

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ.М.В.ЛОМОНОСОВА  
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

---

*На правах рукописи*  
*УДК 556.555.4*

**ПАЛЬШИН Николай Иннокентьевич**

**ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ВОДОЕМОВ КАРЕЛИИ  
В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА**

11.00.07 - гидрология суши, водные ресурсы,  
гидрохимия

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

МОСКВА 1991

142790K

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова

Научный руководитель - доктор географических наук,  
профессор К.К.ЭДЕЛЬШТЕЙН

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
ст.н.с. Ф.Г.МАЙРАНОВСКИЙ

- кандидат географических наук,  
ст.н.с. З.В.ВОЛКОВА

Ведущая организация - Петрозаводский государственный университет

Защита состоится " 21 " ноября ..... 1991 г.  
в 17 часов на заседании специализированного гидрометеорологического совета Д 0.53.05.30 при Московском государственном университете им.М.В.Ломоносова по адресу: 119899, г.Москва, ГСП-3, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, 18-й этаж, ауд.1801.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке географического факультета МГУ на 21 этаже.

Автореферат разослан " 21 " октября ..... 1991 г.

142790K

Ученый секретарь специализированного гидрометеорологического совета при МГУ, кандидат географических наук

С.Ф.Алексеева

*Алексеева*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования гидрологической структуры водоемов суши как совокупности генетически и качественно различных водных масс, начатые в 20-е годы на Байкале Г.Ю. Верещагиным, успешно развиваются в настоящее время. Они позволяют познать природу и условия формирования гидрологического режима водоемов, изучать динамику водных масс. Различные по составу и свойствам водные массы выделены в Онежском, Ладожском и Великих американских озерах. С 60-х годов широко развернулись исследования структуры вод в водохранилищах преимущественно Советского Союза. В последние годы для изучения гидрологических процессов в водоемах суши успешно внедряются дистанционные методы исследований пространственных неоднородностей гидрофизических полей.

Помимо научной значимости исследования гидрологической структуры водоемов имеют большое практическое значение для решения народнохозяйственных задач, связанных с рациональным использованием и охраной водных ресурсов от загрязнения и истощения. В условиях возрастающего антропогенного воздействия на водоемы и их водосборы все более актуальными становятся вопросы прогнозирования его последствий. При этом одной из важных и недостаточно изученных проблем лимнологии следует считать оценку влияния термохалинных эффектов на развитие гидрофизических процессов и формирование гидрологических структур в пресных озерах и водохранилищах зимой, когда они покрыты льдом, замедлены биохимические превращения органических веществ в холодной воде и минимальна самоочищающая способность водоемов.

Цель и задачи исследования. Цель работы - исследование закономерностей формирования гидрологических структур водоемов Карелии в период ледостава. Основными задачами при этом были:

- 1) усовершенствовать полевые методы исследования и выделения элементов макро- мезо- и микроструктуры водной толщи в водоемах с низкой минерализацией воды;
- 2) разработать метод расчета плотности пресной воды с учетом ее химического состава и оценить влияние этого фактора во внутриводоемных термодинамических процессах;
- 3) изучить влияние морфометрических особенностей и про-

точности водоемов на формирование их зимних гидрологических структур;

4) оценить роль образования и нарастания льда, а также тепло- и массообмена на границе вода-дно в процессах трансформации водных масс;

5) установить характер распространения речных вод в период ледостава и влияние сейш на формирование гидрологической структуры озер и водохранилищ;

6) оценить водообмен и динамику вод в заливах крупных водоемов;

7) выяснить особенности смешения промышленных стоков с озерными водными массами и распространения загрязненных вод в ледоставный период;

8) разработать относительно простой метод расчета разбавления и распространения загрязненных вод для <sup>этого</sup> периода в водоемах со сложной формой дна;

9) изучить процессы весеннего подледного перемешивания в водоемах как фактор разрушения их зимней гидрологической структуры.

