



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ

*На правах рукописи*

**Ефремова Татьяна Владимировна**

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ  
ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР  
СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ**

25.00.27 - гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук \*

Санкт-Петербург  
2005

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера Карельского  
научного центра РАН

Научный руководитель:

доктор географических наук  
**Шумейко Михаил Арсеньевич**

Официальные оппоненты:

доктор географических наук,  
профессор  
**Догановский Аркадий Михайлович,**  
кандидат географических наук  
**Потахин Сергей Борисович**

Ведущая организация:

Лимнологический институт  
СО РАН (Иркутск)

Защита диссертации состоится **20 мая 2005 г. в ... часов** на заседании  
диссертационного совета Д 002.064.01 при Институте озераедения РАН  
по адресу: 196105 Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д.9

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
озераедения РАН.

Автореферат разослан . . . . апреля 2005 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
кандидат биологических наук



В.П.Беляков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Термический режим озер в значительной мере определяет развитие физических, химических и биологических процессов в водоемах, что, в конечном счёте, сказывается на уровне их трофии. В свою очередь, пространственно-временная изменчивость распределения температуры воды в озерах зависит одновременно от зональных климатических особенностей региона, определяющих результирующий тепловой поток в обмене энергией между водоемом и атмосферой, и от озерной морфометрии, влияющей на процессы перемешивания и перераспределения тепла в водной толще.

В настоящее время влияние различных географических факторов на термический режим пресноводных водоемов проанализировано во многих работах. При глобальном рассмотрении озер Земли в основном принимается во внимание зональность инсоляции и обычно исследуется влияние географической широты  $\varphi$  и высоты над уровнем моря  $Z$  на элементы теплового баланса водоемов (Адаменко, 1985), кратность полного перемешивания водных масс в годовом термическом цикле (Hutchinson, Loftier, 1956), средние и экстремальные значения температуры поверхности воды (Рянжин, 1991) и ее годовой ход (Страшкраба, Гнаука, 1989).

При исследовании озер одной климатической зоны главным образом учитывается влияние геометрических размеров и формы строения озерных котловин на термическую стратификацию и перемешивание (Хатчинсон, 1969; Хомский, 1969), глубины летнего эпилимниона и термоклина (Arai, 1981; Gorfiam, Boyce, 1989; Patalas, 1984), тепловой бюджет (Birge, 1915; **Gorham**, 1964; Форш, 1974; Якушко, 1971).

Разделение на глобальный и региональный подходы упрощает анализ зависимости элементов термического режима озер от отдельных географических факторов при выделении приоритетных параметров. На территории Северо-Запада России и Финляндии, промышленно развитых и интенсивно осваиваемых районов, находится более 275 000 озер. Несмотря на огромное количество озер в регионе, регулярные наблюдения за температурой воды проводятся менее чем на 100 водоемах. За последние годы озерная сеть гидрологических постов страны сократилась на 25%, причем в основном за счет средних и малых водоемов озерных районов (Румянцев и др., 2004). Поэтому возникает необходимость оценки и анализа сезонного хода температуры воды на различных глубинах в зависимости от морфометрических и географических особенностей водоёмов. Особую важность решение этой проблемы приобретает для озёр с полным отсутствием гидрометеорологической информации.

Таким образом, актуальной проблемой лимнологии является выявление генетически обусловленных связей и закономерностей, определяющих формирование и развитие термической структуры в озерах, разнообразных по своим морфометрическим характеристикам и расположенных в разных климатических условиях, на основе данных регулярных наблюдений.

Цели и задачи исследования. Цель исследования - установить закономерности изменчивости термического режима разнотипных водоемов Северо-Запада России в зависимости от физико-географических факторов и разработать методы их оценки на основе анализа натуральных данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформировать ряды данных по температуре воды разнотипных озер Северо-Запада России и их физико-географическим характеристикам;

- получить количественные выражения для условий возникновения термической стратификации в разнотипных озерах в зависимости от их геометрических размеров;

- оценить влияние различных географических факторов на вертикальную термическую структуру разнотипных водоемов и установить регрессионные зависимости между температурой воды на стандартных горизонтах и характеристиками озер;

- оценить влияние географической широты и морфометрических особенностей водоемов на сезонный ход температуры поверхности воды;

- исследовать применимость известных функций для аппроксимации натуральных данных годового хода температуры воды на различных горизонтах в разнотипных водоемах;

- исследовать пространственно-временную изменчивость среднесезонной температуры воды в крупном водоеме региона на примере Онежского озера;

- оценить влияние изменчивости температуры воздуха, как одного из основных климатических факторов для зоны избыточного увлажнения, на вертикальную термическую структуру Петрозаводской губы Онежского озера.

Объектом исследования являются озера Северо-Запада России и Финляндии. Среди крупных озер особое внимание уделено Онежскому озеру, снабжающему водой крупные населенные пункты Карелии, в том числе г. Петрозаводск.

Предметом исследования являются среднесезонные распределения температуры воды разнотипных водоемов.

В соответствии с задачами определены основные методы исследований - методы корреляционного и регрессионного анализа данных и метод стохастического моделирования.

Научная новизна и основные научные положения, выносимые на защиту:

- на примере разнотипных озер Северо-Запада России и Финляндии впервые разработаны доступные широкому кругу специалистов методы оценки влияния физико-географических закономерностей и озерной морфометрии на годовой ход температуры поверхности воды и на вертикальную термическую структуру водоемов;

- установлено, что скорость нагревания водоемов умеренной зоны в весенне-летний период зависит одновременно от их географического положения и

геометрических размеров, в то время как охлаждение в осенний период — преимущественно от глубины водоёма. Среднегодовое значение температуры верхнего пятиметрового слоя озер в период максимального прогрева определяется главным образом зональными климатическими факторами, а на температуру градиентного слоя и гипolimниона значительное влияние оказывают морфометрические характеристики водных объектов;

- предложена аппроксимирующая функция для описания среднегодовых ежедневных значений температуры поверхности воды 54 озер Европы и ежедневного хода температуры воды на стандартных горизонтах в глубоководных озерах (Онежском, Инари, Каллавети);

- благодаря разработанной методике впервые получены ежедневные средние пространственные распределения температуры воды Онежского озера, построены карты-схемы распределения температуры воды на стандартных горизонтах на 1-ое число каждого месяца, количественно оценена интенсивность нагревания и охлаждения различных слоев воды;

- установлены регрессионные зависимости между эмпирическими параметрами модели для температуры воздуха и воды, которые позволяют прогнозировать сезонные изменения вертикальной термической структуры Петрозаводской губы Онежского озера при различных сценариях изменения регионального климата.

Практическая значимость работы. Полученные результаты могут быть использованы для вычисления характерной температуры воды в озерах, на которых нет стационарных наблюдений, а также для совершенствования термических классификаций озер и калибровки боксовых экологических моделей. Разработанные стохастические модели позволяют оперативно проводить оценки термического режима водоемов (по вертикальной термической структуре, сезонным изменениям температуры поверхности воды, толщине эпилимниона), используя при этом ограниченную географическую информацию о водных объектах. В силу своей простоты эмпирические модели доступны широкому кругу специалистов для решения многих научных и практических задач, например, при строительстве водохранилищ или при изменении уровня и водного режима озер.

Основные результаты получены автором в рамках научно-исследовательских тем, выполнявшихся в Институте водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН), а также при проведении исследований по проекту РФФИ (грант №02-05-97508р).

