

IV. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПОТОКОВ ЧЕРЕЗ ТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДОЕМЫ И ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ КАЛЬДЕРЫ УЗОН

На Узоне основная часть тепла выносится через поверхность горячих водоемов. Основное внимание было уделено разработке методики определения тепловых потоков через термальные водоемы. Другие виды теплоотдачи измерялись общепринятыми методами и поэтому на них останавливаться не будем.

Теплоотдача с поверхности воды осуществляется посредством трех различных механизмов. Это потери тепла на испарение воды, на нагревание воздуха, соприкасающегося с поверхностью, и на излучение. Теплоотдачу в атмосферу можно представить в виде суммы трех слагаемых:

$$Q = Q_{\text{исп}} + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{изл}}$$

$$Q_{\text{исп}} = W\gamma,$$

где W – средняя скорость испарения и γ – полная теплота испарения воды при температуре поверхности водоёма

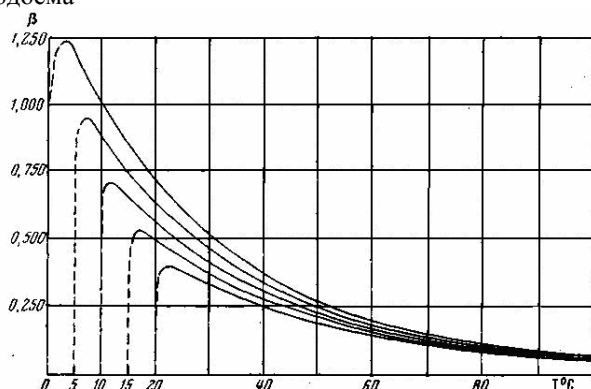


Рис. 31. Зависимость коэффициента β от температуры водной поверхности для температур воздуха 0.5; 10; 15 и 20°С

Зависимость скорости испарения от внешних условий можно выразить полуэмпирической формулой (Dawson, 1964):

$$W = (0,031 + 0,0135 V) \cdot (P_t - P_d) \cdot 760/P_t$$

где V - скорость ветра, м/сек, P_t - давление насыщенного пара при температуре поверхности водоёма, мм Hg; P_d - давление пара в атмосфере, мм Hg; P_t - атмосферное давление.

Для горячих водоемов в условиях Камчатки практически всегда $P_t \ll P_d$. Поэтому W приблизительно пропорционально P_t , а так как P_t - показательная функция температуры, то W очень быстро возрастает с температурой.

Величина W измеряется непосредственно при помощи испарителей, помещаемых на поверхность водоёма. Потери тепла на подогревание воздуха непосредственно измерить нельзя, однако для расчета можно воспользоваться тем, что механизмы теплоотдачи испарением и нагреванием воздуха имеют много общего. И в том, и в другом случае перенос осуществляется в две ступени: диффузия молекул пара и передача тепла путем теплопроводности в тонком граничном слое - первая ступень и турбулентная конвекция в остальном пространстве - вторая. Определяющей в обоих случаях является первая ступень. Скорость переноса при этом зависит от градиента концентрации водяного пара в первом случае и от градиента температуры - во втором. Градиенты определяются разностью влажностей и температур воздуха и воды и толщиной пограничного слоя. Толщина пограничного слоя одинакова в обоих случаях и определяется скоростью ветра. Для горячих водоемов разность влажностей по обе стороны пограничного слоя практически определяется температурами воды и воздуха. Таким образом, отношение $\beta = Q_{\text{возд}}/Q_{\text{исп}}$ должно зависеть только от температур воды и воздуха.

Величину β как функцию температур воды и воздуха можно рассчитать, воспользовавшись выше приведенной полуэмпирической формулой, (Dawson, 1964):

$$\beta = Q_{\text{возд}} / Q_{\text{исп}} = 6,1 \times 10^{-4} P_t t_s - t_{\text{возд}} / P_t - P_{\text{возд}}$$

где t_s - температура поверхности воды; $t_{\text{возд}}$ - температура воздуха; P_t , и $P_{\text{возд}}$ - давление насыщенных паров воды при температурах воды и воздуха.

Знаменатель дроби приблизительно экспоненциальная функция температуры воды, числитель - линейная. Поэтому β довольно быстро убывает с увеличением температуры воды (рис. 31).

Для проверки формулы экспериментально определялась зависимость величины β от температуры. По кривым охлаждения рассчитывалась теплоотдача с поверхности горячей воды, налитой в сосуд с хорошо теплоизолированными стенками. Потери тепла через теплоизоляцию учитывались.