Метод исследования и фактический материал. В основу работы положены результаты наблюдений, выполненных лично автором или при его непосредственном участии на 27 разнотипных водоемах Карелии в периоды ледостава с 1980 по 1990 гг. Основной материал получен путем маршрутных съемок гидрофизических и гидрохимических характеристик по разрезам или отдельным станциям. Вертикальные зондирования температуры и электропроводности воды выполнялись тонкоструктурным профилографом, разработанным в Отделе водных проблем Карельского научного центра АН СССР в 1982 г. Для оценки изменений в период ледостава гидрологической структуры водоемов проводились повторные съемки и серии многократно вертикального зондирования температуры и электропроводности воды в отдельных точках. Наблюдения за течениями велись с помощью вертушки ГР-42 и автономного норвежского самописца фирмы „Aanderaa“ РСМ-4. На некоторых озерах под лед устанавливались норвежские автономные термоксы TR-1.

При анализе и обобщении материалов использовались принятые в океанологии методы выделения водных масс и спектральный анализ. Плотность воды вычислялась по модифицированному автором уравнению состояния пресной воды. Расчеты выполнялись на персональных компьютерах.

Научная новизна работы. На основании исследований ультрапресных водоемов Карелии в период ледостава отмечено наличие в них различных гидрологических структур, которые формируются под влиянием внешних факторов и внутриводоемных процессов. Показано, что при изучении гидрологического режима даже ультрапресных водоемов зимой, весной и осенью (при температуре воды близкой к температуре наибольшей плотности) необходимо принимать во внимание явления, обусловленные плотностью воды, зависящей от температуры и содержания растворенных солей. Выявлено влияние морфометрических особенностей и проточности озер на формирование их гидрологических структур, в результате чего выделены группы водоемов с наиболее общими чертами гидрологического режима. Исследованы особенности распространения речных вод в озерах разного типа. Установлены эффекты уплотнения при смешении холодных речных с относительно теплыми и менее минерализованными озерными водами в предледоставный период. Эти эффекты могут приводить к дополнительному перемешиванию и выхолаживанию глубоких проточных озер. Показана роль сейш в формировании гидрологической структуры водоемов. Выполнена оценка градиентных течений и водообмена Петрозаводской губы с открытой частью Онежского озера. Определены условия разбавления, а также характер распространения загрязненных вод в различных водоемах в период ледостава. На основе установленных закономерностей разработан относительно простой метод расчета трансформации и переноса загрязненных вод. Для пресных водоемов показана важность учета выделения солей в воду при образовании льда, что при определенных условиях может приводить к возникновению конвективного перемешивания. Исследована роль процессов тепло- и массообмена на границе вода-дно в формировании гидрологической структуры неглубоких водоемов. Действуя совместно с разгрузкой в озеро глубинных грунтовых вод, они могут приводить к развитию свободного конвективного перемешивания (при температуре выше  $4^{\circ}\text{C}$ ) или к образованию температурных инверсий, устойчиво уравновешенных по плотности за счет увеличения концентрации солей и способных существовать длительный период времени (более месяца). В период ледостава во многих водоемах обнаружено наличие тонкоструктурных деталей, обусловленных динамикой вод. Исследованы процессы весеннего перемешивания, являющегося основой разрушения зимней гидрологической структуры

водоемов. Предложено уравнение состояния, характеризующее пресную воду как условно многокомпонентную систему, позволяющее с точностью до  $10^{-6}$  г/см<sup>3</sup> рассчитать плотность воды по ее температуре, ионному составу, общей минерализации или электропроводности.

Практическая значимость результатов и их реализация.

Результаты исследований гидрологических структур водоемов Карелии в период ледостава дают физическую основу для понимания ряда важнейших химических и биологических процессов, которые не могут рассматриваться в отрыве от гидрофизических явлений и динамики вод. Материалы этих исследований являются базой для построения экологических моделей разнотипных водоемов и могут быть использованы как для сравнения существующих, так и при разработке новых аналитических и численных моделей.

Полученные новые данные по процессам формирования гидрологических структур следует учитывать при обосновании природоохранных мероприятий, а также при оценке последствий антропогенного влияния на водоемы.