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации были представлены на 5 международных научных конференциях: «Биологические ресурсы водоемов бассейна Балтийского моря» (Петрозаводск, 1991), на III международном Ладожском симпозиуме «Мониторинг и устойчивое управление Ладожским озером и другими крупными озерами» (Петрозаводск, 1999); «Экология северных территорий России. Прогноз ситуации, пути развития, решения»

(Архангельск, 2002), на IV международном Ладожском симпозиуме (Новгород, 2002); на VI конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (Москва, 2004).

Работа полностью заслушана на совместном заседании Лаборатории гидрологии и Лаборатории географии и природопользования Института озераведения РАН в ноябре 2004 г.

Публикации. Результаты диссертации представлены в 20 научных публикациях. Диссертация написана на основе материалов многолетних исследований автора. Все работы, результаты которых приведены в диссертации, выполнены лично автором или вместе с соавторами.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 136 страницах, включает 24 рисунка, 5 таблиц, список использованной литературы из 117 наименований, в том числе 36 на иностранных языках.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

### **Глава 1. Влияние географических факторов и морфометрических характеристик на термическую структуру озер**

Состояние озера как географического объекта в первую очередь определяется географическим положением (географические координаты, высота над уровнем моря и т.п.). На влияние физико-географической зональности на термический режим пресноводных водоемов впервые обратил внимание основоположник лимнологии Ф. Форель и предложил термическую классификацию (Forel, 1892). Позже термические классификации, основанные на принципе физико-географической зональности, уточняли, дополняли и развивали многие исследователи (Runner, 1931; Yoshimura, 1936; Hutchinson, Loffler, 1956; Zafar, 1959; Lewis, 1983; Рянжин, 1989 и др.).

В пределах одной климатической зоны определяющую роль в формировании термического режима водных масс имеют морфометрические особенности водоема (Gorham, 1964; Хомскис, 1969; Форш, 1974; Драбкова и др., 1979; Изотова, 1982), что нашло отражение во многих региональных термических классификациях. Для умеренного климатического пояса это классификации П.Ф. Домрачева, А.А. Браславского и З.А. Викулиной, В. Хомскиса, И.С. Захаренкова, О.Ф. Якушко, А.И. Пехович и В.М. Жидких, Л.В. Несиной и Т.А. Огневой, С.П. Китаева и др. Наибольший интерес представляет класси-

фикация А.И. Тихомирова, в которой термический режим водоемов рассматривается в годовом цикле в зависимости от средней глубины.

Рассматриваемая территория расположена на северо-западе Европейской части России между  $55^{\circ}$ - $69^{\circ}$  с. ш. (протяженность около 1450 км) и  $27^{\circ}$ - $42^{\circ}$  в. д. (около 800 км). В административном отношении она включает республику Карелия, Мурманскую, Ленинградскую, Новгородскую, Псковскую области, а также часть Архангельской, Вологодской и Калининской областей (рис.1).

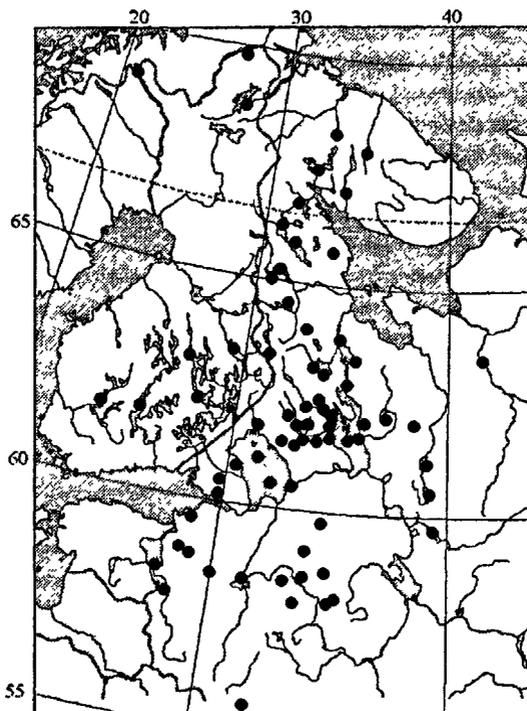


Рис. 1. Карта-схема расположения исследованных озер

Климатические особенности исследуемого региона определяются географическим положением территории в субарктических и умеренных широтах. Географическое положение региона и связанное с ним количество поступающей солнечной радиации, близость Баренцева и Балтийского морей, преобладание западного переноса воздушных масс атлантического и арктического происхождения обуславливают интенсивную циклоническую деятельность. Территория относится к зоне избыточного увлажнения и имеет хорошо развитую гидрографическую сеть.

Для изучения сезонной изменчивости среднемноголетнего хода температуры поверхности воды использованы данные по 52 озерам Европейской территории России, собранные за многолетний период (1945-1980 гг.) на сети станций и постов Росгидромета и данные по двум озерам Финляндии, обобщенные государственной системой гидрометеорологических наблюдений Финляндии (1961-1991 гг.). Для изучения среднемноголетней вертикальной структуры использованы данные о температуре воды, собранные гидрологическими постами с 1958 по 1989 г. на рейдовых вертикалях 60 водоемов России и 8 озер Финляндии (1961-1975 гг.)

Выборка рассматриваемых в работе водоемов представляет большое их разнообразие по морфометрическим характеристикам, формам строения озерных котловин и проточности. По геометрическим размерам в нее включены все типы водоемов: от крупнейших - Ладожского и Онежского (с площадью зеркала 17872 км<sup>2</sup> и 9777 км<sup>2</sup>) до самых малых с площадью менее 1 км<sup>2</sup>. В выборку входят крупные и глубоководные финские озера (Инари, Каллавеси, Паяние, Пиелинен) и озера Северо-Запада России (Имандра, Пяозеро, Топозеро, Сегозеро); крупные, но мелководные (Выгозеро, Чудское, Ильмень). Больше половины водоемов по площади относятся к разряду «средних» или «малых», т. е. их площадь меньше 100 км<sup>2</sup> и 10 км<sup>2</sup>, соответственно. Диапазон некоторых характеристик исследованных озер приведен в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики исследованных озер

Характеристика	Диапазон
Широта, град	55°37' – 69°46' с. ш.
Долгота, град	20°30' – 41°32' в. д.
Высота над уровнем моря, м	4.5 – 463
Площадь, км <sup>2</sup>	0.65 – 17872
Средняя глубина, м	1.6 – 46.9
Максимальная глубина, м	5 – 230
Объем, км <sup>3</sup>	0.002 – 837.9
Коэффициент условного водообмена, год <sup>-1</sup>	0.06 – 76.84

Для исследуемых озер получена зависимость стратификации водоемов от максимальной глубины ( $H_{\max}$ , м) и площади ( $S$ , км<sup>2</sup>) (Ефремова, Палыпин, 2003). Для проведения границ между гипо-, эпи- и метатермическими типами водоемов (рис. 2) согласно терминологии из классификации А. И. Тихомирова (1982) использовалась безразмерная температура 0:

$$\Theta = \frac{\bar{T}_H - T_{md}}{T_0 - T_{md}},$$

где  $\bar{T}_0$  и  $\bar{T}_H$  – среднееголетняя температура поверхностного и придонного слоев озер в конце июля – начале августа,  $T_{md}$  – температура максимальной плотности.

