



*Институт водных проблем Севера,  
Карельский научный центр РАН*

## **Теплообмен на границе вода-лед в малом бореальном озере**

*Н. И. Пальшин, Г. Э. Здоровеннова, Т. В. Ефремова,  
С. Р. Богданов, Р. Э. Здоровеннов, С. И. Смирнов,  
А. Ю. Тержевик*

*Исследования выполнены в рамках госзадания ИВПС*



Объект: Озеро Вендюрское

Географическая широта: 62.5° с.ш.

Площадь зеркала: 10.4 км<sup>2</sup>

Длина: 6.5 км

Ширина: 1.5-2,0 км

Средняя глубина: 5.3 м

Максимальная глубина: 13.4 м

Период условного водообмена: около 3-х лет

Глубина диска Секки: 3-4 м

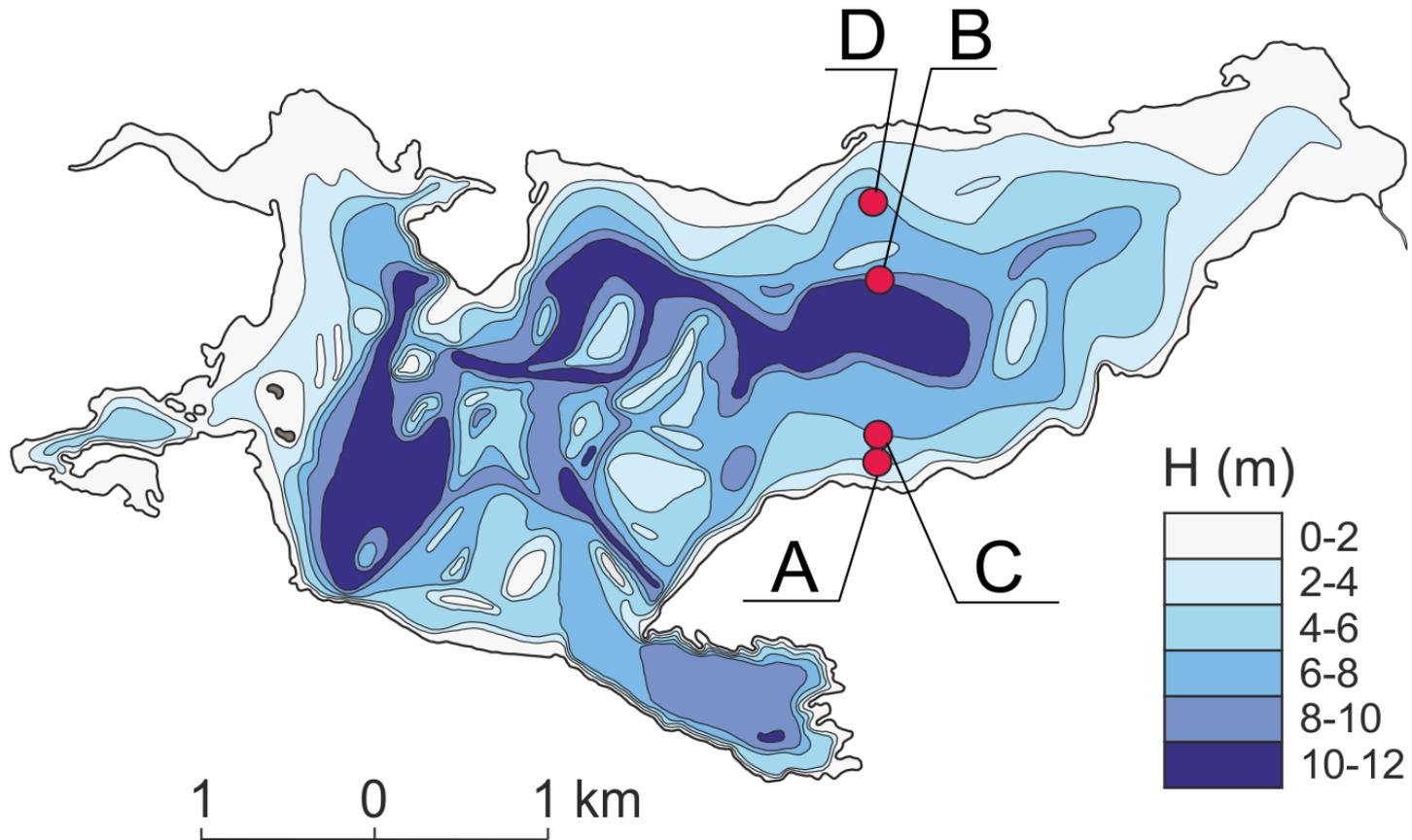
Продолжительность ледового покрова – около 6-и месяцев

Толщина льда в марте-апреле – от 0.35 до 0.62 м.

Поток тепла из донных отложений в воду в начале периода ледостава на мелководных станциях достигает 5-6, на глубоководных 2-3 Вт·м<sup>-2</sup>, к марту – апрелю снижается до 1-2 Вт·м<sup>-2</sup>.

Поток тепла из воды в лед меняется мало как по акватории озера, так и на протяжении существования ледового покрова, составляя 0.5-0.7 Вт·м<sup>-2</sup>.

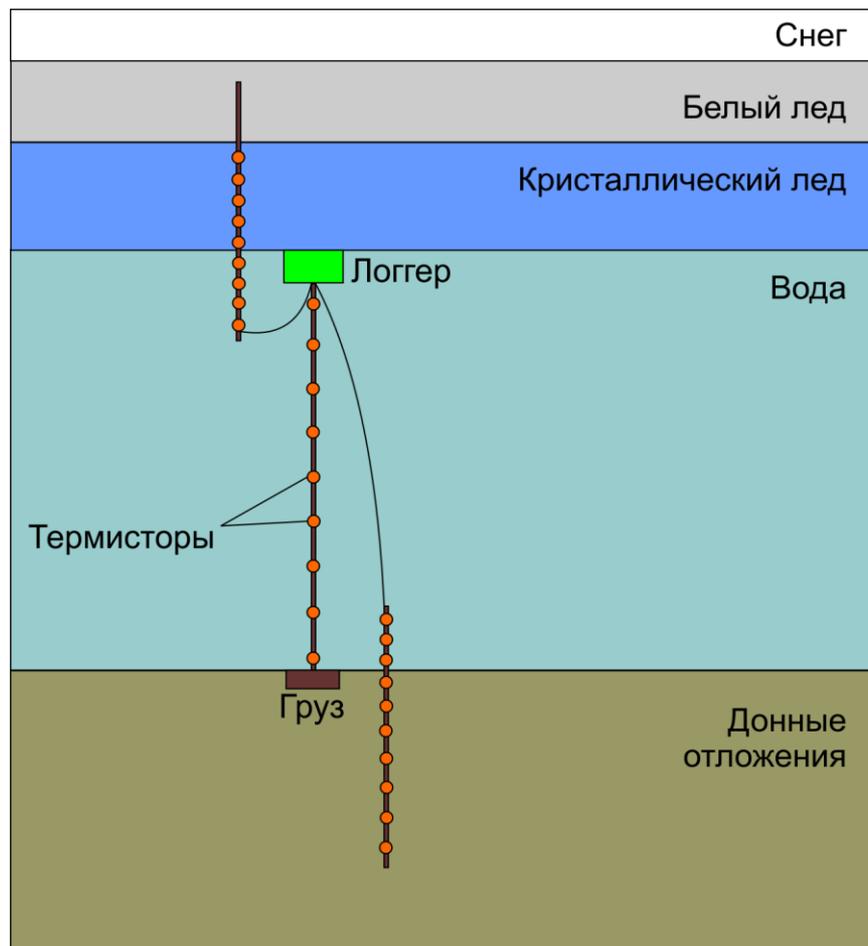
Автономные измерения в оз. Вендюрском на протяжении шести зимних и весенних сезонов с декабря 1995 по апрель 2003 гг. тройной косой на станциях



