

УДК 556.555.4

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ  
ОЗЕР РОТКОВЕЦКОЙ ГРУППЫ****Климов С.И., Широкова Л.С., Забелина С.А., Воробьева Т.Я.,  
Морева О.Ю.***Институт экологических проблем Севера УрО РАН, Архангельск*

Подробная информация об авторах размещена на сайте

«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

**Представлены результаты изучения термического режима 4-х малых озер Архангельской области. Показаны различия в формировании вертикальной термической структуры и теплозапаса донных отложений в зависимости от их морфометрических и гидрографических характеристик. Дана сравнительная характеристика количества тепла, отданного донными отложениями на нагревание вод озер в зимний период. Компактно расположенные озера, с доминированием характерных для каждого факторов, определяющих их термический режим, представляют интерес для реализации программ комплексного экологического мониторинга.**

Малые озера Архангельской области до настоящего времени остаются слабо изученными, несмотря на их большую численность, исторически сложившимся тяготением к ним населенных пунктов и использованием в хозяйственных целях, как самих водных объектов, так и их водосборов. В рамках комплексных исследований малых озер на базе геобиосферного стационара РАН «Ротковец» в 2006 г. проводилось изучение термической структуры озер. Распределение химических веществ и биопродуктивность водоемов в значительной степени зависит от температуры воды и термической стратификации вод. Термическое состояние малых озер обусловлено процессами теплообмена их водной массы с атмосферой и донными отложениями, и для озер одной климатической зоны определяется в основном их морфометрическими характеристиками и водообменом, роль которых в формировании термической структуры исследуемых озер рассмотрена в данной работе.

Для описания озер применялись показатели по С.В. Григорьеву [2,3]. Глубины озер получены по данным эхолотной съемки. Площади водосбора озер оценивались по километровой карте, сток с водосбора – по среднегодовому расходу и

площади водосбора р. Онеги [1]. Исследования вертикального распределения температуры воды проведены в 2006 г. опроекдывающимися термометрами.

Озера Ротковецкой группы расположены в юго-западной части Архангельской области (рис. 1) в бассейне реки Онеги (широта 60°50' - 60°53'N, долгота 39°30' - 39°35'E) в среднетаежной географической зоне и относятся к группе малых озер. Наиболее крупным, глубоким и сложным в морфометрическом отношении является озеро Святое (табл. 1). В других озерах отмечается относительно однородное увеличение глубин к центральной части котловин. Квартильные оценки глубины показывают сходное распределение преобладающих глубин, соответственно, в относительно глубоких Святом и Узловском и мелких Белом и Назаровском озерах.

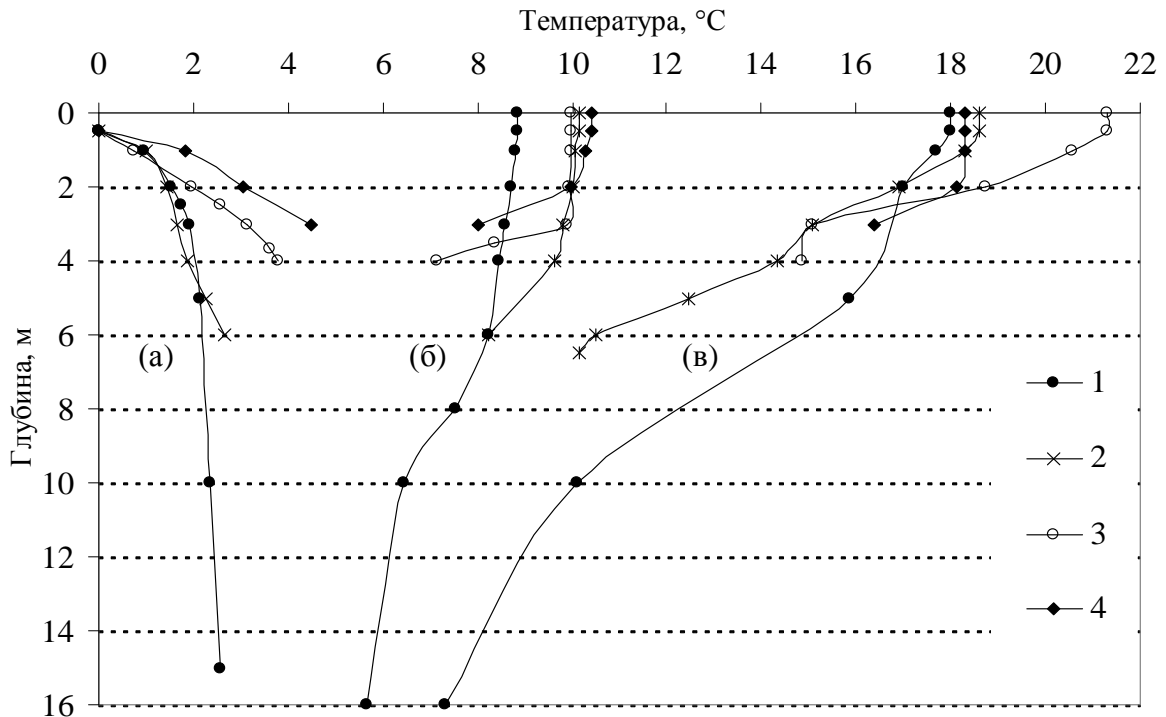
По показателю удельного водосбора оз. Святое относится к группе озер со средним удельным (10-100), остальные озера – к группе с большим удельным водосбором. По показателю условного водообмена оз. Святое относится к озерам со средним водообменом (0,5-5,0), другие озера – сильноводообменные.