Получены эмпирические формулы для границ ( $h_1, h_2$ ) между разными типами озер:

$$h_1 = 6,432 + 3,51 \lg S \quad \text{при } \Theta = 0,7;$$

$$h_2 = 17,781 + 8,555 \lg S \quad \text{при } \Theta = 0,3,$$

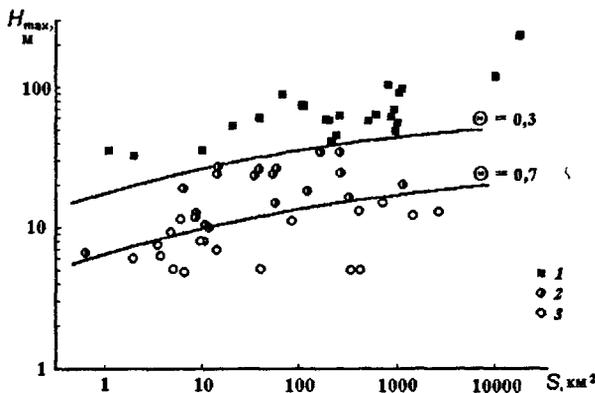


Рис. 2. Зависимость стратификации в озерах от площади и максимальной глубины.

1–3 гипо-, мета- и эпитеpмические озера соответственно.

Глубокие озера (гипотермические -  $\Theta < 0,3$ ) – типичные представители димиктических озер с наличием по вертикали трех слоев: эпи-, мета- и гипolimниона. Водные массы мелких озер (эпитеpмические -  $\Theta > 0,7$ ) летом однородны, или из-за неустойчивой термической стратификации периодически перемешиваются до дна под воздействием ветров или из-за охлаждения воды. Озера со средними глубинами (метатермические -  $0,3 \leq \Theta \leq 0,7$ ) обычно имеют два слоя: верхний квазиоднородный и нижний стратифицированный. Придонный квазиоднородный слой в них, как правило, отсутствует или имеет небольшую толщину и наблюдается не каждый год.

Из рис. 2 следует, что для определенной площади озера должна быть минимальная глубина, при которой оно будет стратифицировано; если площадь озера увеличивается, то минимальная глубина также увеличивается.

Количественные соотношения между длиной разгона ветра и глубиной, при которых озера должны быть стратифицированы, получены Р. Латропом и Р. Лили (Lathrop, Lillie, 1980), Е. Горхам и Ф. Бойсом (Gorham, Boyce, 1989). В отличие от предложенного выше разделения озер на три класса Латроп и Лили, Горхам и Бойс делили озера на две группы: стратифицированные и

нестратифицированные, поэтому границы разделения озер не совпадают. Е. Горхам и Ф. Бойс дали теоретическое обоснование различий в режимах ветрового перемешивания малых ( $L < 5$  км) и больших ( $L > 5$  км) озер, основываясь главным образом на работе Р. Шпигеля и Й. Имбергера (Spigel, Imberger, 1980).

К сожалению, для озер Северо-Запада России не представляется возможным оценить глубину перемешанного слоя, так как наблюдения за температурой воды проводились с разной дискретностью по глубине: в глубоких озерах обычно через 5 м, в средних - через 2 м. Поэтому была рассмотрена возможность применения формул К Паталаса (Patalas, 1984) к нашему региону. По его данным, собранным для разных климатических зон (170 озер Северной Америки, Польши и Японии), была рассчитана глубина залегания эпилимниона ( $h_e$ ) не только в зависимости от длины разгона ветра ( $L$ ), но еще от  $\varphi$ . Поправки к  $h_e$  от  $\varphi$  для его формулы оказались не большими, но значимыми. В озерах разных геометрических размеров преобладают различные механизмы ветрового перемешивания. Для того чтобы оценить, как это отражается на глубине эпилимниона в зависимости от длины разгона ветра, выборка озер была разбита на три группы: малые озера ( $L < 5,5$  км), малые и средние озера ( $5,5 < L < 15$  км) и все 170 озер (включая крупные с  $L \leq 33$  км и площадью до 1000 км<sup>2</sup>).

Для различных групп озер получены близкие значения регрессионных коэффициентов и свободных членов уравнений, что свидетельствует об устойчивости полученных зависимостей и позволяет использовать при расчетах единое уравнение для всей выборки озер:

$$h_e = 4,83 + 0,119 \varphi \lg L \quad (\pm 1,56 ; R= 0,88;)$$

В скобках приведено стандартное отклонение и коэффициент корреляции. Таким образом, эту формулу можно использовать для расчетов  $h_e$  одновременно как для малых, так и для крупных озер, расположенных в диапазоне от 45° до 66° с. ш. (в том числе для нашего региона).

## **Глава 2. Средняя многолетняя вертикальная термическая структура озер в период максимального прогрева**

Вертикальную термическую структуру любого озера на конкретную дату можно представить в виде детерминированной и стохастической составляющих:

$$T(z, d) = \bar{T}(z, d) + \Delta T(z, d),$$

где  $\bar{T}(z, d)$  - средняя температура в озере на горизонте  $z$  за конкретную дату  $d$ ,  $\Delta T(z, d)$  - сумма поправок на пространственную и временную изменчивость температуры:

Средняя температура в озере на конкретную дату  $\bar{T}(z, d)$  является климатической характеристикой и зависит от зональных факторов (географическая широта, высота над уровнем моря) и морфометрических характеристик самого озера.

Для исследования вертикальной термической структуры озер Северо-Запада выбран период с прямой термической стратификацией (20 июля - 10 августа) при максимальном накоплении тепла в озерах. Вертикальная термическая структура озер  $T(z)$  оценивалась на основании измерения температуры воды на стандартных горизонтах (0,1,2,5,10,15,20,25,30,40 м). Ряды измеренных в озерах значений  $T(z)$  неоднородны и имеют длину от 5 до 27 лет, для большинства озер они составляют около 15 лет. Первоначальные данные  $T(z)$  усреднялись по каждому горизонту и озеру с учетом всех измерений. Результаты предварительного статистического анализа свидетельствуют об отсутствии зависимости между геометрическими размерами озер и  $\Phi, Z$ , показателем условного водообмена (коэффициенты парной корреляции  $r < 0,25$ ). Между отдельными морфометрическими характеристиками озер существуют довольно тесные связи. Например, между средними  $H$  и максимальными  $H_{\max}$  глубинами озер, или между их площадью  $S$  и объемом  $V$  наблюдаются явные линейные зависимости. Однако, связь между  $S$  и  $H$  или  $H_{\max}$  для водоемов данной выборки невысокая.

Для статистической обработки данных были применены методы нелинейного оценивания Ньютона и множественного регрессионного анализа. Задача заключалась в том, чтобы выбрать основные географические факторы, оказывающие влияние на температуру воды в озерах, и получить наиболее простое выражение с ограниченным количеством предикторов, которые широко используются в лимнологии и их количественные характеристики известны для многих озер.

В результате проведенного анализа в качестве приоритетных характеристик были выбраны: географическая широта, высота над уровнем моря, площадь озера, средняя глубина, коэффициент условного водообмена (Пальпин, Ефремова, 2002; Ефремова, Пальшин, 2003). Для крупных глубоководных озер в связи с неоднородностью поля температуры по пространству была добавлена глубина в точке измерения, а для учета влияния разгона ветра на вертикальную структуру - коэффициент открытости.