Теплоотдача с поверхности чистой воды $Q_1 = Q_{\text{исп}} + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{изл}}$. Для подавления испарения поверхность воды покрывалась тончайшей пленкой битума, и тогда $Q_2 = Q_{\text{возд}} + Q_{\text{изл}}$. Величина β находилась из соотношения:

$$\beta = Q_2 - Q_{\text{изл}} / Q_1 - Q_2$$

При всех наших измерениях теплоотдача излучением рассчитывалась по Формуле Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{изл}} = \sigma C (T_{\text{вод}}^4 - T_{\text{возд}}^4),$$

где $\sigma = 1,36 \times 10^{-11}$ ккал/м²с - постоянная Стефана-Больцмана, C - коэффициент черноты, для воды и водяного пара, равный 0,96; T - абсолютная температура.

Относительный вклад всех трех механизмов теплоотдачи с поверхности термальных водоемов в зависимости от температуры воды показан на рис. 32.

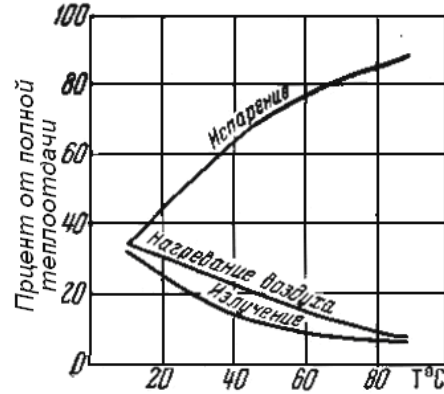


Рис. 32. Зависимость относительного вклада теплоотдачу с водной поверхности, механизма испарения, излучения и нагревания воздуха от температуры

Мы полагаем, что приток тепла в термальный водоем из глубины постоянен. Теплоотдача с поверхности водоема, зависящая от атмосферных условий, колеблется в широких пределах и равна притоку тепла в среднем. Таким образом, чтобы получить интересующую нас величину теплового потока, подогревающего водоем, следовало бы усреднить результаты достаточно большого числа измерений теплоотдачи, проведенных при различных условиях, учитывая при этом влияние инсоляции.

Однако величину теплового потока через водоем можно найти менее трудоемким способом, измеряя тепловые потери и скорость нагревания (или охлаждения) воды в течение сравнительно короткого промежутка времени.

Представим себе следующую схему. В термальный водоем снизу поступает количество тепла q ккал/с. Во внешнюю среду водоем отдает $(O + RtC)$ ккал/с.

Здесь R - расход вытекающей из водоема воды при температуре t . Масса воды в водоеме M . Метод требует выполнения двух условий: 1) постоянство во времени притока тепла q ; 2) пропорциональность прироста теплосодержания водоема (ΔH) приросту температуры Δt .

Анализ непосредственных наблюдений за характером тепловой разгрузки термальных водоемов позволяет заключить, что эти условия выполняются. Изменение теплосодержания связано с изменением температуры соотношением:

где C — теплоемкость; m — эффективная масса воды в водоеме, которая может быть вычислена из теплового баланса, и оказывается близкой к реальной.

Допустим, что за время Δt_1 водоем потерял количество тепла Q_1 . Δt_1 и его температура изменилась на Δt_1 , а в течение другого промежутка времени Δt_2 изменение температуры составило Δt_2 , а потеря тепла $Q_2 \cdot \Delta t_2$. При этом средние температуры воды в озере на этих интервалах были соответственно t_1 и t_2 . Тогда уравнения теплового баланса для интервалов времени Δt_1 и Δt_2 , запишутся:

$$q \Delta t_1 = Q_1 \Delta t_1 + Cm \Delta t_1 + CR_1 t_1 \Delta t_1,$$

$$q \Delta t_2 = Q_2 \Delta t_2 + Cm \Delta t_2 + CR_2 t_2 \Delta t_2.$$

Температуры t_1 и t_2 отсчитываются от средней температуры грунтовых вод в данном районе. Изменением величины расхода стока R обычно можно пренебречь, тогда $R_1 = R_2 = R$.

После несложных преобразований из уравнений получаем выражения для теплового потока q ккал/с и эффективной массы водоема m

$$q = \frac{(Q_2 + RCt_2) \Delta t_1 - (Q_1 + RCt_1) \Delta t_2}{\Delta t_1 - \Delta t_2},$$

$$m = \frac{Q_2 - Q_1 + RC(t_2 - t_1)}{C(\Delta t_1 - \Delta t_2)},$$

где Δt_1 и Δt_2 — средние скорости изменения температуры воды на интервалах времени Δt_1 и Δt_2 .

