4$  в верхних слоях. В отдельные сроки в ряде





районов акватории при кратковременных штилях образовывались значительно большие, чем указаны в таблице, градиенты плотности. Однако они не могли оказать длительного сопротивления ветровому перемешиванию.

Таблица 15

Устойчивость водных масс летом 1959 г., г/см<sup>4</sup>

Слой, м	15/V	4/VI	27/VI	16/VII	20/VII	25/VII	30/VII	10/VIII	15/VIII	20/VIII	25/VIII
0—1	94	194	49	0	0	150	0	0	106	0	0
1—2	42	85	32	19	19	167	0	20	84	0	0
2—3	20	45	16	19	38	80	0	0	83	42	0
3—4	18	32	31	38	38	117	62	20	80	21	0
4—5	3	28	30	19	19	38	80	0	20	0	0
5—6	2	14	45	19	19	19	60	0	0	0	0
6—7	2	14	45	19	38	0	0	0	0	0	0

Величина летнего прогрева в 1960 г. была близкой к летнему теплотапасу 1959 г. Однако по характеру нарастания тепла, особенно по его послыному изменению, эти годы существенно отличались друг от друга.

В начале летнего периода (с 15 мая до 10 июня) аккумуляция тепла проходила со средней суточной интенсивностью около 190 кал, чему благоприятствовала незначительная устойчивость водных масс озера (табл. 18).

Переход температуры воды в водоеме через 10° произошел 30 мая — самый ранний за годы наблюдений срок. Похолодание, отмечавшееся во второй половине июня со снижением средней суточной температуры воздуха с 20 до 10° (рис. 6-6), значительно замедлило прогрев озера. Интенсивность теплопоглощения снизилась по всему водоему до 50 кал в сутки, в поверхностном слое до 5 кал, в слое 6—7 м до 4.

Максимум летних температур наблюдался 16 июля (рис. 8). Средняя температура воды повысилась до 19,7°, запас тепла для всего озера равнялся 13184, для поверхностного слоя 2240 кал. Наибольшее тепло-содержание в слое на глубине 6—7 м отмечалось 26 июля — 880 кал. Подобный сдвиг максимумов прогрева по слоям довольно характерен для температурного режима Сязозера: в верхних слоях уже начинается медленное охлаждение (после 16 июля оно ограничивалось слоем 0—4 м), в глубинных слоях еще продолжается повышение тепла.

В период максимума летнего прогрева поверхностные температуры воды в открытой части озера достигали 23,6, в заливах 24°. Придонные горизонты имели температуру около 16°. Наибольший прогрев придонных слоев отмечался 16 августа, когда вся масса воды озера имела температуру 18,4° (табл. 16).

Как и в прежние годы, в верхнем пятиметровом слое в летние месяцы тепла содержалось около 60% от общего теплового запаса озера.

Летний теплоприход составлял 10500 кал, для нагревания озера до этой величины потребовалось 449 г/см работы ветра на единицу поверхности, или для всей площади водоем  $120 \cdot 10^8$  кг/м (табл. 17).

В период летнего максимума на перенос тепла с поверхности на глубину наибольшее количество работы требовалось в верхнем пяти-

Таблица 16

Содержание тепла летом 1960 г., кал/см<sup>2</sup>

Слой, м	16/V	26/V	10/VI	27/VI	6/VII	16/VII	26/VII	5/VIII	16/VIII	5/IX
0—5	2779	3622	5628	6017	7525	8556	7895	7938	7480	6281
5—10	1070	1662	2578	2930	3502	3530	3889	3755	3686	3104
10—15	301	480	694	842	992	994	1125	1085	1080	909
15—дно	34	54	69	88	104	104	122	118	117	98
пов.—дно	4184	5818	8969	9877	12123	13184	13031	12896	12363	10392

Таблица 17

Работа ветра летом 1960 г., г/см на 1 см<sup>2</sup> поверхности озера

Слой, м	10/VI	27/VI	6/VII	16/VII	26/VII	5/VIII	16/VIII	26/VIII	5/IX
0—5	63	78	133	168	152	152	134	119	89
5—10	83	118	184	187	235	219	210	186	137
10—15	31	53	81	82	110	101	100	88	65
15—дно	4	6	12	12	18	17	16	15	11
пов.—дно	183	255	410	449	515	489	460	408	302

метровом слое (36%). Максимум ее для всего водоема отмечался 26 июля, совпадая с наибольшими величинами для всех слоев, исключая слой 0,5 м, в котором к этому времени уже началась теплоотдача. При охлаждении водных масс количество затрачиваемой работы значительно меньше, поскольку в этом процессе параллельно с работой ветра действует конвекционное перемешивание.