Следующий этап исследований заключался в нахождении оптимального регрессионного уравнения, описывающего связи температуры воды с выбранными географическими характеристиками. Было апробировано около 50 уравнений с различными комбинациями выбранных предикторов и проверкой регрессионных

моделей на устойчивость и адекватность. Найдено, что осредненные за многолетний период значения  $\bar{T}(z)$  на различных горизонтах для периода летней стратификации в озерах наилучшим образом оцениваются с помощью следующего регрессионного уравнения:

$$\bar{T}(z) = a_0 + a_1(72 - \varphi) + a_2 Z + a_3 \lg S + a_4 (\lg \bar{H})^2 + a_5 h_i + a_6 \lg K + a_7 E \quad (1)$$

где  $Z$  - высота над уровнем моря;  $h_i$ , м - глубина озера в точке измерения; ЯГ, год<sup>-1</sup> - коэффициент условного водообмена;  $E = S/\bar{H}$ , км<sup>2</sup>/м - коэффициент открытости.

Таблица 2

Коэффициенты множественной корреляции  $R$ , стандартные отклонения температуры воды  $E$  и коэффициенты  $a_0 - a_7$  для различных горизонтов для уравнения (1)

$z$ , м	$R$	$\varepsilon$ , °C	$a_0$ , °C	$a_1$ , °C/° с. Ш.	$a_2$ , °C/м	$a_3$ , °C	$a_4$ , °C	$a_5$ , °C/м	$a_6$ , °C	$a_7$ , °C/(км <sup>2</sup> /м)
0	0.94	0.78	14.16	0.564	-0.0048	-0.12	-0.31	-0.0038	0.095	-0.0058
2	0.93	0.78	13.52	0.554	-0.0048	-0.04	-0.31	-0.0040	0.103	-0.0059
5	0.86	1.09	11.69	0.553	-0.0033	0.52	-0.66	-0.0118	0.364	-0.0054
10	0.83	1.36	8.22	0.391	0.0025	2.14	-1.25	-0.0349	1.663	-0.0049
15	0.86	1.09	5.70	0.227	0.0085	2.45	-1.45	-0.0292	2.253	-0.0039
20	0.89	0.86	4.94	0.214	0.0097	2.25	-1.50	-0.0202	2.141	-0.0049
25	0.92	0.70	2.78	0.261	0.0112	2.00	-1.39	-0.0062	1.992	-0.0058
30	0.95	0.63	2.22	0.282	0.0115	1.72	-1.32	-0.0002	1.934	-0.0059
40	0.97	0.53	1.73	0.280	0.0115	1.52	-1.11	-0.0012	1.754	-0.0058

Коэффициенты  $a_0 - a_7$  для различных горизонтов и их размерность приведены в табл. 2, где также показаны коэффициенты множественной корреляции  $R$  и стандартные отклонения температуры  $\varepsilon$ . Из табл. 2 видно, что значения  $R$  достаточно высокие, а  $\varepsilon < 1^\circ\text{C}$  для эпи- и гипolimнионов и немного выше для градиентного слоя.

Коэффициенты  $a_0 - a_7$  плавно изменяются с глубиной. Это свидетельствует об устойчивости подобранной регрессионной модели при описании вертикальной термической структуры. Изменение свободного члена  $a_0$  с глубиной по форме представляет собой осредненный для озер вертикальный профиль температуры воды, но абсолютные значения его несколько ниже. Параметры с коэффициентами  $a_1 - a_7$  следует рассматривать как поправки к нему для учета зональных факторов и озерной морфометрии.

Анализ адекватности модели показал, что коэффициенты множественной корреляции достаточно высокие (0,86-0,97), соответственно высокие и коэффициенты детерминации, характеризующие объясненную долю дисперсии и свидетельствующие, насколько хорошо результаты моделирования согласуются с натурными данными. Стандартные отклонения  $< 1^{\circ}\text{C}$  для эпи- и гипolimнионов и немного выше для металимниона.

С помощью табл. 2 и формулы (1) можно оценить влияние каждого фактора на температуру воды на различных горизонтах в озерах. Это особенно важно при сравнительном анализе их термических режимов. На горизонтах 0-5 м температура воды в первую очередь зависит от широты. С увеличением глубины на горизонтах зависимость  $T(z)$  от  $\varphi$  уменьшается, а от морфометрических показателей водоемов и их проточности возрастает. Увеличение  $S$  приводит к слабому уменьшению  $T(z)$  на горизонтах 0-2 м и к существенному росту  $T(z)$  на глубине  $> 10$  м ( $a_3$ ). При увеличении  $\bar{H}$  в озерах уменьшаются значения  $T(z)$  на всех горизонтах ( $a_4$ ), причем отрицательная поправка к  $T(z)$  больше для глубинных слоев. При глубине на рейдовой вертикали 100 м поправка к  $T(z)$  на горизонтах 0 и 2 м составляет минус  $0.4^{\circ}\text{C}$ , а в слое скачка (10-20 м) увеличивается по абсолютной величине до  $2-3^{\circ}\text{C}$  ( $a_5$ ). Для проточных озер наблюдается небольшое повышение температуры воды в верхнем слое (0-2 м) и значительное увеличение ее в слое скачка и гипolimнионе ( $a_6$ ).

Для всех исследуемых озер построены вертикальные профили температуры воды по осредненным за многолетний период измеренным значениям на различных горизонтах и рассчитанные по уравнению (1). Пример для трех озер показан на рис. 3.

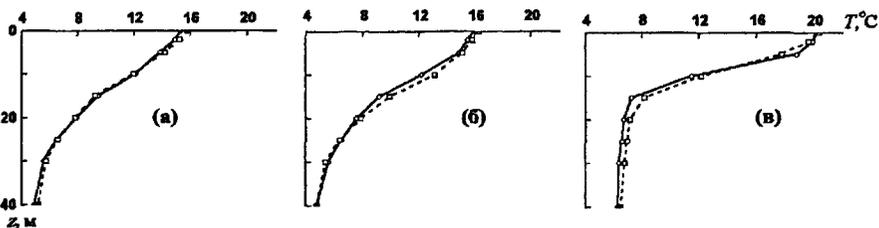


Рис. 3. Рассчитанные по (1) среднемноголетние профили температуры воды в озерах (штриховые кривые) и данные наблюдений (сплошные)

а - Топозеро, б — Онежское озеро, в - Валдайское.

Для проверки регрессионной модели (1) выполнены расчеты вертикальной термической структуры в озерах, данные по которым не входили в выборку, а именно Панаярви и Плещеево. Предсказанные по регрессионной модели значения температуры воды на различных горизонтах озер достаточно близко соответствуют измеренным величинам. Расхождения между наблюдаемыми и рассчитанными значениями  $\bar{T}(z)$  до 1-1,5°C отмечены для придонных слоев этих озер (в оз. Плещеево — на горизонтах 15-20 м, а в оз. Панаярви - на горизонтах 25-40 м). Они могут быть связаны как с тем, что наблюдения в этих озерах характеризуют не средне-многолетние значения, а относятся к конкретным годам, так и с неучтенными в регрессионной модели особенностями строения форм озерных котловин.