Результаты исследований обобщены в четырех научных отчетах по темам, разработанным по заданиям Президиума АН, Отделения ОФАНГ АН СССР, ГИИТ СССР и использованы:

- для оценки изменения режима Северного Выгозера и реки Нижний Выг под действием сточных вод Сегежского ЦБК при определении допустимого объема их сброса и места расположения проектируемого рассеивающего выпуска;

- при планировании расширения строительства на территории г. Сегежи с учетом природоохранных зон и мероприятий (разработка института "Карелгражданпроект");

- при выборе места размещения, совершенствовании схемы очистки и режима эксплуатации водозабора г. Петрозаводска в условиях сезонных изменений качества воды Петрозаводской губы Онежского озера;

- при оценке изменения качественного состава воды в оз. Исо-Пюхярви, являющегося источником питьевого и промышленного водоснабжения г. Суоярви;

- при оценке современного состояния и прогнозе экологических изменений в среднем течении р. Кемы в результате проектируемого строительства Белопорожской ГЭС с образованием долинного водохранилища;

- при оценке современного состояния оз. Панаярви (бас-

сейн р. Ковды) и прогнозе экологических последствий в результате предполагаемого его использования в качестве нижнего бассейна проектируемой ГАЭС.

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных исследований гидрологических структур и процессов их формирования в разнотипных водоемах Карелии в период ледостава;
- феноменологическое представление особенностей разбавления и распространения загрязненных вод в водоемах со сложной формой дна в период ледостава и метод их расчета;
- уравнение состояния пресных вод как условно многокомпонентной системы.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах лаборатории гидрологии Отдела водных проблем Карельского научного центра АН СССР (1983-1991), лаборатории охраны природы института "Карелгражданпроект" (Петрозаводск, 1987), кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ (1989, 1990), на рабочих совещаниях: в Управлении каскада Выгских ГЭС (Каменный Бор, 1987), в Сегежском райисполкоме (Сегежа, 1987), Сегежском ЦБК (Сегежа, 1988); на конференциях молодых ученых в Институте озероведения АН СССР (Ленинград, 1984, 1985), в Петрозаводском государственном университете (Петрозаводск, 1986); на VI Всесоюзном совещании лимнологов "Круговорот вещества и энергии в водоемах" (Лиственичное на Байкале, 1985); на Всесоюзной школе-семинаре "Повышение эффективности работы водозаборов из поверхностных и подземных источников" (Москва, 1985); на I Всесоюзной конференции молодых ученых "Актуальные проблемы современной лимнологии" (Ленинград, 1988); на симпозиуме по проблемам Белого моря (Ленинград, 1988); на Всесоюзных конференциях "Динамика и термика рек, водохранилищ и окраинных морей" (Москва, 1989), "Вихри и турбулентность в океане" (Светлогорск, 1990).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем работы: 143 машинописных страниц текста, 2 таблицы, 40 рисунков и список использованной литературы, включающий 157 наименований, в том числе 46 иностранных источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дается определение гидрологической структуры водоемов суши и рассматриваются основные факторы формирования их водных масс.

В океанах, морях, озерах и реках издавна известно о неоднородности распределения физических, химических и биологических характеристик воды. Однако понятия "структура вод океана" и "гидрологическая структура водоемов суши" введены в практику гидрологических исследований сравнительно недавно. Первое из них предложено в 1961 г. А.Д. Добровольским: - это пространственное расположение различных водных масс, типичное для данного района океана в данное время. Термин "водная масса" введен Гелланд-Гансеном (1912). Исследования водных масс Мирового океана позволили не только характеризовать структуру вод, ее особенности и свойства, но и выявить основные закономерности формирования, размещения и взаимодействия вод океана. Они открыли возможности широких географических обобщений при изучении океанологических проблем, а также способствовали изучению динамического, теплового и химического взаимодействия океана и атмосферы. Работы в данном направлении продолжают оставаться в центре внимания и в настоящее время (Мамаев, 1987).