Места установки прибора на оз. Вендюрском, номера станций, периоды, продолжительность и дискретность измерений, вид аппроксимации

Период ледостава	Период измерений	Станция	H, м	$\Delta t$ , час	Аппроксимация	R <sup>2</sup>
07.11.1995– 14.05.1996	01.12.1995– 23.05.1996	A	4.38	2	ln	0.970– 1.000
12.12.1996– 14.05.1997	21.12.1996– 27.04.1997	B	9.30	2	Сплайн (5)	0.997– 1.000
10.11.1998– 01.05.1999	05.12.1998 –24.04.1999	C	5.22	4	Сплайн (2), (4–6)	0.998– 1.000
15.11.1999– 01.05.2000	26.12.1999 –24.04.2000	B	9.50	6	Сплайн (4–5)	0.995– 0.999
	10.02.2002 –24.04.2002	C	5.44	2	ln, Сплайн (4–5)	0.998– 1.000
	23.12.2002 –31.03.2003	D	7.80	1	ln	0.998– 1.000

Измерения температуры воды и льда проводились автономным прибором, разработанным в лаборатории гидрофизики института водных проблем Севера КарНЦ РАН А.М. Глинским.



Прибор состоял из логгера и трех отдельных кос с датчиками температуры по 9 термисторов на каждой косе.