### Глава 3. Средний многолетний годовой ход температуры поверхности воды

Первое описание изменения температуры воды в озере с помощью непрерывной функции времени было сделано на примере оз. Мендота (Birge, 1929). Позже М. Страшкраба (Strashkraba, 1980) показал, что в глобальном масштабе общие закономерности зональной изменчивости среднегодовых вариаций температуры поверхности водоемов «средних размеров» хорошо описываются гармонической функцией в зависимости от географической широты и высоты над уровнем моря. Нагревание озер умеренной зоны обычно происходит быстрее, чем их охлаждение, поэтому одним из важных условий для аппроксимирующей функции является асимметричность возрастающей и убывающей ветвей. Такой годовой ход температуры водоемов можно представить в виде склейки двух косинусоид (Румянцев и др., 2001) или композиционными гармоническими функциями (Страшкраба, Гнаук, 1989). Моделирование среднего многолетнего цикла температуры воды непериодическими функциями приводится для Великих озер Америки (Lesht, Brandner, 1992) и Европы (Ефремова, Петров, 1992, 2000; Науменко и др., 2000; Науменко, Каретников, 2002).

Для моделирования годового цикла температуры поверхности исследуемых водоемов были апробированы различные функции. Наилучшим образом наблюдаемые данные температуры поверхности замерзающих озер Северо-Запада аппроксимируются непериодическими временными функциями (Lesht, Brandner, 1992) и (Ефремова, Петров, 1992). В расчетах использовалась формула (Ефремова, Петров, 1992), в которую дополнительно введен аддитивный член ( $b_0$ ), что существенно улучшило приближение к натурным данным при низких значениях температуры воды ранней весной и поздней осенью:

$$T(d, z) = b_0 + b_1 \left\{ 1 - \frac{1 - \exp[(d - b_2)b_3]}{1 + \exp[(d - b_2)b_3]} \right\} \cdot \left\{ 1 + \frac{1 - \exp[(d - b_4)b_5]}{1 + \exp[(d - b_4)b_5]} \right\}, \quad (2)$$

где  $T(d)$  - температура поверхности озера в данный момент времени ( $^{\circ}\text{C}$ );  $d$  - дата в днях от 1 января;  $b_0 - b_5$  - эмпирические параметры.

Эмпирические параметры модели для каждого конкретного озера подбирались итерационным квази-ньютоновским методом нелинейного оценивания. Параметры  $b_0$  и  $b_1$  связаны с минимальными и максимальными значениями температуры, но численно не равны им. Безразмерные параметры  $b_2$  и  $b_3$  определяют форму аппроксимирующей кривой, т.е. крутизну возрастающей и убывающей ветвей функции, а их численные различия между собой приводят к асимметрии. Два последних параметра связаны с точками перегиба функции и соответствуют датам максимальных скоростей роста температуры воды весной ( $b_4$ ) и понижения осенью ( $b_5$ ).

Параметры модели (2), полученные для всех водоемов, исследовались в зависимости от географических координат, озерной морфометрии и показателя условного водообмена. Наилучшим образом связи оцениваются единым для всех параметров регрессионным уравнением:

$$b_i = a_{i0} + a_{i1}(72 - \varphi) + a_{i2}Z + a_{i3}\lg S + a_{i4}(\lg \bar{H})^2 + a_{i5}\lg K + a_{i6}P, \quad (3) \\ i=0, 1, \dots, 5$$

где  $P = \bar{H} / H_{max}$  - коэффициент «емкости». Регрессионные коэффициенты  $a_{i0} - a_{i6}$  для расчета модельных параметров  $b_i$  даны в табл. 3, где также приведены коэффициенты множественной корреляции.

Таблица 3

Регрессионные коэффициенты  $a_{i0} - a_{i6}$  к формуле (3) и коэффициенты корреляции  $R$

$b_i$	$R$	$a_{i0}$	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$	$a_{i5}$	$a_{i6}$
$b_0, ^{\circ}\text{C}$	0,96	-4,5963	-0,0311	-0,00144	0,984	-0,507	-0,242	-1,17
$b_1, ^{\circ}\text{C}$	0,99	5,3717	0,134	-0,00149	-0,347	0,647	0,129	0,112
$b_2, \text{сут}$	0,84	271,68	0,842	-0,0287	-3,863	0,138	-1,130	-5,09
$b_3$	0,94	-0,0429	0,00071	-0,00002	-0,00191	0,00922	0,00119	-0,0007
$b_4, \text{сут}$	0,95	148,54	-1,718	-0,0000	2,662	11,02	1,607	-1,282
$b_5$	0,87	-0,0588	0,00139	-0,00003	-0,0026	0,00683	-0,00008	-0,0128
<i>Примечание</i> Размерность регрессионных коэффициентов $a_{i0}$ и $a_{i3} - a_{i6}$ соответствует размерности параметров $b_i$ , а в размерности $a_{i1}$ и $a_{i2}$ дополнительно $(^{\circ}\text{C ш})^{-1}$ и $\text{м}^4$								

В результате регрессионного анализа установлено, что наибольшее влияние на средний годовой ход температуры поверхности воды оказывают географическая широта, площадь озер и их средняя глубина. При этом минимальная температура (параметр  $b_0$ ) зависит главным образом от площади озер, максимальная

температура (параметр  $b_1$ ) - от географической широты, а, например, скорость понижения температуры в осенний период (параметр  $b_3$ ) определяется преимущественно глубиной озер. В меньшей мере проявляются зависимости параметров модели от условного водообмена и форм строения озерных котловин (коэффициент «емкости»). Однако, не учет водообмена озер приводит к погрешности температуры воды в период весенне-летнего прогрева до  $\pm 0.9^\circ\text{C}$ , а коэффициента «емкости» ранней весной и в период осеннего охлаждения - до  $\pm 0.6^\circ\text{C}$ . Влияние высоты над уровнем моря для данной выборки озер, расположенных от 0 до 200 м также небольшое, но значимое.

По уравнению (3) вычислены количественные значения параметров  $b_i$  для всех озер, по которым были построены модельные кривые годовых циклов температуры воды. Наилучшее соответствие между ними и измеренными значениями температуры характерно для средних и малых водоемов. Для Ладожского и Онежского озер получены модельные кривые и осредненные натурные данные по акваториям в целом и трем разным зонам (центральной, промежуточной и прибрежной). Это вызвано тем, что поля температуры в крупных озерах характеризуются значительной пространственной неоднородностью (Бояринов и др., 1999; Науменко, Каретников, 2002). Для крупных озер (Выгозеро, Сегозеро, Гопозеро, Имандра, Инари и др.) различия между модельными кривыми и натурными данными могут достигать  $1^\circ\text{C}$  (Пальшин, Ефремова, 2003). Для примера на рис. 4 показаны модельные кривые крупного Ладожского озера и небольшого оз. Глубокого.

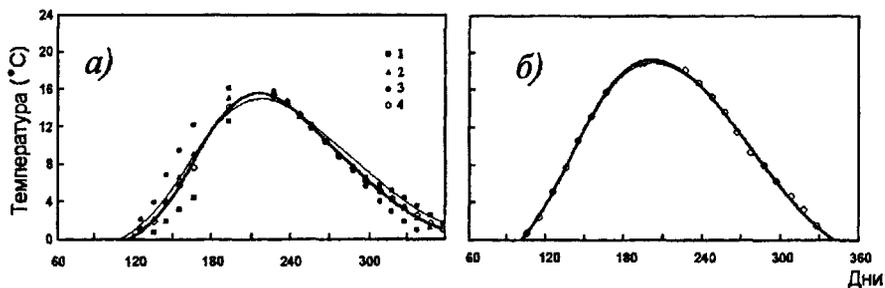


Рис. 4. Ежедекадные среднееголетние данные температуры поверхности воды (точки), модельные кривые с наилучшей подгонкой уравнения (2) — жирные линии и модельные кривые, полученные при расчете параметров  $b_i$  по уравнению (3) — тонкие линии для а) - Ладожского озера (1 - прибрежная; 2 - промежуточная; 3 - центральная зоны; 4 — акватория всего озера), б) - для озера Глубокого

Максимум температуры поверхности воды во всех озерах наблюдается приблизительно в одно время (середина-конец июля). Форма ветвей кривых температуры поверхности воды озер, расположенных южнее  $60^\circ$  с. ш., близка

к симметричной. В приполярных озерах наблюдается большая асимметричность кривых, возрастающая ветвь более крутая. Это вызвано тем, что процесс прогревания в северных широтах происходит более интенсивно в связи с круглосуточным поступлением солнечной радиации в июне-июле. Наибольшая асимметрия характерна для глубоководных районов крупных озер (Ладожское, Онежское, Сегозеро), в которых период охлаждения на один-два месяца продолжительнее периода нагревания.