Теплоотдача с поверхности воды измерялась, как было описано выше. Чтобы учесть неравномерную экранировку поверхности воды собственными испарениями, использовалась

пропорциональность теплоотдачи температурному напору вблизи поверхности воды. Такая пропорциональность хорошо сохраняется, если напор измерять как разность температур между поверхностью воды и воздухом в точке, удаленной от поверхности воды на расстояние около 1 см. Таким образом, достаточно измерить температурный напор и усреднить пропорционально температурному напору. Обычно для большей надежности теплоотдача измерялась в нескольких точках озера.

Температурный напор измерялся дифференциальной термопарой медь константан, установленной на пенопластовом поплавке.

Для расхода стока R бралось среднее значение из нескольких измерений. Температура измерялась в начале и конце интервала времен Δt в нескольких точках водоема на глубине 15 см с тем, чтобы исключить краевой эффект вблизи поверхности воды. Результаты усреднялись.

При измерениях использовались ртутные термометры с ценой деления $0,1^\circ \text{C}$, а также медные термометры с сопротивлением и термопарой медь—константан с приборами, обеспечивавшими точность измерений $0,1^\circ \text{C}$.

Величина t находилась графическим усреднением кривой непрерывной записи температуры на фоторегистрирующем устройстве. Так как измерения проводились в ночное время, влияние инсоляции исключалось (табл. 17).

$$\Delta t = \frac{q}{mC} - \frac{Q}{mC},$$

где Q — полная теплоотдача (включая сток).

Таблица 17

Характеристика контрольных водоёмов

Водоем	Площадь поверхности, м ²	Глубина, м	T, °C	Расход стока, кг/сек
I	1400	20	40	6,500
II	50	4	30	0,075
III	4550	12	12	—

Линейная зависимость Δt от Q позволяет легко находить величины q и m графически.

Откладывая Δt против соответствующих значений Q в координатах $\Delta t - Q$, получим прямую, угловой коэффициент которой равен $-1/mC$. Отрезок, отсекаемый прямой на оси абсцисс, дает величину q , так как $\Delta t = 0$ при условии равенства тепловых потерь количеству тепла, поступающему в водоем. Графики $\Delta t - Q$ (рис. 33) для двух контрольных водоёмов построены по данным табл. 18 и 19, обработанным по методу наименьших квадратов. Разброс полученных значений q носит статистический характер. Отклонение от среднего не выходит за пределы, обусловленные погрешностями в измерении Q , t и Δt , и, очевидно, объясняются именно этими погрешностями.

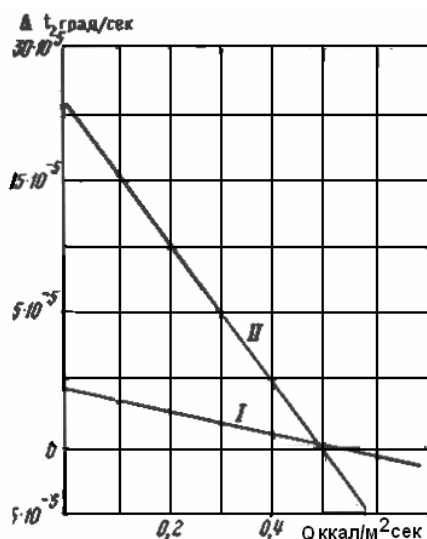


Рис. 33. График зависимости $\Delta t - Q$ для двух (I и II) контрольных водоёмов

Таблица 18

Исходные данные для вычисления q и m трёх контрольных водоёмов

Водоём	Номер режима	Т, °С	$t \cdot 10^4$, град/сек	Q, ккал/м ² ·сек				R, кг/сек
				1	2	3	4	
I	1	37,60	0,692	0,177	0,064	0,049	0,290	6,5
	2	36,85	0,530	0,174	0,064	0,049	0,287	
	3	38,25	0,185	0,194	0,070	0,050	0,314	
	4	38,20	-2,08	0,324	0,119	0,055	0,493	
	5	37,65	0,160	0,219	0,081	0,049	0,349	
	6	37,20	-0,657	0,307	0,115	0,049	0,471	
II	1	32,2	3,45	0,187	0,082	0,040	0,309	0,075
	2	31,6	2,02	0,241	0,109	0,040	0,390	
	3	30,6	-3,24	0,259	0,122	0,039	0,420	
	4	28,9	4,66	0,199	0,100	0,038	0,337	
	5	31,15	7,47	0,130	0,060	0,039	0,229	
	6	33,6	6,42	0,156	0,067	0,041	0,264	
	7	36,15	4,9	0,187	0,073	0,043	0,303	
	8	36,4	-1,67	0,291	0,113	0,044	0,448	
III	1	11,2	0,00	0,0138	0,0121	0,0117	0,0376	0,0
	2	11,88	-1,07	0,0262	0,0226	0,0125	0,0613	
	3	12,03	-0,33	0,0169	0,0143	0,0128	0,0440	