Сопротивление воды ветровому перемешиванию летом 1960 г. было незначительным. Максимальные градиенты плотности отмечались в середине июля (табл. 18), достигая в поверхностном слое 256, в слое 3—4 м — 237 г/см<sup>4</sup>.

В основном прогрев водных масс озера проходил при незначительном температурном расслоении в условиях, близких к гомотермии.

Таблица 18

Устойчивость водных масс летом 1960 г., г/см<sup>4</sup>

Слой, м	16/V	26/V	10/VI	27/VI	6/VII	16/VII	26/VII	5/VIII	16/VIII	26/VIII
0—1	6	40	0	15	58	256	20	20	0	0
1—2	18	19	16	15	57	244	20	60	0	0
2—3	31	14	13	0	57	230	0	40	0	0
3—4	16	7	26	15	38	237	0	40	0	0
4—5	12	7	26	0	55	133	0	20	0	0
5—6	11	7	39	0	18	18	0	38	0	0
6—7	5	7	38	0	34	36	20	19	0	0

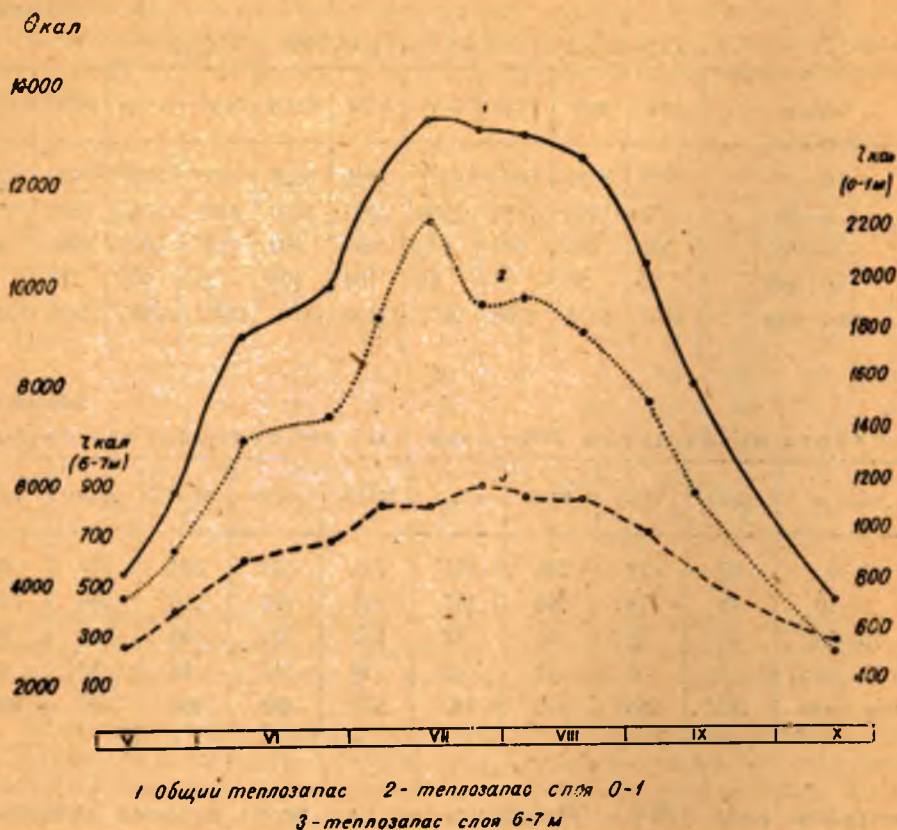


Рис. 8. График средних суточных температур воздуха, скорости ветра и средней температуры воды в 1960 г.

На формирование температурных условий последующих периодов, в особенности подледного, существенное влияние оказывает не столько величина летнего теплоприхода, сколько длительность сохранения высоких средних температур, при которых происходит интенсивное теплопоглощение донными отложениями.

Естественно, что чем выше температура придонного слоя и чем дольше она сохраняется, тем больше тепла будет аккумулировано дном.

За рассматриваемые годы различия в длительности этих периодов были довольно значительны: в холодном 1958 г. отмечался только один день со средней температурой воды в  $19,2^{\circ}$ , в теплые годы — 1959 и 1960 — эта температура удерживалась в течение 19—20 дней (табл. 19).

Особенности термических условий летнего периода исследуемых лет свидетельствуют о довольно широком диапазоне возможных летних температур, сроков их наступления, а также величин теплосодержания.

Осеннее охлаждение водоема начинается с момента перехода водных масс через максимум температур и продолжается до установления устойчивого ледостава. Перемещение тепла в этот период происходит под действием ветрового и конвективного перемешивания. По характеру вертикального распределения температур и по преобладанию того или иного из факторов, охлаждающих водную массу, этот период разделяется на три фазы. В первой фазе происходит выравнивание темпера-

Таблица 19

Тепловые характеристики Сямозера за 1955—1960 гг.