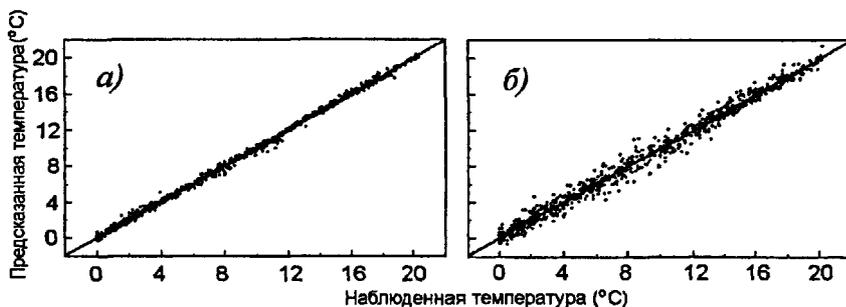


Рис. 5. Диаграмма рассеяния натуральных данных температуры поверхности воды и значений, (а) - рассчитанных при наилучшей подгонке уравнения (2), (б) - при расчете параметров  $b_i$  по уравнению (3) для 47 озер.

Для 47 озер по параметрам  $B_i$ , вычисленным по уравнению (3), с помощью модели (2) рассчитаны декадные значения температуры воды. На диаграмме рассеяния наблюдаемых и предсказанных значений все точки расположены вдоль прямой линии (рис. 5). Это свидетельствует о том, что модель учитывает асимметрию ветвей роста и понижения температуры воды и одинаково хорошо описывает годовой цикл, как при высоких, так и при низких значениях температуры. Стандартные отклонения между измеренными значениями температуры воды и полученными в результате расчетов при наилучшей подгонке уравнения (2) составляет  $0.27^{\circ}\text{C}$ , а при вычислении параметров  $B_i$  по географическим характеристикам озер  $0.7^{\circ}\text{C}$ . Такая точность делает предложенную модель полезной для описания "типичного" годового температурного цикла.

Верификация стохастической модели осуществлялась по годовому ходу температуры воды в семи разнотипных озерах, которые расположены на рассматриваемой территории от  $56^{\circ}$  до  $67^{\circ}$  с. ш. Эти озера (Ондозеро, Кимасозеро, Ньюк, Совдозеро, Ковдозеро, Торбино, Охват) не были включены в основную выборку. Для них по уравнению (3) были определены параметры  $b_0$  в соответствии с их географическими характеристиками, а по модели (2) построены годовые термические

циклы. Результаты верификации показали хорошее соответствие между модельными расчетами и натурными данными, особенно по малым (Совдозеро, Торбино, Охват) и средним (Ондозеро, Кимасозеро) озерам.

#### Глава 4. Пространственно-временная изменчивость среднегодовой температуры воды глубоководных озер

Глава посвящена стохастическому моделированию годового хода вертикальной термической структуры глубоководных озер. Для Онежского озера проанализирована пространственная и временная изменчивость вертикальной термической структуры за период открытой воды.

Для озер Инари и Каллавеси подробно рассматривается проверка модели на устойчивость и адекватность, а также проанализировано поведение эмпирических параметров модели в зависимости от глубины. Выбор этих озер связан с наличием для них подробных данных по вертикальной термической структуре - до глубины 20 метров через один метр, а глубже - через два метра до глубины 44-46 м. Наблюдения проводились регулярно один раз в декаду в течение 1981-2001 гг. Среднегодовой ход температуры воды в Инари и Каллавеси существенно различается, что связано с географическим положением и морфометрическими особенностями: оз. Инари - более крупный и глубокий водоем, расположенный севернее на  $6^\circ$  с.ш. (Korhonen J., 2002).

Для вычисления среднегодового хода температуры воды на различных горизонтах использовалась формула (2). Эмпирические параметры модели для каждого конкретного горизонта подбирались итерационным квази-ньютоновским методом. На рис. 6 представлены модельные кривые для нескольких горизонтов. Модель описывает зимнюю стратификацию, переход температуры воды через  $4^\circ\text{C}$ , весенний рост и осеннее понижение температуры. Модельные кривые позволяют определить на различных горизонтах среднегодовые даты начала весеннего нагревания, осеннего охлаждения, прохождения весеннего и осеннего термобара, даты наступления осенней гомотермии, максимальной температуры, продолжительность зимней и летней стратификации.

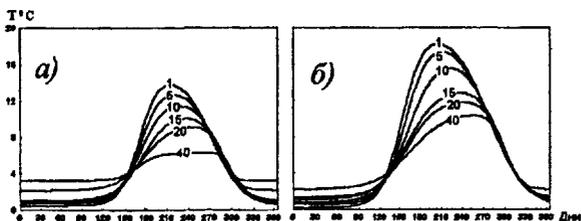


Рис. 6. Средняя многолетняя температура воды на горизонтах 1, 5, 10, 15, 20, 40 м а) оз. Инари; б) оз. Каллавеси.

Для обоих озер проанализированы значения эмпирических параметров модели, отмечено, что они в основном плавно изменяются по глубине. Так как

расчеты по горизонтам выполнялись по независимым выборкам, это может свидетельствовать об устойчивости применяемой модели. Числовые значения  $b_0$  практически соответствуют зимнему профилю температуры. Вертикальное распределение параметра  $b_1$  по форме очень похоже на летний профиль температуры, но числовые его значения существенно меньше. Параметры  $b_0$  и  $b_1$  характеризуют диапазон изменения температуры воды на различных горизонтах от минимальных значений зимой до максимальных в период летнего прогрева. Параметры  $b_2 - b_5$  определяют формы аппроксимирующих кривых, т.е. острую или пологую вершину и асимметрию ветвей функции. В работе анализируется распределение по глубине каждого из параметров.

Стандартные отклонения вычислялись для каждой декадной группы наблюдений по всем горизонтам для обоих озер. Коэффициенты корреляции при аппроксимации годового хода для всех горизонтов больше 0,99. Коэффициенты детерминации, также близки к единице и свидетельствуют о хорошем приближении модельных кривых к наблюдаемым данным и о качестве построения модели.

Во втором разделе четвертой главы основное внимание уделено сезонной пространственной изменчивости вертикальной термической структуры Онежского озера.

Пространственная неоднородность полей температуры по акватории озера в значительной степени может быть охарактеризована температурой приповерхностного слоя, поэтому на первом этапе основное внимание было уделено определению сезонного хода среднесезонной температуры поверхности воды (ТПВ). Для характеристики этого показателя использовались данные ИК-съемок за 1972-1984 г. В зависимости от условий теплонакопления и теплоотдачи в озере было выделено шесть районов (Ефремова, 1990).