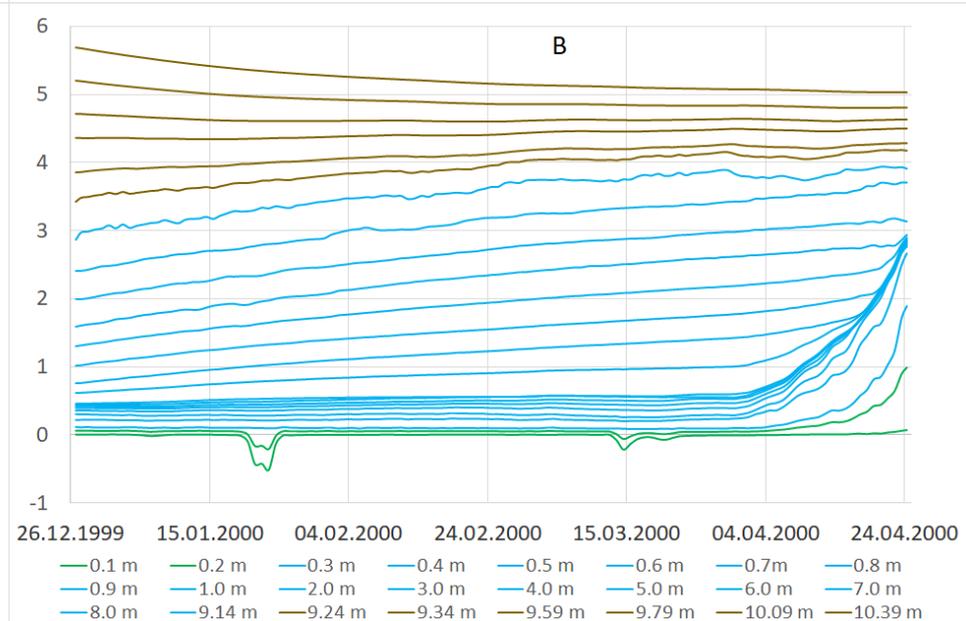
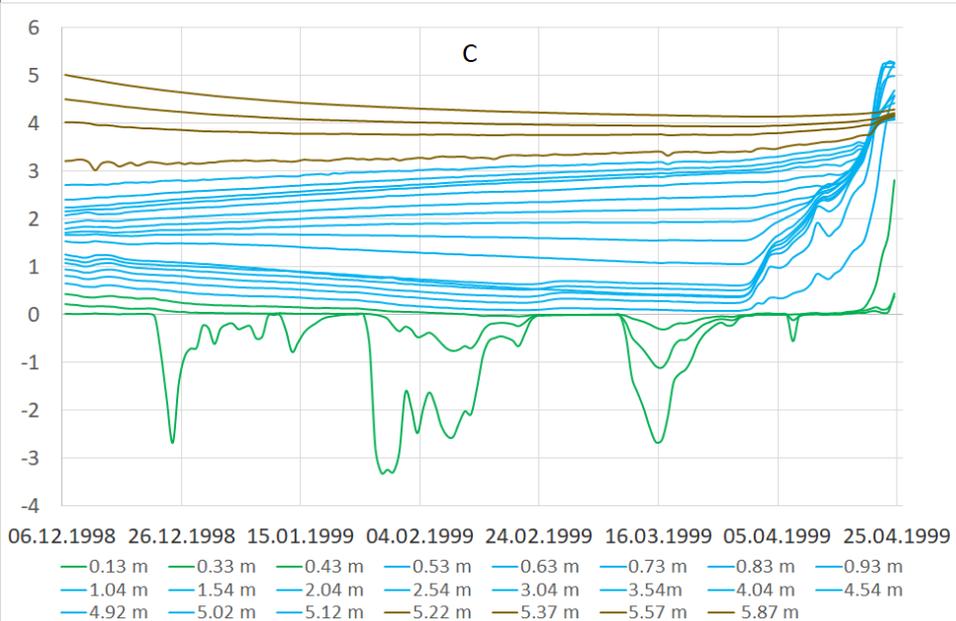
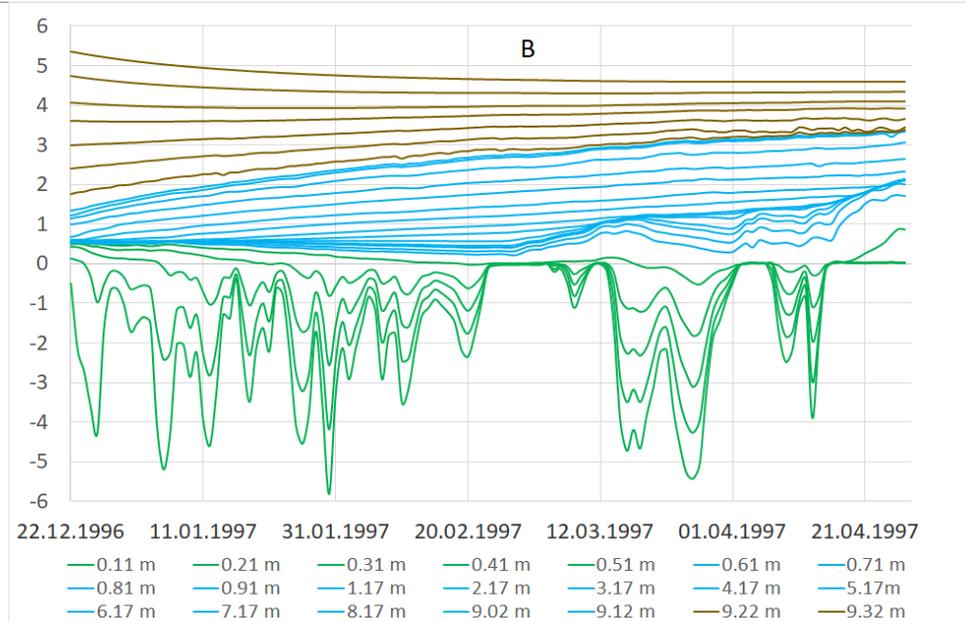
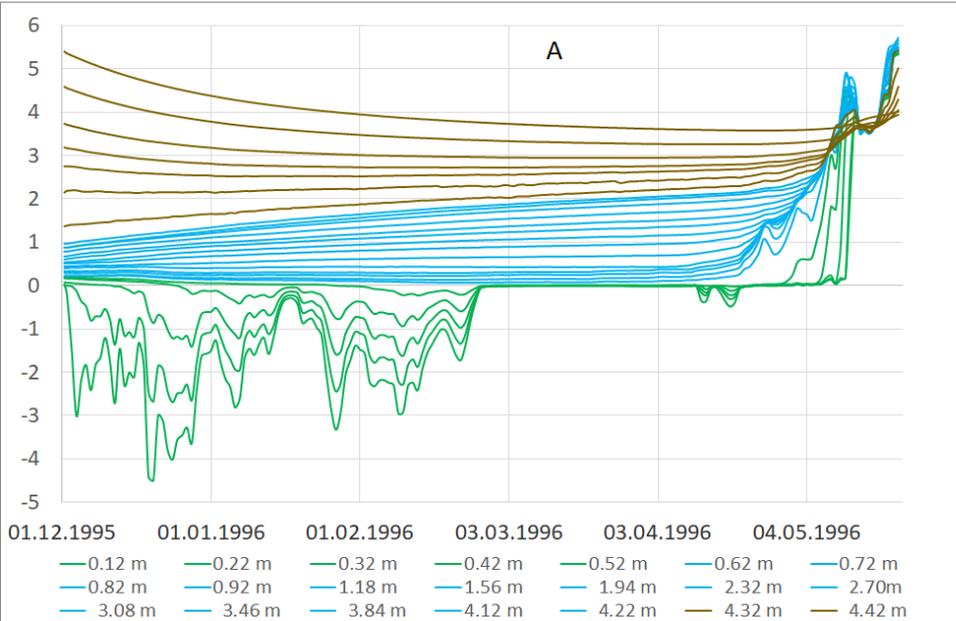
Первая коса термисторы вмонтированы в кабель через 10 см для измерения температуры льда и подледного слоя воды.

Вторая коса регистрировала температуру в водной толще.

Третья коса вставлялась в углепластиковую трубку для забивания в ил и измерения температуры в придонном слое воды и верхнем слое донных отложений до глубины 1-1.5 м с разрешением по вертикали 0.1 – 0.3 м.

Разрешение температурных датчиков всех кос составляло  $0.003^{\circ}\text{C}$ , точность измерения зависела от калибровки.

# Температура в ледовом покрове (зеленые линии), водной толще (синие линии) и донных отложениях (коричневые линии) в зимние и весенние сезоны разных лет



В соответствии с теоретическими представлениями о протекающих в замерзающих озерах термогидродинамических процессах, в вертикальной термической структуре озер выделяют несколько слоев, толщина которых и вертикальный перенос тепла определяются разными механизмами:

- термоактивный слой донных отложений, в котором обмен теплом с водой определяется молекулярным диффузионным переносом;
- придонный турбулентный слой, где на склоновых станциях происходит перенос наиболее плотной воды по уклону дна, а в углублениях дна наблюдаются аккумуляция тепла, солей и отсутствие растворенного кислорода;
- основная водная толща, в которой интенсивность термогидродинамических процессов (сейши, короткие внутренние волны, высокочастотные ветровые колебания ледового покрова, оказывающие влияние на флуктуации скоростей течения и турбулентность) определяют вертикальный теплообмен, а также адвективный перенос тепла при образовании зимой геострофической циркуляции;
- переходный или “буферный” слой воды вблизи границы с ледовым покровом;
- вязкий ламинарный слой на границе вода–лед.

В зимние сезоны 1995-1996, 2001-2002, и 2002-2003 гг. вертикальные профили температуры в слое воды 1.0-1.5 м подо льдом хорошо описывались логарифмической зависимостью с коэффициентами детерминации  $R^2 \geq 0.98$

$$T_z = a \ln z + T_1,$$

где  $z$  – глубина от верхней поверхности кристаллического льда (м);  $T_1$  – температура воды на глубине 1 м ( $^{\circ}\text{C}$ );  $a$  – эмпирический параметр ( $^{\circ}\text{C}$ ).