В озерах и водохранилищах также наблюдается сложная структура вод. В них, как в океанах и морях, выделяются относительно однородные водные массы, между которыми имеются переходные зоны с резкими вертикальными или горизонтальными градиентами физических и химических показателей. Это дает основание для того, чтобы структуру вод любого водного объекта суши именовать его гидрологической структурой (Эдельштейн, Ершова, Пуклаков, 1989). Однако, учитывая специфические особенности водоемов суши, нельзя механически переносить существующие в океанологии определения "водной массы" и "структуры вод" в лимнологию. Во-первых, абсолютные размеры водных масс в водоемах суши существенно меньше, чем в океане, хотя они достаточно велики и соизмеримы с крупными частями этих водоемов; во-вторых, источники и процессы их формирования совершенно различны (Буторин, 1969). Водные массы континентальных водоемов образуются преимущественно на их водосборах, приобретая при этом соответствующие природным условиям физические и химические свойства. Понятие "водная масса" как в океанологии, так и в гидрологии суши в известной степени услов-

но, так как она постоянно находится в процессе трансформации.

Степень сложности гидрологической структуры водных объектов суши зависит от различных факторов, которые определяют формирование водных масс, а также режим водоемов в целом. Эти факторы подразделяются на два класса: внешние, зависящие главным образом от физико-географических особенностей водосбора водоема; и внутренние, определяющие его собственный режим. На формирование водных масс и гидрологическую структуру проточных водоемов значительное влияние оказывают внешние факторы, связанные с процессом притока речных вод, а в озерах с малой интенсивностью водообмена доминируют внутренние, обусловленные термодинамическими, химическими и биологическими процессами. В глубоких водоемах умеренных широт летом и зимой воды стратифицированы по температуре. Вертикальный градиент плотности препятствует перемешиванию водных масс. Весной и осенью в периоды интенсивного вертикального перемешивания в крупных озерах (Онежском, Ладожском, Великих американских озерах) наблюдается горизонтальное расчленение их вод термическим баром на отдельные области. Таким образом, термодинамические процессы в водоемах, четко различающиеся по сезонам, определяют их меняющиеся во времени гидрологические структуры.

Среди большого разнообразия водоемов Карелии (на ее территории насчитывается 61,2 тыс. озер, крупнейшие из которых превращены в водохранилища), относящихся к голомиктическому классу, имеются все типы выделенные в классификациях озер по проточности (Григорьев, 1958) и по термическому режиму (Тихомиров, 1982). На залесенных и заболоченных водосборах Карелии, сложенных преимущественно древнейшими кристаллическими породами и покрытыми четвертичными отложениями, формируются воды с очень низкой минерализацией (8-40 мг/л) и большим содержанием органических веществ. На большей части территории республики преобладают воды гидрокарбонатного класса. На побережье Белого моря наблюдается повышенное содержание хлоридов и лишь на некоторых озерно-речных бассейнах отмечается слабо выраженный сульфатный характер вод. Среди катионов преобладают ионы кальция. Цветность воды в реках изменяется от 40 до 480° (на водосборах с заболоченностью более 50%).

Во второй главе рассматривается методика экспериментальных гидрологических исследований, проводившихся на водоемах Ка-

релии в 1980–1990 гг., и дается краткая характеристика использовавшихся серийных отечественных и зарубежных гидрологических приборов, а также разработанного А.М. Глинским совместно с автором тонкоструктурного профилографа температуры и электропроводности воды. Основной объем гидрологической информации, представляемый в диссертационной работе, собран автором с помощью этого профилографа. Вертикальные зондирования выполняются с борта судна или лодки в режиме свободного падения зонда со скоростью около 0,5 м/с. Для получения горизонтальных профилей имеются приспособления для буксировки датчиков. Вертикальные зондирования зимой проводятся при помощи специальной лебедки. Разрешающая способность прибора по глубине – 5 см, по пройденному пути (горизонтальная) – 1 м. Получаемая информация выводится на двухканальный самописец с шириной диаграммной ленты 25 см и относительной погрешностью 0,3%. Движение ленты самописца, работающего в управляемом режиме, осуществляется сигналами, поступающими при вращении блока на лебедке или вертушек, установленных на свободно падающем зонде и приспособлениях для буксировки датчиков. В приборе используются малоинерционные микротермисторные датчики температуры типа МТ-57Ф. Датчики электропроводности представляют собой двухэлектродные ячейки коаксиального типа. Прибор позволяет проводить наблюдения за температурой: по обзорной шкале 0–25°C с чувствительностью – 0,1; на 5-градусных основных диапазонах с чувствительностью – 0,02° и на 1-градусных диапазонах для изучения элементов тонкой термической структуры вод с разрешением – 0,004°. Электропроводность измеряется по логарифмическим шкалам: 10–50, 10–1000 мкСм/см с относительной погрешностью 0,5% от измеряемой величины. Питание прибора осуществляется постоянным током I2ВхЗА. Автономность – 8 часов непрерывной работы от одного блока аккумуляторов типа КН-18. Автономное питание, малый вес и небольшие размеры прибора позволяют проводить измерения в период навигации с моторной лодки и со снегохода "Буря" зимой.