Год	Дата перехода воды через 10°	Дата летнего максимума	Летний максимум, кал/см <sup>2</sup>	Летний теплоприход, кал/см <sup>2</sup>	Максимум яркости ветра, г/см	Продолжительность наблюдаемой температуры в днях	
						10° и >	19—20°
1955	15/VI	24/VIII	12450	9966	438	99	—
1958	15/VI	30/VII	12828	10144	426	100	1
1959	4/VI	20/VIII	13609	10925	515	104	20
1960	30/V	20/VII	13184	10500	556	110	19

тур по глубине, во второй — охлаждение в состоянии гомотермии, в третьей водные массы озера достигают температуры наибольшей плотности и отдают тепло атмосфере до установления ледостава. В первой и второй фазах охлаждение водоема проходит при ветровом и конвективном перемешивании, в третьей фазе конвекция прекращается и основным охлаждающим фактором остается ветер.

В условиях Сямозера выделение первой и второй фазы довольно условно, поскольку происходит постоянное чередование слабой температурной стратификации с гомотермией. Это неоднократно отмечалось и в период летнего прогресса.

Время начала охлаждения, его интенсивность и продолжительность за годы наблюдений изменяются в широких пределах (табл. 20) и находятся в прямой зависимости от метеорологических условий периода.

Таблица 20

Характеристика периода охлаждения

Год	Начало охлаждения водоема	Дата перехода температуры воды через 4°	Дата перехода температуры воздуха через 0°	Дата устойчивого ледостава
1955	24/VIII	2/XI	1/XI	21/XI
1958	30/VII	22/X	19/XI	27/XI
1959	20/VIII	13/X	9/XI	15/XI
1960	26/VII	—	—	13/XI

Чем длительнее охлаждение, тем большее количество тепла отдается донными отложениями в воду, а через нее в атмосферу, тем меньше будет теплосодержание в период ледостава.

Самая поздняя дата начала периода охлаждения, отмеченная за рассматриваемые годы, относится к 1955 г. В поверхностных горизонтах с незначительными температурными градиентами теплоотдача началась несколько раньше, чем в глубинных слоях (рис. 4). Водоем в среднем за сутки терял около 140 кал. Переход средних температур воды в литорали через 4° отмечался на водомерном посту (южный берег озера) 24 октября. Устойчивый переход средних суточных температур воздуха через 0° произошел 1 октября, в это же время наблюдался переход водных масс всего водоема через температуру наибольшей плотности.

Дальнейшее охлаждение водоема проходило при низких температурах воздуха и ветрах переменных направлений, имеющих среднюю скорость 4—5 м/сек, максимум силы ветра достигал 10 м/сек. Первые ледовые образования на озере появились 1 октября, устойчивый ледостав наступил 21 октября. Температуры воды в верхнем пятиметровом слое в результате длительного ветрового перемешивания при низких температурах воздуха понизились к моменту ледостава до 0°. В 1958 г. охлаждение началось 30 июля в состоянии гомотермии. До 8 сентября теплоотдача составляла около 80 кал в сутки, в последующем, до конца второй фазы, она увеличилась до 140 кал. Переход через температуру наибольшей плотности произошел 22 октября. За десять последующих дней теплозапас в озере снизился на 544 кал, средняя температура воды понизилась до 3,2°. К середине ноября количество тепла уменьшилось еще на 740 кал, вода охладилась по всей глубине до 2,1°. Переход средних суточных температур воздуха через 0° отмечался 19 ноября при ветрах северного направления силой до 10 м/сек. Озеро покрылось льдом 27 ноября. Наиболее интенсивно Сямозеро охлаждалось осенью 1959 г. (рис. 7). Понижение средних суточных температур воздуха с 20 до 8° вызвало быстрое падение теплозапаса с 20 августа по 1 сентября в среднем на 310 кал в сутки.

Вторая фаза осеннего охлаждения (переход через 4°) закончилась 13 октября. Дальнейшая отдача тепла проходила в условиях отрицательных температур воздуха и ветров преимущественно северных румбов, с максимальной скоростью до 10 м/сек. Устойчивый ледостав отмечался 15 ноября. Температурные наблюдения, выполненные в районе максимальных глубин 17 ноября, характеризовали следующее тепловое состояние водных масс озера: в открытой части по всей глубине отмечалась температура 0,27°, температура поверхности дна равнялась 1,40°. В южной отчлененной от озера губе подледный слой воды имел температуру 0,55, на глубине 5 м — 0,95°, придонный слой (глубина 7,4 м) — 1,52°. Температура дна равнялась 2°. Общее содержание тепла в озере составляло около 180 кал.