Таблица 19

Результаты вычислений q и m для контрольных водоёмов

Водоём	Номер режима	q, ккал/м ² сек	m, кг	q, ккал/м ² сек	m, кг
I	2-3	0,500	$0,97 \cdot 10^7$	0,521	$1,46 \cdot 10^7$
	4-5	0,532	$0,92 \cdot 10^7$		
	5-6	0,546	$2,07 \cdot 10^7$		
	1-6	0,547	$1,66 \cdot 10^7$		
II	1-2	0,542	$2,66 \cdot 10^5$	0,493	$1,33 \cdot 10^5$
	2-3	0,448	$0,27 \cdot 10^5$		
	3-4	0,431	$0,52 \cdot 10^5$		
	4-5	0,540	$1,68 \cdot 10^5$		
	5-6	0,543	$1,79 \cdot 10^5$		
	6-7	0,487	$1,34 \cdot 10^5$		
	7-8	0,460	$1,04 \cdot 10^5$		
III	1	0,0376	—	0,0369	$1,04 \cdot 10^7$
	2-3	0,0362	—	0,0369	$1,04 \cdot 10^7$

Величина эффективной массы значительно более чувствительна к погрешностям измерений, чем d . Так, для водоёма II (см. табл. 19) максимальные отклонения величины q от среднего равны +10% и -12%, а максимальные отклонения m равны +100% и - 80%. Это позволяет использовать найденную величину эффективной массы в качестве критерия оценки относительной величины ошибки результата.

Возможность вычисления из данных по тепловому режиму водоёма его эффективной массы позволяет в ряде случаев сократить до минимума время, необходимое для нахождения d . Вычисленная эффективная масса близка к реальной. Поэтому, сделав обмер водоёма и нанося на график величину $@$, соответствующую всего лишь одному интервалу Δt , можно получить оценочную величину q . В многочисленных мелких водоёмах тепловое равновесие устанавливается достаточно быстро и поэтому теплоотдача с поверхности может считаться равной питающему тепловому потоку. Средние характеристики мелких водоёмов, определенные для стандартного участка термоаномалии размером 40x40 м², приведены в табл. 20.

Из нее виден вклад водных поверхностей в теплоотдачу. Свыше 80% всего тепла отдается через поверхность многочисленных мелких, очень горячих водоёмов и озер. Вынос тепла стоком относительно невелик и составляет около 10 %. Суммарная потеря массы воды через сток и испарение составляет 170 кг/сек.

При измерениях не мог быть учтен вынос тепла скрытым стоком, который в вулканических областях, сложенных сильно трещиноватыми и рыхлыми породами, может приближаться по порядку величины к поверхностному. Поэтому величину 64 000 ккал/сек следует считать нижним пределом тепловой мощности.

Узон является одной из крупнейших гидротермальных систем на Камчатке, вместе с Долиной Гейзеров самой крупной на Камчатке и одной из самых мощных в мире. Величина полной тепловой мощности Узона, а также сравнение в с мощностью фумарольной разгрузки активных вулканов, расположенных этом районе (Малый Семячик 70000 ккал/сек, Жупановский 70000 ккал/сек), подтверждают высказывавшуюся В. В. Аверьевым (1966 г.) и развитую затем Н. Ковалевым (1969) мысль о едином механизме энергетического питания молодых гидротермальных систем и вулканов.

Результаты измерений тепловой мощности Узонских гидротерм приведены в табл. 21.

Таблица 20

Температура поверхности воды, °C	% от площади участка	Теплоотдача единицы водной поверхности, ккал/м ² .сек	Теплоотдача, относимая к единице поверх- ности контуроль- ного участка ккал/м ² .сек
90	0,26	14	0,0364
80—89	1,01	11,5	0,1160
70—79	0,34	3,4	0,0116
60—69	0,32	1,7	0,0054
50—59	0,10	0,8	0,0008
40—49	0,05	0,4	0,0002
Всего	2,1	—	0,17

Таблица 21

Тепловая мощность термальных полей Узона (июль-сентябрь 1967г)

Термальное поле	Измеренная теплоотдача, ккал/сек						Суммарный вынос тепла, ккал/сек
	Площадь, тыс. м ²	с поверхности крупных водое- мов	с поверхности мелких водое- мов	паровыми стру- ями	с поверхности прогретого грунта	отопом	
Восточное поле	187	5000	30700	—	3400	1900	41000±4000
Озерное поле	150	15200	800	—	200	3300	19500±2000
Термальные площадки, расположенные севернее и южнее Восточного поля	58	1500	500	—	—	500	2500±300
Западное поле	35	—	400	700	200	—	1000±200
Всего		21700	32100	700	3800	5700	64000±7000
		34 *	50 *	1 *	6 *	9 *	100 *