В этой же главе рассматривается модифицированное автором уравнение состояния пресной природной воды как условно многокомпонентной системы. За основу принято уравнение состояния, предложенное Ч.-Т.Ченом и Ф. Миллеро (1977), действительное в диапазонах температуры 0–30°C, солёности 0–0,6‰, давления 0–180 бар:

$$d^P = d^0 / (1 - P/K); \quad (1)$$

$$d^0 (\text{г/см}^3) = 0,9998395 + 6,7914 \cdot 10^{-5} T - 9,0894 \cdot 10^{-6} T^2 + \\ + 1,0171 \cdot 10^{-7} T^3 - 1,2846 \cdot 10^{-9} T^4 + 1,1592 \cdot 10^{-11} T^5 - \\ - 5,0125 \cdot 10^{-14} T^6 + (8,221 \cdot 10^{-4} - 3,87 \cdot 10^{-6} T + \\ + 4,99 \cdot 10^{-8} T^2) \cdot s; \quad (2)$$

$$K = 19652,17 + 148,376 T - 2,329 T^2 + 1,3963 \cdot 10^{-2} T^3 - \\ - 5,90 \cdot 10^{-5} T^4 + (3,2918 - 1,719 \cdot 10^{-3} T + 1,684 \cdot 10^{-4} T^2) P + \\ + (-0,8985 + 2,428 \cdot 10^{-2} T + 1,114 \cdot 10^{-2} P) \cdot s \quad (3)$$

где  $d^P$  и  $d^0$  - плотность воды ( $\text{г/см}^3$ ) при давлении, соответственно,  $P$  и  $0$  (приведенному к уровню моря);  $P$  - давление и  $K$  - объемный модуль упругости в барах;  $T$  - температура воды в  $^{\circ}\text{C}$ ;  $s$  - соленость в  $\text{‰}$ :

$$s = 0,9951437 g_T \quad (4)$$

где  $g_T$  - общее количество растворенных солей в граммах в  $1$  кг озерной воды. В этом уравнении озерная вода по аналогии с морской рассматривается как двухкомпонентная система. Однако пресные воды суши в отличие от морских имеют непостоянное соотношение главных ионов, что приводит к погрешностям расчетов плотности по этому уравнению состояния. О необходимости введения поправки на изменение ионного состава в уравнение указывали Ч.-Т. Чен и Ф. Миллеро (1977).

Зависимости условной плотности растворов от концентрации для основных солей, входящих в состав природных вод, при постоянных температуре и давлении являются почти линейными функциями. Учитывая это и используя принцип аддитивности, справедливый для слабых растворов, предлагаем уравнение (4) представить в виде:

$$s = g_T \cdot \sum_i b_i \cdot x_i \quad (5)$$

где  $x_i$  - массовая доля  $i$ -того компонента солевого состава воды,  $b_i$  - постоянные коэффициенты для различных ионов:

$b_{\text{Cl}^-} = 0,870$ ;  $b_{\text{Na}^+} = 0,967$ ;  $b_{\text{Mg}^{2+}} = 1,141$ ;  $b_{\text{Ca}^{2+}} = 1,152$ ;  $b_{\text{NO}_3^-} = 0,916$ ;  $b_{\text{CO}_3^{2-}} = 0,967$ ;  $b_{\text{HCO}_3^-} = 0,993$ ;  $b_{\text{SO}_4^{2-}} = 1,238$ . Это позволит рассматривать озерную воду как условно многокомпонентную систему.

Коэффициенты  $b_i$  получены на основе справочных данных по рас-

творам отдельных солей.