Сведения о температурах воды переходного периода получить для всех лет не удалось, поскольку наблюдения в это время связаны с большими затруднениями. Только осенью 1959 г. термические наблюдения были выполнены через несколько дней после того, как установился устойчивый ледостав. Полученные данные характеризуют тепловое состояние озера в момент перехода от охлаждения водных масс к их подледному прогреву. Количество тепла в 180 кал может быть принято как минимальный годовой теплозапас озера.

**Зимний период**, или период подледного прогрева, начинается с момента установления устойчивого ледостава и продолжается до начала весеннего прогрева. Температурные условия в нем определяются количеством тепла, содержащегося в донных отложениях, а также степенью охлаждения водных масс в предшествующий период.

Температурные условия зимы 1955—1956 гг. подробно рассматривались в трудах Сямозерской комплексной экспедиции (Фрейндлинг, 1959). Поступление тепла характеризовалось следующими величинами: 11 января — 544, 1 марта — 669, 13 апреля — 910 кал. Если условно принять начальное теплосодержание в озере за 200 кал, то зимний теплоприход (до 13 апреля) составлял 700 кал.

Зимой 1959—1960 гг. подледный прогрев был значительно больше: 15 декабря теплозапас водной массы был 366 кал, 8 апреля — 1381 кал. Зимний теплоприход равнялся 1800 кал, что составляло 9% годового

теплоприхода. В слое на глубине 6—7 м количество тепла увеличилось с 12 до 112 кал.

Подобная разница зимнего теплоприхода двух лет является результатом различной степени аккумуляции тепла донными отложениями и расходования его в предледоставный период. Летом 1959 г. летний прогрев был интенсивнее и продолжительнее, чем в 1955 г. (табл. 19).

В целом для температурного режима Сязозера характерны следующие основные моменты:

1. При большой площади акватории и малой средней глубине озера ветровое перемешивание является основным фактором формирования летнего теплового состояния.

2. Устойчивость водных масс в течение лета незначительна. Образовавшиеся в теплые штилевые дни градиенты плотности не могут оказать длительного сопротивления ветровому перемешиванию.

3. Значительным фактором вертикального выравнивания температур является волновое перемешивание. При длине разгона волны 15—20 км волнение развивается очень быстро. Высота волны при ветре силой 5—6 м/сек достигает 0,5—0,6 м, длина волны около 2,5—3,0 м. В результате ветрового и волнового воздействия озерные воды перемешиваются до дна.

4. Прогрев водоема в состоянии гомотермии или слабого температурного расслоения обеспечивает значительную аккумуляцию тепла донными отложениями.

5. Тепловая инерция водных масс озера невелика. Резкие понижения температуры воздуха при интенсивном ветровом и волновом перемешивании отражаются на тепловом содержании водоема, захватывая зону максимальных глубин.

6. Тепловой режим озера вполне благоприятен для развития биологических процессов: летние температуры в поверхностном слое достигают 20—24°, придонные слои прогреваются до 19°.

## ЛИТЕРАТУРА

- Долматова Т. В. Наблюдения над температурой подледного слоя воды на Байкале весной 1932. «Тр. Байкальской лимнологич. ст.», вып. 9, М.—Л., 1939.
- Зайков Б. Д. Очерки по озероведению. Л., Гидрометеиздат, 1955.
- Матвеев В. П. Влияние инсоляции на суточный ход температуры воды под ледяным покровом. «Изв. ГГИ», Л., 1928, № 21.
- Россолимо Л. Л. Термика Косинских озер. «Тр. Косинской биологич. ст.», вып. 10, М., 1929 (1930).
- Фрейндлиг В. А. Термические исследования озера Сязозера. Тезисы доклада научной сессии, посвященной 10-летию деятельности филиала Госиздат КАССР, 1955.
- Фрейндлиг В. А. О теплозапасе озер на примере Сязозера. Тезисы доклада VI научной конференции по изучению водоемов Прибалтики, Вильнюс, 1958.
- Фрейндлиг В. А. Гидрологическая характеристика Сязозера. В кн.: «Труды Сязозерской комплексной экспедиции», т. I, Госиздат Карельской АССР, 1959.
- Birge E. and Juday C. A Limnological study of the Finger Lakes of New York. From Bulletin of the Bureau of Fisheries. Vol. 32, 9912.
- Birge E. The work of the wind in warming a Lake. Traues. Wise. Acad. Sc., Arts and Let., Vol. 18, Part 2, 1916.
- Halbfass W. Der Arendsee in der Altmark. Peterman's Mitt. Bd. 42, 1896.
- Reimers N., Combs B. Method of evaluating temperature in Lakes with description of thermal characteristics on Convict Lake. Fish. Bull., Fish. and Wildlife Serv., № 105, 1956.