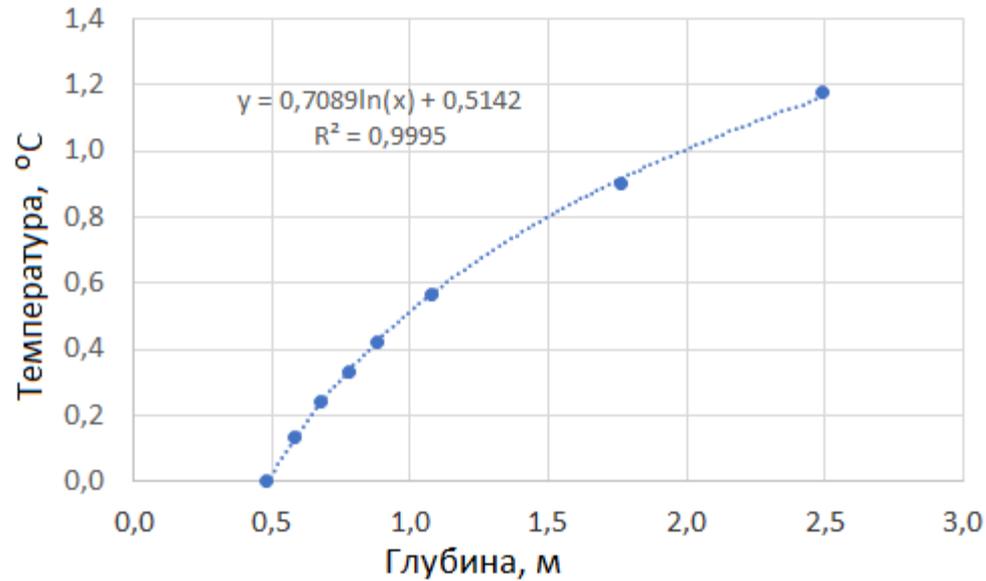
Толщина кристаллического льда ( $H_i$ , м) в эти зимние сезоны рассчитывалась по формуле

$$H_i = e^{-\frac{T_1}{a}}$$

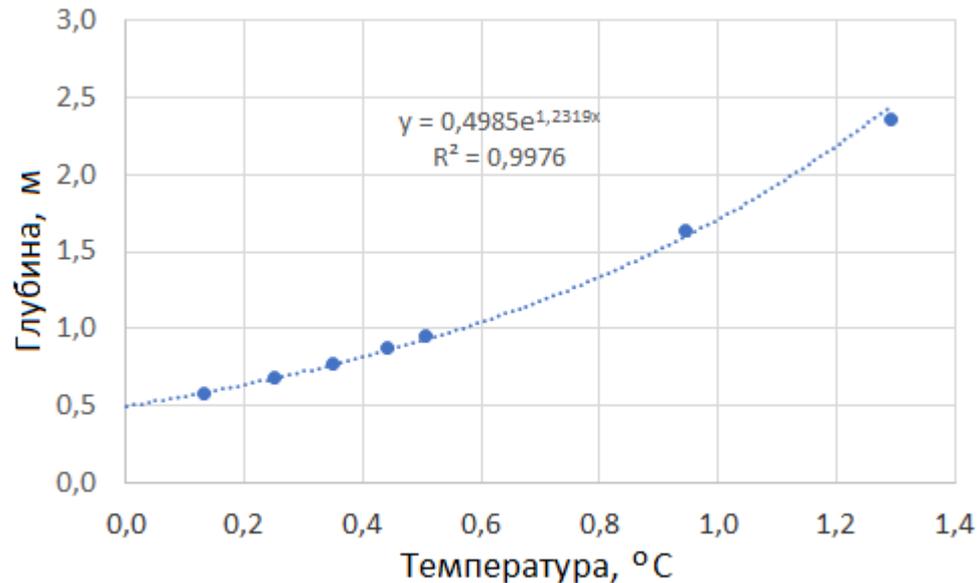
Для аппроксимации температуры воды подо льдом на станции С в зимний сезон 1998-1999 гг. лучше подходила квадратическая зависимость.

Для глубоководной станции В, расположенной в центральном районе озера, где, предположительно, происходил подъем воды в результате дивергенции течения, аппроксимация данных температуры воды на горизонтах в зимние сезоны 1996-1997 и 1999-2000 гг. осуществлялась с помощью полиномов четвертой и пятой степени.

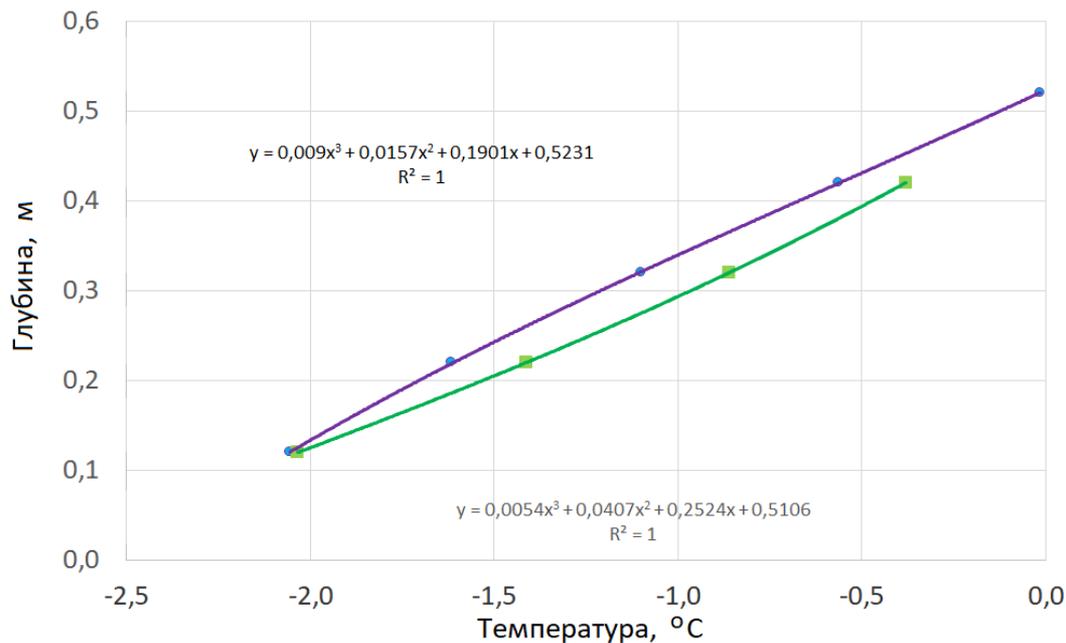
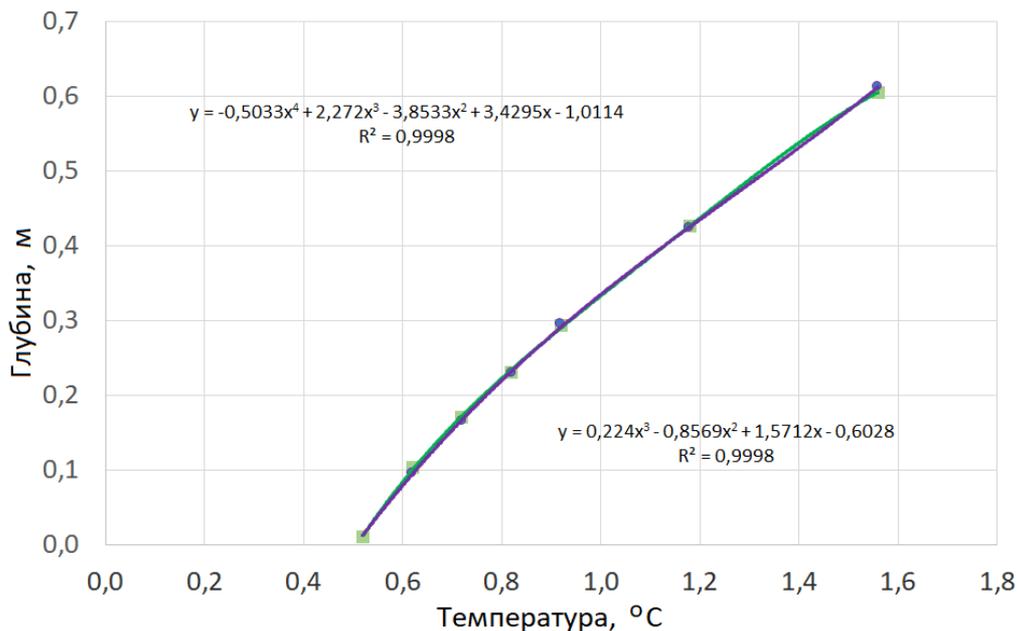
## Аппроксимация данных температуры воды в подледном слое оз. Вендюрского (15.02.2002)