С учетом районирования по ТПВ для характеристики среднесезонного вертикального термического режима Онежского озера были выбраны 14 наиболее репрезентативных рейдовых вертикалей. Исходными материалами послужили данные измерений за период с 1958 по 1989 г. Измерения проводились в навигационный период на рейдовых вертикалях с борта судна на постоянной сетке станций на стандартных горизонтах (0, 1; 2; 5; 10; 15; 20; 30; 50 м; дно) с дискретностью 10-30 дней.

Для вычисления среднесезонного хода температуры воды на различных горизонтах использовалась непрерывная временная параметрическая функция (2), которая была впервые получена и применена для характеристики термического цикла Онежского озера (Ефремова, Петров, 1992; 2000). Данная аппроксимирующая функция позволяет получить ежедневные средние значения температуры воды на стандартных горизонтах в различных районах Онежского озера. По полученным модельным кривым построены карты-схемы распределения температуры воды на стандартных горизонтах на 1-ое число каждого месяца с июня

по ноябрь. Основное достоинство этих карт заключается в возможности наглядно проследить изменчивость поля температуры в различных районах Онежского озера на разных глубинах для "типичного" года.

Разрушение льда в Онежском озере обычно начинается в первых числах мая. Переход температуры воды через  $4^{\circ}\text{C}$  сопровождается формированием термического бара. По мере нагревания воды фронт термобара постепенно перемещается в область больших глубин. 1 июня изотерма  $4^{\circ}\text{C}$  оконтуривает озеро и располагается над глубинами 20-25 м. ТПВ в это время характеризуется наибольшей пространственной неоднородностью.

Термический бар в Онежском озере по среднегодовым данным исчезает в третьей декаде июня. В центральной глубоководной части озера средняя скорость повышения температуры воды в это время в поверхностном слое 0-5 м возрастает в 3,5-4 раза и составляет приблизительно  $0,35-0,40^{\circ}\text{C}$  в сутки. На горизонте 20 м она близка весеннему значению - около  $0,1^{\circ}\text{C}$  в сутки, а на глубинах более 40 м составляет менее  $0,03^{\circ}\text{C}$  в сутки. На прибрежных станциях во второй половине июня, когда в центре озера еще только происходит переход температуры воды через  $4^{\circ}\text{C}$ , скорости роста температуры уже уменьшаются до  $0,15-0,25^{\circ}\text{C}$  в сутки.

1 июля минимальная температура в приповерхностном слое наблюдается в центральной части озера —  $9^{\circ}\text{C}$ , максимальная - в заливах и губах ( $15^{\circ}\text{C}$  в Заонежском заливе). В это время сезонный слой скачка в глубоководной части озера располагается на глубине 5-10 м. Температура воды в нем изменяется от  $8,5$  до  $5,5^{\circ}\text{C}$ .

В июле отмечается постепенное выравнивание температуры поверхности воды по всей акватории озера. В это время происходит переход температуры воды в поверхностном слое через  $10^{\circ}\text{C}$  на всей акватории озера, наступает "биологическое лето". Несмотря на более северное положение, в первую очередь "биологическое лето" наступает в мелководном Заонежском заливе (в первых числах июня). Запаздывание наступления "биологического лета" для центральной глубоководной части озера составляет в среднем 30 дней, а, например, для Ладожского озера - 50 дней (Науменко, Каретников, 2002). Продолжительность "биологического лета" для приповерхностного слоя воды варьирует от 118 суток в Заонежском заливе до 83 суток в центральной глубоководной части озера, верхнего 10 метрового слоя - от 105 суток в Заонежском заливе до 67 в глубоководном Большом Онего.

Конец июля - начало августа характеризуются наибольшим прогревом верхнего 5-метрового слоя воды. Средняя температура поверхности воды достигает своих максимальных значений -  $16-17^{\circ}\text{C}$ , а ее распределение по акватории становится довольно однородным. К 1 августа сезонный термоклин опускается на глубину 15-25 м в зависимости от района озера. На горизонте

50 м температура воды в центральном плесе составляет приблизительно  $4,5^{\circ}\text{C}$ , а в губах -  $5,5^{\circ}\text{C}$ .

Следует отметить, что продолжительность процесса нагревания и охлаждения верхнего слоя воды (до 15 м) для прибрежных районов приблизительно одинакова. Так, например, в Петрозаводской губе продолжительность нагревания от  $4^{\circ}\text{C}$  до максимума составляет 90 суток, а охлаждения до  $4^{\circ}\text{C}$  - 95 суток; в центральной части озера процесс нагревания поверхностных слоев происходит приблизительно в 1,5 раза быстрее, чем охлаждение. В слое воды глубже 15 м, ниже залегания сезонного термоклина, процесс нагревания длится в 2-2,5 раза дольше, чем охлаждение.

В первой декаде августа начинается период осеннего охлаждения. Температура квазиоднородного слоя воды уменьшается в среднем на  $0,10-0,13^{\circ}\text{C}$  в сутки. Скорость заглубления перемешанного слоя с августа по октябрь постепенно возрастает с  $0,3$  до  $3,0$  м-сут<sup>-1</sup>. Толщина квазиоднородного слоя с температурой  $13^{\circ}\text{C}$  на 1 сентября составляет 10 м. К 1 октября этот слой увеличивается до 20 м, а температура воды уменьшается до  $9,5^{\circ}\text{C}$ . В южной части центрального плеса 1 октября на глубинах 20-30 м по-прежнему отмечаются более низкие температуры.

К концу октября в озере устанавливается гомотермия с температурой  $6-8^{\circ}\text{C}$ . Охлаждение озера происходит с постепенным понижением температуры во всей толще вод, приблизительно со скоростью  $0,1^{\circ}\text{C}$ -сут<sup>-1</sup>. В двадцатых числах октября на горизонте 80 м наблюдается максимальная температура воды -  $6,6^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, запаздывание наступления максимума температуры на нижних горизонтах по сравнению с верхним слоем в Онежском озере достигает трех месяцев. 1 ноября в центральном плесе наблюдается гомотермия с температурой выше  $6^{\circ}\text{C}$ . В прибрежных районах, с глубиной до 20 м температура воды, как правило, ниже  $5^{\circ}\text{C}$ . У берега вода в это время охлаждается до температуры максимальной плотности  $4^{\circ}\text{C}$ , и возникает осенний термический бар.

В заливах и губах термобар обычно проходит в первой половине ноября, в центральном плесе в районах с глубиной до 30 м - в середине ноября, 50 м - приблизительно 20 ноября. Исчезает термобар 22-25 ноября. 1 декабря в прибрежных районах температура воды составляет  $1,9-2,2^{\circ}\text{C}$ , а в центральном плесе - более  $3^{\circ}\text{C}$ .

Разработанная методика позволила впервые оценить пространственное и вертикальное распределение среднесезонной температуры воды Онежского озера на любую дату. Полученные многолетние характеристики отражают многообразие температурных условий в крупном глубоководном озере и позволяют выявить особенности формирования температурного режима в разных частях его акватории, количественно оценить интенсивность нагревания и охлаждения отдельных слоев,

определить *сроки*, их максимального прогревания. Нивелируя межгодовую и синоптическую изменчивость, среднемноголетняя температура воды полезна для понимания процесса формирования термической структуры озера, а также для моделирования "типичного" года.