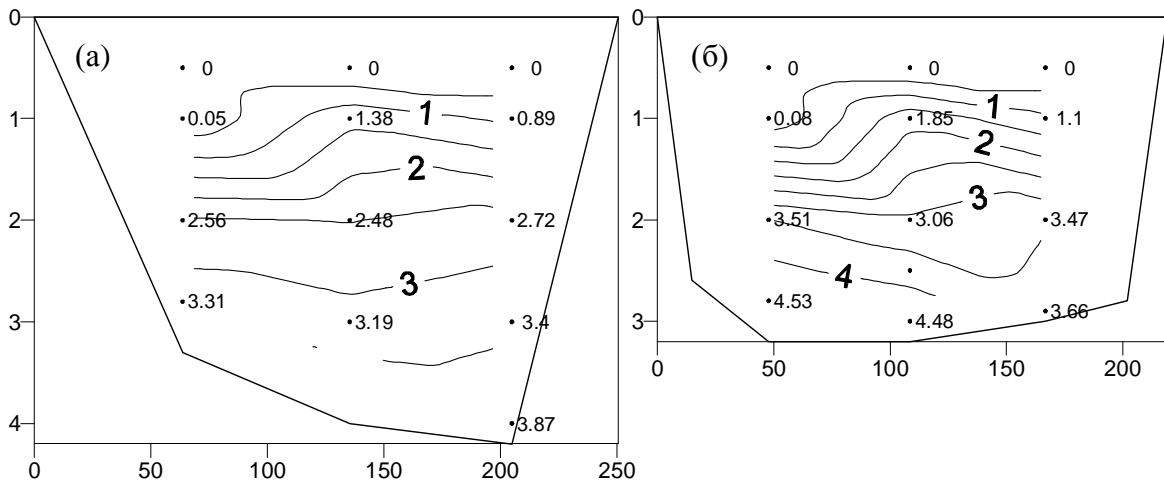
Рис. 1. Карта-схема расположения озер Ротковецкой группы (→ -направление течения реки, станции: • - комплексные, + - гидрологические).

Таблица 1. Морфометрические и гидрографические характеристики исследуемых озер Ротковецкой группы.

Характеристики	Озера			
	Святое	Узловское	Белое	Назаровское
Длина, км	4,30	0,56	1,30	1,86
Наибольшая ширина, км	0,93	0,31	0,22	0,33
Средняя глубина, м	3,6	2,9	2,0	1,8
Медиана глубины, м	2,6	2,4	2,0	1,5
Нижний квартиль, м	1,6	1,0	1,3	0,9
Верхний квартиль, м	5,0	4,5	2,8	2,7
Наибольшая глубина, м	16	7,8	3,7	4,5
Длина береговой линии, м	12,86	1,50	3,07	4,12
Показатель удлиненности	8,8	2,4	10,2	10,6
Площадь озера, км <sup>2</sup>	2,11	0,133	0,165	0,325
Объем озера, км <sup>3</sup> ×10 <sup>-3</sup>	7,49	0,333	0,337	0,520
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	125	162	32,8	40,3
Удельный водосбор	59	1218	199	124
Среднегодовой сток с водосбора, км <sup>3</sup> ×10 <sup>-3</sup>	34,5	44,8	9,06	11,2
Условный водообмен	4,6	135	26,9	21,4



**Рис. 2.** Вертикальное распределение температуры воды в озерах Ротковецкой группы зимой (а), весной (б), летом (в) в 2006 г. 1 – Святое, центральная часть; 2 – Узловское; 3 – Святое, северная часть; 4 – Белое.



**Рис. 3.** Распределение температуры воды на поперечных разрезах в Назаровском (а) и Белом (б) озерах в марте 2006 г. По левой оси – глубина, по нижней – расстояние в метрах, запад слева.