## Зависимость глубины от температуры воды в подледном слое оз. Вендюрского (15.03.2002)

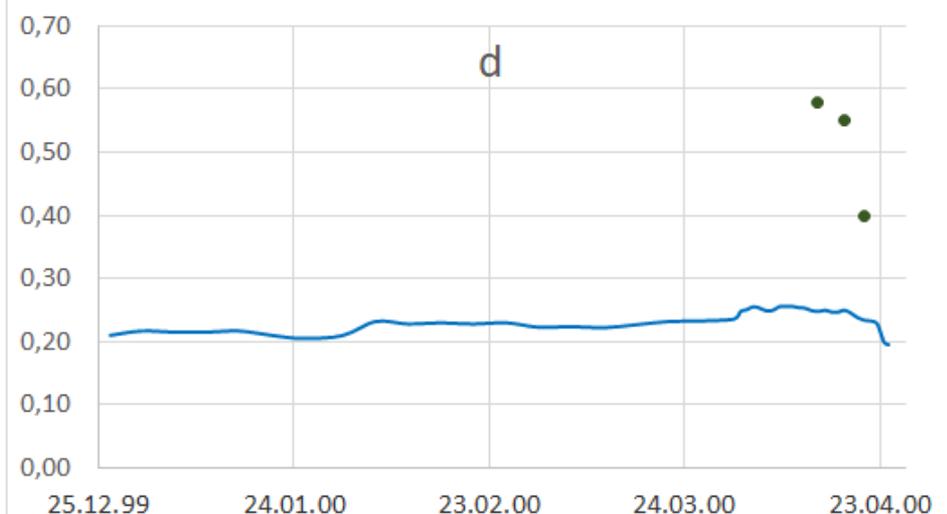
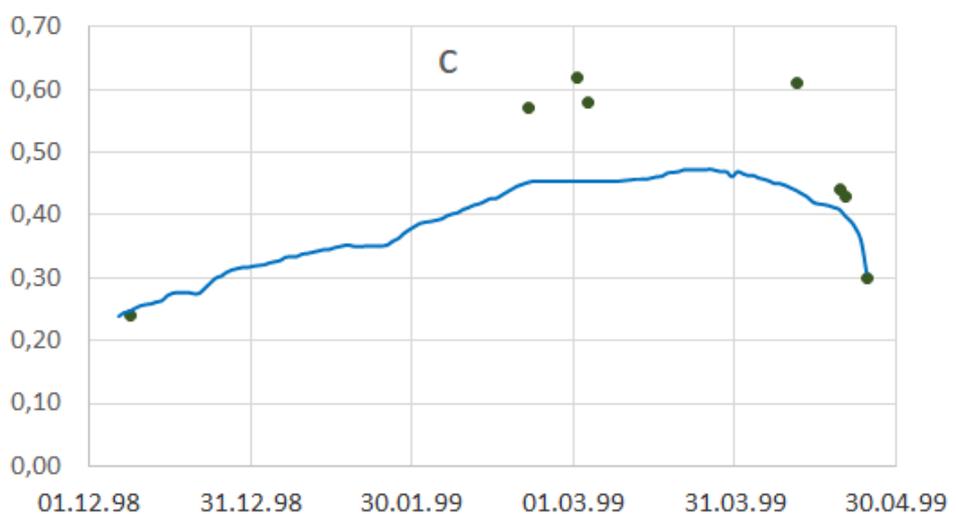
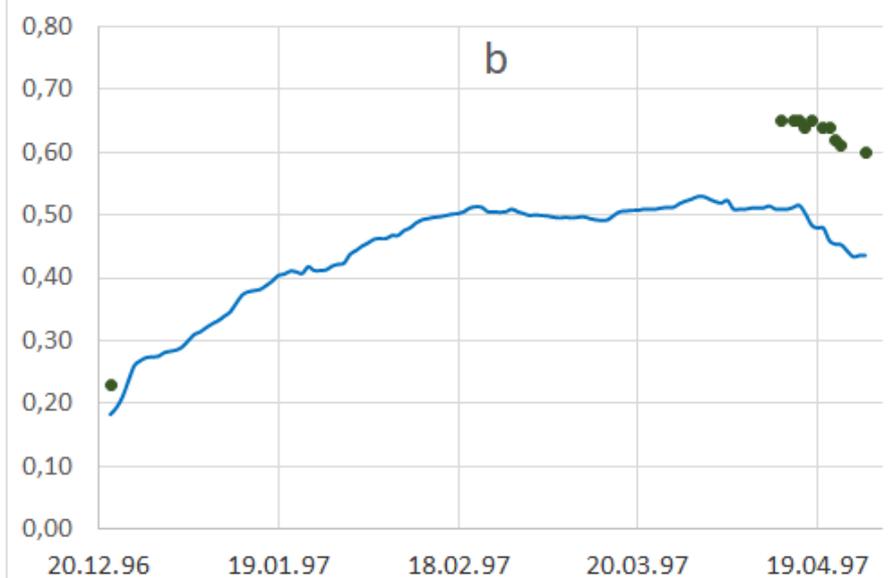
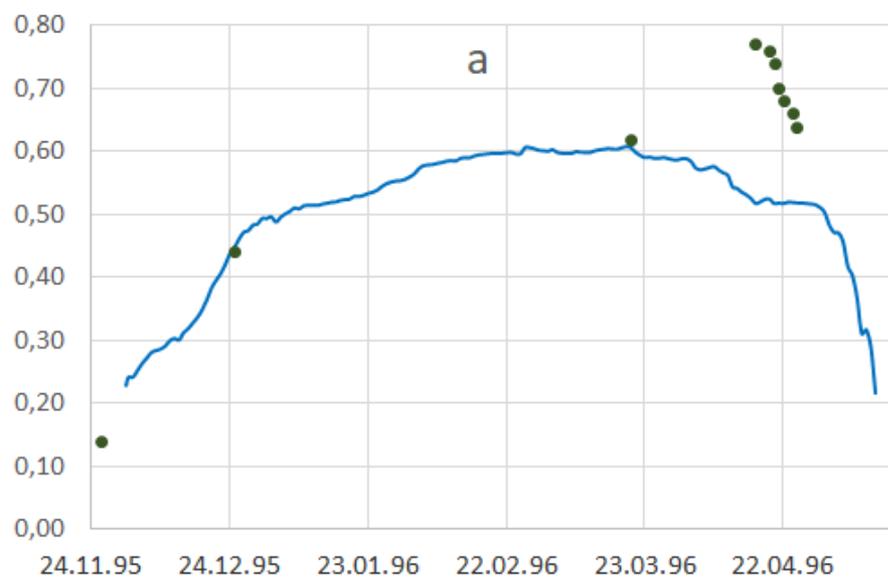