В третьем разделе оценивается зависимость температуры воды на различных глубинах от температуры воздуха (на примере Петрозаводской губы Онежского озера).

В стохастических моделях температура воды в озерах наилучшим образом связана с температурой воздуха (Robertson, Ragotzkie, 1990; Hongzo, Stefan, 1993). Среднемесячные ее значения достаточно хорошо воспроизводятся моделями глобального изменения климата в отличие от других метеорологических элементов. Поэтому в работе рассмотрена зависимость температуры воды на различных горизонтах от температуры воздуха (одной из основных характеристик климата) на примере Петрозаводской губы Онежского озера (Ефремова, Палынин, 2004).

Для этого использовались характерные для разных типов лет среднемноголетние кривые годового хода температуры воды на различных горизонтах (по данным в центральной части губы) и соответствующие им значения температуры воздуха по метеостанции Петрозаводск за этот период. Выборка лет с разнообразными периодами (жаркими, теплыми, средними, прохладными, холодными) для года в целом, весны, лета и осени осуществлялась по температуре воздуха. Таким образом, удалось получить 20 осредненных наиболее характерных годовых циклов по температуре воздуха и воды на различных горизонтах.

Для разных характерных типов лет получены результаты моделирования годовых циклов температуры воздуха и воды с использованием единого уравнения (2). Стандартные отклонения между наблюдаемыми значениями температуры воздуха и полученными в результате расчетов по модели составляют около  $0,3^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 7 показан совмещенный график модельных кривых по температуре воздуха и воды на различных горизонтах для среднего года, полученных с использованием осредненных данных за весь период наблюдений. Были исследованы зависимости эмпирических параметров модели  $b_0 - b_5$  от аналогичных параметров для температуры воздуха. Установленные эмпирические зависимости позволяют рассчитывать температуру воды в Петрозаводской губе при наличии данных по годовому ходу температуры воздуха, что очень важно, например, при прогнозировании сезонных изменений вертикальной термической структуры воды в губе при различных сценариях изменения регионального климата, или при восстановлении отсутствующих данных. Установлено, что отклонения температуры воздуха в

период максимального прогрева на 3-4°C приводят к близким изменениям температуры воды в верхнем квазиоднородном слое (до 5 м), однако, в слое скачка и гипolimнионе зависимость температуры воды от температуры воздуха существенно уменьшается, но прослеживается связь в сроках и скоростях изменения температур воздуха и воды при весеннем нагревании и осеннем охлаждении.

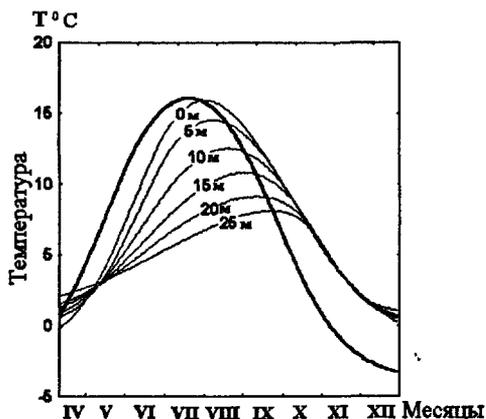


Рис. 7. Совмещенный график модельных кривых для температуры воздуха (жирная линия) и температуры воды на различных горизонтах.

Основные выводы, полученные в результате выполненных исследований, сводятся к следующему.

1. В результате обобщения многолетних данных инструментальных наблюдений за температурой воды озер Северо-Запада России и Финляндии установлено, что среднемноголетняя температура верхнего пятиметрового слоя определяется преимущественно географической широтой, а в слое скачка и гипolimнионе наибольшее влияние на нее оказывают морфометрические характеристики водных объектов. В годовом цикле температуры поверхности озер влияние географической широты отражается, прежде всего, на процессах их нагревания и на значениях температуры воды в период максимального прогрева, а скорости выхолаживания водоемов связаны преимущественно с их глубиной и площадью.

2. Показано, что для возникновения устойчивой термической стратификации в озерах должно существовать определенное сочетание геометрических размеров водоемов. Для данного региона получены количественные выражения для границ между эпи-, мета- и гипотермическими типами озер в зависимости от их площади и максимальной глубины.

3. Для описания среднемноголетних ежедневных значений температуры воды на различных горизонтах предложена 6-параметрическая аппроксимирующая

функция. Для реконструкции термического состояния малоизученных или вновь создаваемых водных объектов разработана стохастическая модель, которая позволяет оперативно рассчитывать годовой ход температуры поверхности воды и вертикальную термическую структуру в период максимального прогрева для любого водоема в регионе на основе доступной географической информации (широта, высота над уровнем моря, геометрические размеры, коэффициент условного водообмена).

4. Впервые получены среднесезонные пространственные распределения полей температуры воды в Онежском озере на любую дату для периода открытой воды. Они позволили выявить характерные особенности в формировании температурного режима в различных районах озера на разных горизонтах, количественно оценить интенсивность нагревания и охлаждения отдельных слоев, определить сроки максимального прогревания различных горизонтов, время прохождения термобара, сроки наступления «биологического лета».

5. На примере Петрозаводской губы Онежского озера установлены эмпирические зависимости между годовым ходом температуры воздуха и температуры воды в губе на различных горизонтах, что позволяет прогнозировать сезонные изменения вертикальной термической структуры губы при различных сценариях изменения регионального климата.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Физико-географическая характеристика озера. Экосистема Онежского озера. Л.: Наука, 1990. С. 5-11.
2. Температура поверхности воды по данным ИК-съемок. Экосистема Онежского озера. Л.: Наука, 1990. С. 37-46.
3. Моделирование термического режима глубоководной зоны Большой губы Повенецкого залива. // Повенецкий залив Онежского озера. Петрозаводск, 1992. С. 12-18. (соавтор М. П. Петров).
4. Термика и динамика вод озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. С. 22-48 (соавторы П. М. Бояринов, Н. И. Пальшин, М. П. Петров, Н. К. Филатов).
5. Характеристики термического режима Онежского озера. // Ладожское озеро. Петрозаводск, 2000. С. 330-335 (соавтор М. П. Петров).
6. Географические закономерности термического режима озер. // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения. Архангельск, 2002. С. 366—371. (Материалы международной конференции; Т. 1) (соавтор Н. И. Пальшин).
7. Формирование вертикальной термической структуры озер Северо-Запада России и Финляндии. // Вод. ресурсы. 2003, том 30, № 6. С. 696-706 (соавтор Н. И. Пальшин).
8. Стохастическая модель вертикальной термической структуры Петрозаводской губы Онежского озера. Труды VI конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М., 2004. С. 140-143 (соавтор Н. И. Пальшин).
9. Effect of morphometry and climate on the thermal regime of large lakes. Proceedings of the Fourth International Lake Ladoga Symposium 2002. Joensuu. 2003. P. 26-30 (соавтор Н. И. Пальшин).
10. Characteristic of thermal regime in lake Onego. Proceedings of the third international lake Ladoga symposium. 2000. P. 202-205 (соавтор М. П. Петров).
11. Annual cycle of the surface temperature in large lakes. Proceedings of the Fourth International Lake Ladoga Symposium 2002. Joensuu. 2003. P. 96-101 (соавтор Н. И. Пальшин).

Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99. Подписано в печать 15.03.05. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Печать офсетная.

Уч.-изд. л. 1,3. Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Изд. № 13. Заказ № 480

Карельский научный центр РАН  
185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50  
Редакционно-издательский отдел





22 АПР 2005



6