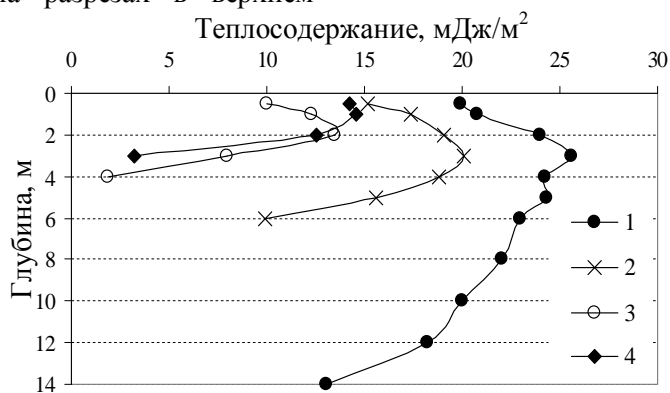
Исследования проводились в зимний, весенний и летний сезоны на вертикалях, расположенных в районе наибольших глубин. Вертикальное распределение температуры воды на станциях по сезонам показано на рисунке 2. В период ледостава время выполнения работ (22 - 25 марта)

соответствовало концу гидрологической зимы. Дополнительно к наблюдениям на вертикалях были выполнены поперечные гидрологические разрезы (рис. 1). Во всех озерах температура воды увеличивалась с глубиной (рис. 2), достигая у дна: в Святом 2,6°С в центральной и 3,6°С в север-

ной частях, в Узловском –  $2,7^{\circ}\text{C}$ , Назаровском –  $3,9^{\circ}\text{C}$  и Белом –  $4,5^{\circ}\text{C}$ . Наибольшие вертикальные градиенты температуры воды наблюдались в верхнем полуметровом слое подо льдом (от  $2,0$  до  $3,7^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ). В Назаровском и Белом озерах градиенты температуры оставались высокими до дна, как и в северной части Святого озера, представляющей ковшеобразный залив с глубинами до  $4$  м, отделенного от озера порогом глубиной до  $2$  м. Высокие значения средневзвешенных температур воды наблюдались в Белом ( $2,7^{\circ}\text{C}$ ) и Назаровском ( $2,5^{\circ}\text{C}$ ) озерах, наименьшие – в оз. Узловском ( $1,7^{\circ}\text{C}$ ), и промежуточные значения – в оз. Святом ( $2,1^{\circ}\text{C}$ ). Горизонтальная неоднородность температур сильнее выражена в поверхностном слое с разностью между экстремальными значениями температуры от  $0,8$  до  $1,8^{\circ}\text{C}$ . Вследствие большего выхолаживания вод мелководья в прибрежной зоне возможно формирование резких термических градиентов, наиболее выраженных в мелких Назаровском и Белом озерах (рис. 3 а, б), достигающих на глубине  $1$  м значений  $0,019$  и  $0,029^{\circ}\text{C}/\text{м}$ , соответственно. Средние значения горизонтальных градиентов температуры воды на горизонтах  $1$  и  $2$  м в оз. Белом выше, чем в оз. Святом, в  $3$  раза. Распределение плотности воды на разрезах соответствует циклоническому характеру циркуляции вод в озерах, при которой в центральной части озер возможно происходит подъем более плотных и теплых вод, чем, предположительно, и вызван изгиб изотерм на разрезах в верхнем

двухметровом слое. Роль сточных течений в формировании циклонической циркуляции незначительна, так как в марте сток составляет около  $2,2\%$  от его годового значения. Возможность существования плотностных течений в зимний период в мелководных озерах отмечена в работе Петрова М.П. с соавторами [4].

На рисунке 4 для каждого озера показано изменение теплосодержания столба воды высотой, равной средним глубинам последовательно отсекаемых объемов котловины озера по горизонтам, начиная от дна. Температура воды рассчитывалась как средневзвешенная пропорционально объемам отсекаемых слоев. При гомотермии, устанавливающейся перед ледоставом, теплосодержание столба воды нарастает по горизонтам пропорционально его высоте. После ледостава прогревание от дна приводит к обратной стратификации температуры воды. Изменение теплосодержания столба воды будет определяться вертикальным ходом температуры и распределением площади дна по глубине. Оно возрастает до горизонта, на котором снижается роль теплоотдачи дна в повышение температуры и вклад теплосодержания следующего слоя приводит к уменьшению удельного теплосодержания вод отсеченного объема вследствие снижения температуры воды и приращения площади дна. В Святом и Узловском озерах уменьшение теплосодержания столба воды начинается с горизонта  $3$  м, в оз. Назаровском –  $2$  м и оз. Белом –  $1$  м.



**Рис. 4.** Изменение теплосодержания столба воды в озерах в марте 2006 г. 1 – Святое, 2 – Узловское, 3 – Назаровское, 4 – Белое.