Аппроксимация температуры воды в подледном слое оз. Вендюрского: зеленые и фиолетовые точки – измеренные данные 25 и 29 января 1996 г., соответственно, линии – аппроксимация данных полиномами третьей и четвертой степени. 25 января ближний датчик располагался в 9 мм от границы льда, а 29 января из-за увеличения толщины льда ближний датчик находился почти в 9 см ото льда.



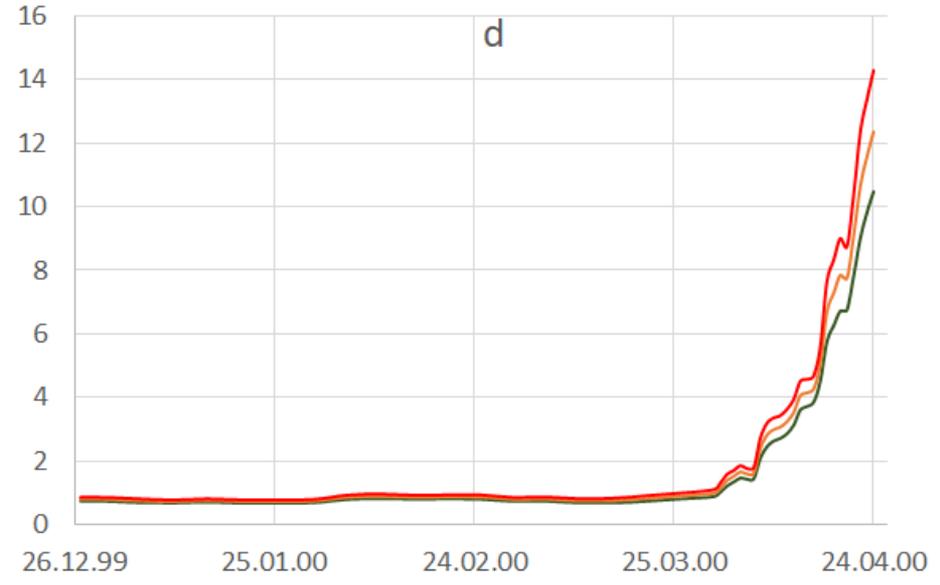
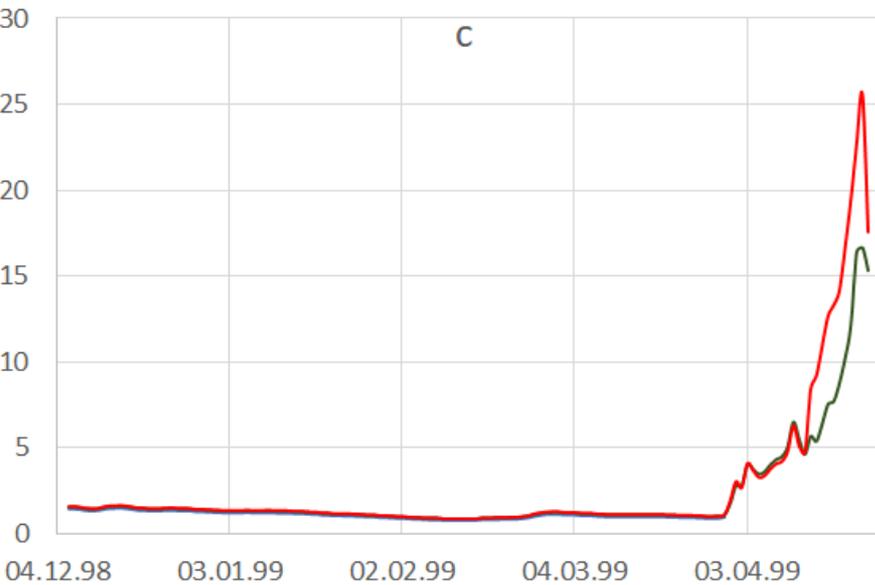
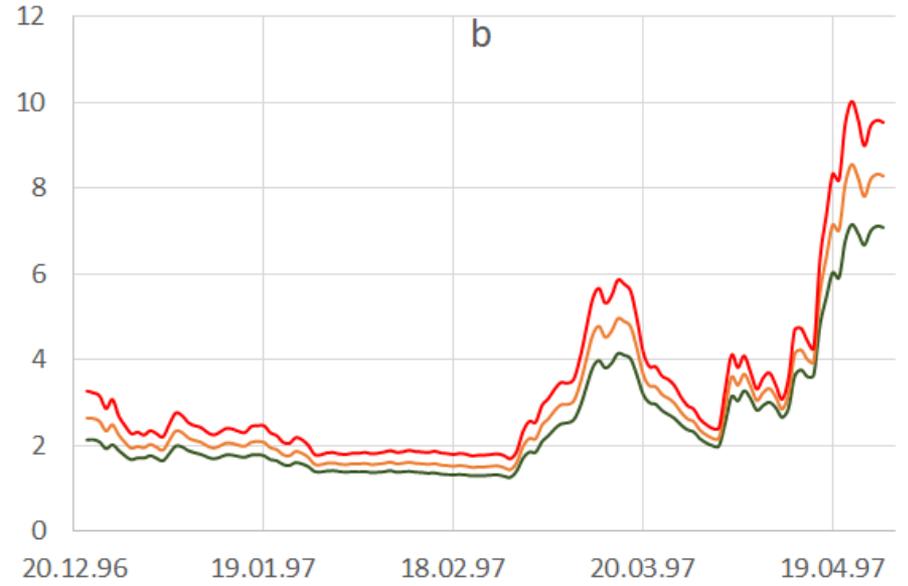
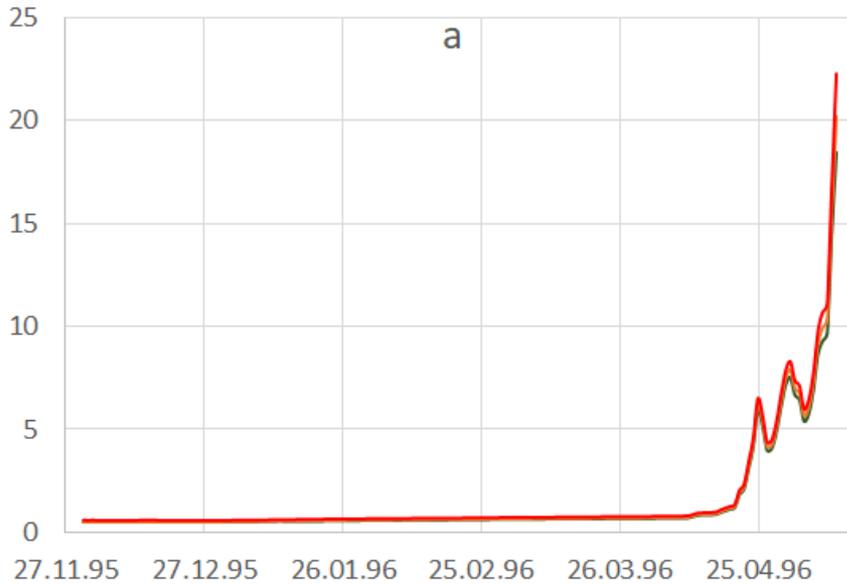
Аппроксимация температуры в ледовом покрове для определения толщины льда 25 (зеленые точки и линия аппроксимации) и 29 (фиолетовые точки и их аппроксимация) января 1996 г. при условиях попадания в лед датчика установленного на горизонте 52 см.

Измеренная общая толщина льда (1) и рассчитанная толщина кристаллического льда (2) в разные зимние и весенние сезоны: а – мелководная станция в 120 м от южного берега, b – глубоководная станция центрального района озера в 1070-1080 м от северного берега, с – станция в 190-200 м от южного берега



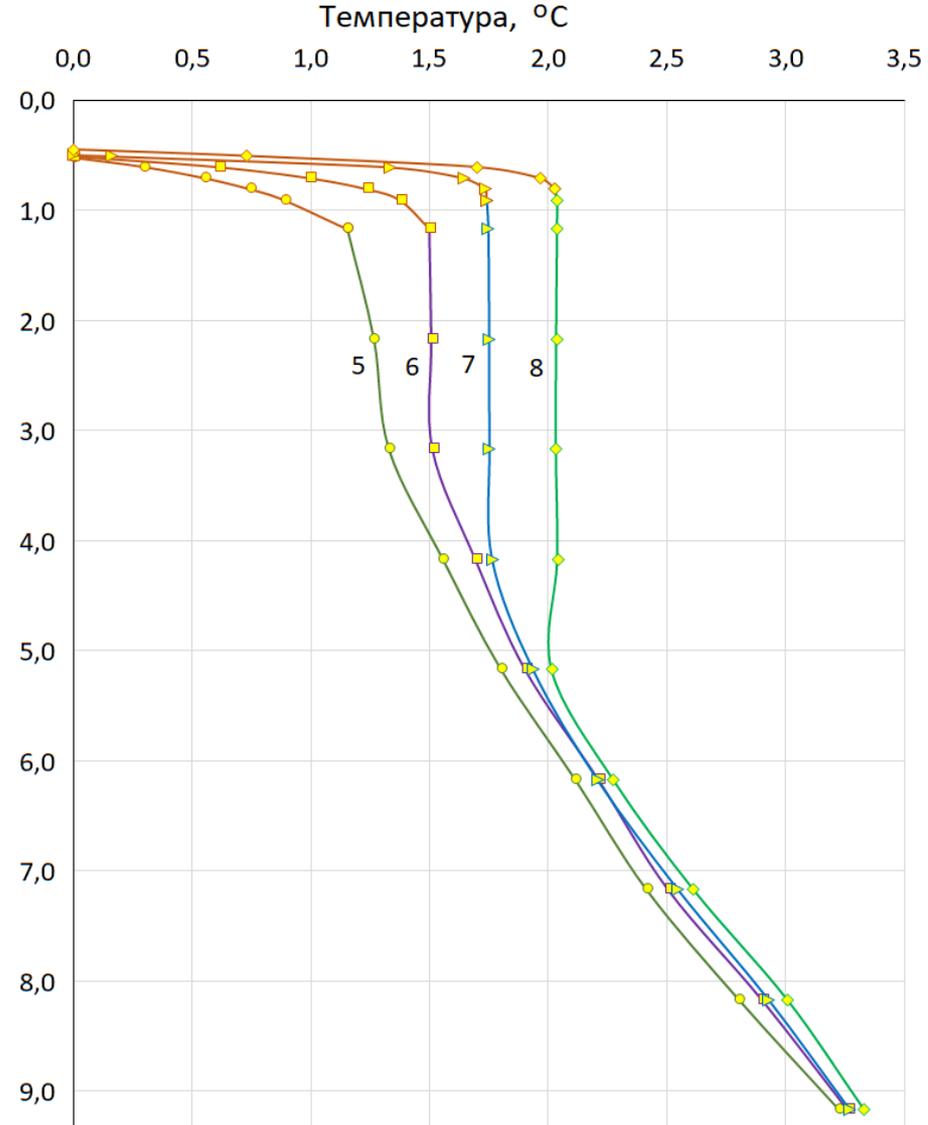
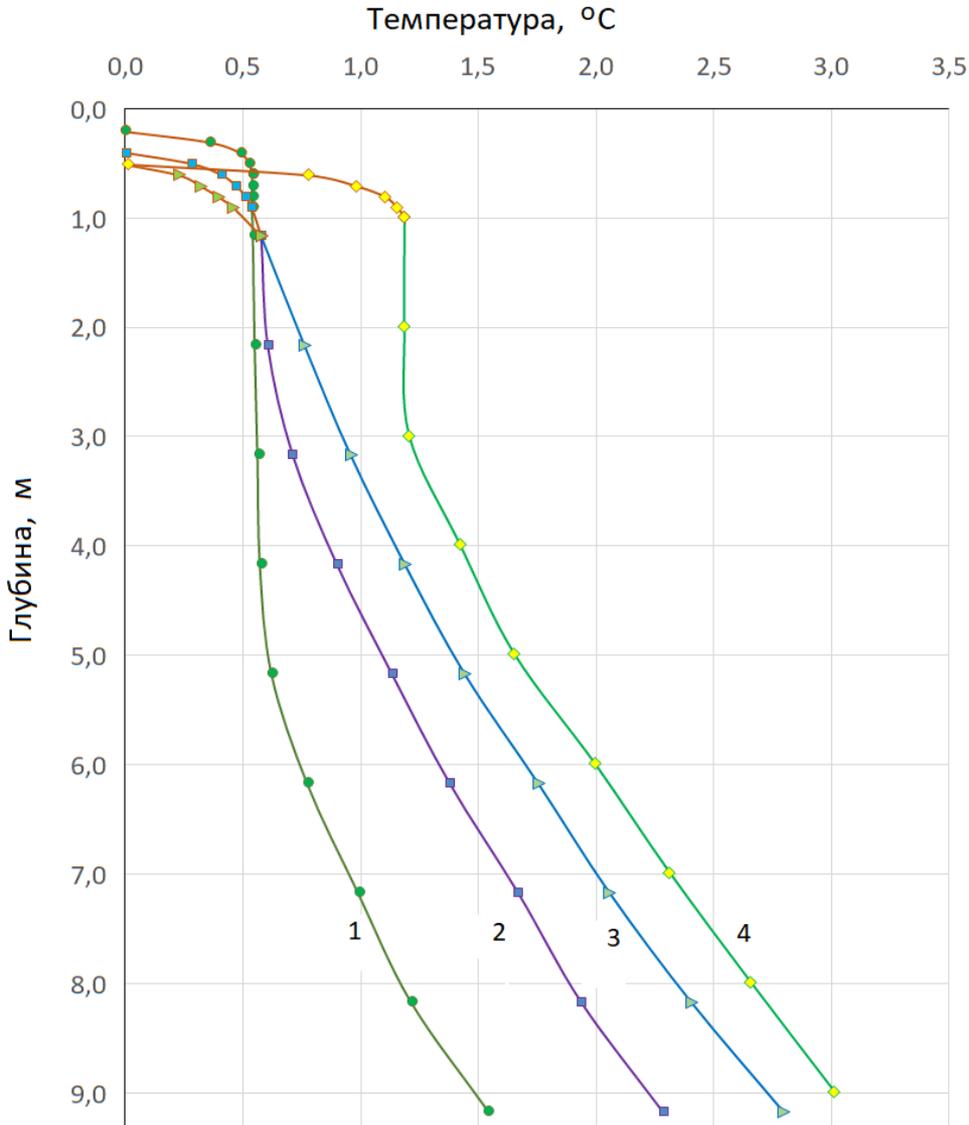
● - 1 — - 2

Потоки тепла из воды в лед в разные зимние сезоны по рассчитанным линейным градиентам температуры в слоях воды разной толщины: 0–5 мм (1), 0–5 см (2), 0–10 см (3): а – станция в 120 м от южного берега, b – глубоководная станция центрального района озера в 1070-1080 м от северного берега, с – станция в 190-200 м от южного берега



— 1 — 2 — 3

Изменение вертикальной термической структуры в глубоководной части озера (станция В) в разные моменты зимнего (а) и весеннего (б) периодов в 1996-1997 гг.: 1 – 24.12.1996, 2 – 22.01.1997, 3 – 22.02.1997, 4 – 17.03.1997, 5 – 01.04.1997, 6 – 15.04.1997, 7 – 20.04. 1997, 8 – 25.04.1997





## Заключение

- В результате анализа многолетних экспериментальных данных, полученных с помощью специально разработанного прибора, показана динамика изменения толщины кристаллического льда для зимних и весенних сезонов в годы с существенно различающимися метеорологическими условиями.
- С помощью разработанного метода описано формирование термической структуры в буферном слое воды между основной водной толщей и ледовым покровом для малого слабопроточного водоема.
- Для оз. Вендюрского получены новые оценки плотности потоков тепла из воды в лед для зимнего и весеннего сезонов. В зимний сезон потоки тепла изменялись от 0.55 до 3.5 Вт/м<sup>2</sup>, а в весенний период при увеличении температуры воды в КПС до 4 °С потоки возрастали до 20–25 Вт/м<sup>2</sup>.
- Установлена причина возникновения пространственной неоднородности по акватории озера потоков тепла из воды в лед и разной направленности их временных трендов. Показано влияние геострофической циркуляции и дивергенции течения на потоки тепла в малом озере.
- На примере оз. Вендюрского получены оценки толщины слоя воды подо льдом, для которого выполняются условия близкие к ламинарному вертикальному переносу тепла. С погрешностью до 1–2% можно оценивать потоки тепла из воды в лед, используя при этом линейные градиенты в слое воды 1–2 см.
- Зимой толщина буферного слоя воды подо льдом, в котором происходит увеличение градиентов температуры в 3–4 раза по сравнению с основной толщей воды, по акватории озера составляет около 1 м. Исключение составляет локальная зона в центре озера, где в результате дивергенции течения толщина буферного слоя уменьшается до 0.4–0.5 м.
- В период весеннего конвективного перемешивания толщина буферного слоя уменьшается до 0.2–0.3 м, при этом в дневные часы может происходить обострение градиентов температуры в 1.5–2 раза.

**Спасибо за внимание!**