В работе Д. Хатчинсона [5] отмечено, что температура на глубине 1-2 м в течение зимнего периода остается такой, какой была во время циркуляции, предшествовавшей замерзанию. Приняв за начальные значения перед ледоставом среднюю температуру воды на горизонте 2 м для Святого и Узловского озер ( $1,3^{\circ}\text{C}$ ) и на горизонте 1 м для Назаровского и Белого озер ( $1,0^{\circ}\text{C}$ ) можно ориентировочно сравнить долю в зимнем нагревании водных масс озер за счет теплоотдачи донных отложений. Учитывая нагрев до этих же горизонтов, теплосодержание вод повысилось за зимний период в озерах: Святом на 32%, Узловском – 36%, Назаровском – 56% и Белом – 64%. Среднее количество отданного донными отложениями тепла при принятых условиях, соответственно, составит: 7,8, 6,9, 6,9 и  $9,4 \text{ мДж/м}^2$  или 2,6, 2,9, 5,4 и  $7,5 \text{ мДж/м}^3$ . Таким образом, можно предположить, что большим теплозапасом обладают донные отложения Святого и Белого озер, а большее количество тепла на единицу объема воды приходится в мелких озерах. Превышение теплозапаса вод Белого озера по сравнению с Назаровским объясняется меньшей долей мелководий, подверженных выхолаживанию. Площадь мелководий глубиной до 1 м в Белом составляет 13%, в Назаровском – 35%.

В глубоких озерах интенсивнее теплоотдача донными отложениями отмечается на глубинах 3-8 м в Святом и 3-5 м в Узловском. Поскольку наблюдаемая прозрачность по диску Секки составляет 1,5 – 2,0 метра, то существенная роль в формировании теплозапаса донных отложений в глубоких озерах принадлежит ветровому перемешиванию вод. Меньший теплозапас донных отложений в Узловском озере объясняется меньшей его открытостью, защищенностью высокими берегами, а высокая проточность его способствует выносу тепла донных отложений мелководья после ледостава.

Весной (16-19 мая) температура воды на поверхности достигла на оз. Святом –  $8,9^{\circ}\text{C}$ , в его мелководной северной части и других озерах –  $10,0^{\circ}\text{C}$  и выше. В глубоких озерах наблюдалась слабая стратифи-

кация (рис. 2). В центральной части Святого озера слой скачка находился на глубинах 6-10 м с максимальным градиентом  $0,55^{\circ}\text{C/м}$  в слое 8-10 м. В мелководной северной части оз. Святого и Белом озере в придонных слоях наблюдались температурные градиенты, соответственно,  $2,76$  и  $1,96^{\circ}\text{C/м}$ , обусловленные охлаждающим действием иловых отложений. Придонные температуры воды в центральной и северной части оз. Святого составили, соответственно,  $5,65$  и  $7,14^{\circ}\text{C}$ , в оз. Узловском –  $8,24^{\circ}\text{C}$  и в оз. Белом –  $8,03^{\circ}\text{C}$ . Теплозапас вод на станциях отбора проб увеличился в центральной и северной части оз. Святого, соответственно, в 3,4 и 4,7 раза, в оз. Узловском – в 5,7 и в оз. Белом – в 3,7 раза. Более высокие значения придонной температуры воды и прироста теплозапаса в Узловском озере, вероятно, являются результатом интенсивного перемешивания вод течениями, вызванными весенним стоком, который в мае составляет около 35% от годового или 45 объемов озера. При этом воды притоков прогреваются быстрее, чем в озере, повышенное содержание взвеси в весенний период увеличивает их плотность, что способствует большему перемешиванию и накоплению тепла водами озера.

Летний период проведения работ (12-16 августа) соответствовал концу гидрологического лета. Поверхностные значения температуры воды составили  $18-21^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). Придонные температуры в центральной части оз. Святого и оз. Узловского, соответственно,  $7,3$  и  $10,1^{\circ}\text{C}$ , превышали весенние значения на  $1,7$  и  $1,9^{\circ}\text{C}$ , в северной части оз. Святого и Белом озере, соответственно,  $14,8$  и  $16,4^{\circ}\text{C}$  – на  $8^{\circ}\text{C}$ . Теплозапас вод в озерах увеличился относительно весеннего в 1,6-1,9 раза. Максимальные градиенты в оз. Святом отмечались в слоях 1-2 м ( $2,26^{\circ}\text{C/м}$ ) и 8-10 м ( $1,60^{\circ}\text{C/м}$ ) на суточной станции, в северной части – 2-3 м ( $3,66^{\circ}\text{C/м}$ ), в оз. Узловском – в слоях 2-3 и 4-5 м ( $1,80$  и  $1,88^{\circ}\text{C/м}$ ), в оз. Белом – только в придонном слое ( $2,14^{\circ}\text{C/м}$ ). Средние градиенты температуры (поверхность – дно) увеличились по сравнению с весной в 3.5-5 раз, за исключением оз. Белого.