Так как все соли-электролиты, а электропроводность воды сравнительно легко определяется *in situ*, то на основе справочных данных о предельной эквивалентной электропроводности ионов и закона аддитивности для слабых растворов электролитов возможно вычисление плотности озерной воды по значению ее электропроводности и известному соотношению главных ионов. Тогда, уравнение (4) заменяется соответствующим ему

$$s = 1,0442 \cdot 10^{-3} \kappa_{18} \sum_i c_i \cdot \psi_i, \quad (6)$$

где  $\kappa_{18}$  - удельная электропроводность озерной воды (мксм/см), приведенная к температуре 18°C;  $\psi_i$  - г-экв-ная доля  $i$ -того компонента (от общей суммы анионов и катионов);  $c_i$  - постоянные коэффициенты для ионов:  $C_{Ca^{2+}} = 1$ ;  $C_{Mg^{2+}} = 0,93$ ;  $C_{Na^+} = 0,98$ ;  $C_{K^+} = 0,89$ ;  $C_{HCO_3^-} = 1$ ;  $C_{SO_4^{2-}} = 0,77$ ;  $C_{Cl^-} = 0,52$ .

В озера и водохранилища с речным стоком и промышленными сточными водами поступает большое количество взвешенных веществ, которые действуют на плотность за счет собственного веса, практически не изменяя молекулярной структуры самой воды. Уравнение состояния с учетом их влияния принимает следующий общий вид:

$$d_w = (1 - m/\lambda_m) \cdot d^p + m, \quad (7)$$

где  $m$  - концентрация взвешенных веществ (г/см<sup>3</sup>),  $\lambda_m$  - плотность взвешенных веществ (г/см<sup>3</sup>).

Глава III посвящена анализу результатов экспериментальных исследований процессов формирования гидрологических структур водоемов (ГСВ) в зимний период. К анализу привлечены материалы собственных многолетних исследований на озерах и водохранилищах Карелии, а также работы отечественных и зарубежных авторов, изучающих различные стороны формирования гидрологического режима пресноводных объектов суши. В период ледостава ГСВ отличаются большим разнообразием. Их эволюция связана с протеканием гидрофизических и гидрохимических процессов, которые под воздействием внешних и внутриводоемных факторов развиваются неодинаково в разных озерах и водохранилищах.

Основными факторами, определяющими ГСВ, являются морфологические особенности водоемов и проточность. Как показали проведенные исследования, в очень проточных водоемах таких, как

озера среднего течения р. Кеми: Хаапаярви, Оляярви, Дшкозеро и водохранилища на р. Н. Выг: Ондское, Парандовское, Маткожненское, водные массы квазигомогенны по температуре и химическому составу. В водоемах со средним периодом условного водообмена от 2-3 месяцев до 1-2 лет (Выгозерское водохранилище, озера: Панаярви, Суоярви, Исо-Пухаярви и др.) на относительно больших частях акваторий формируются поля с неоднородным распределением в пространстве физических и химических характеристик. В крупных слабо проточных озерах (Онежское) распространение трансформированных речных вод ограничивается локальными районами или слоями.

Термические структуры глубоких озер (Онежское, Панаярви и др.) в период ледостава почти полностью определяются теплозапасом, сохранившимся в водной толще к моменту установления льда. Их горизонтальные размеры определяют в предледоставный период глубину ветрового перемешивания, степень выхолаживания водных масс и время установления ледостава. В мелких водоемах (озера: Вендорское, Риндозеро, Урос, Суоярви и др.) осенью почти полностью теряется тепло в водной толще, но при этом частично сохраняется в донных отложениях из-за их относительно низкой теплопроводности по сравнению с водой, которое в начале зимы отдается воде. Оно приводит к нагреванию воды, соприкасающейся с поверхностью дна, и развитию плотностной циркуляции в озере с образованием обратной термической стратификации. Теплообменные процессы на границе вода-дно и разгрузка грунтовых вод нередко сопровождаются образованием температурных инверсий, устойчиво уравновешенных по плотности за счет увеличения минерализации придонной воды. Такие температурные инверсии способны существовать длительный период времени (более месяца), наблюдались на многих малых и даже средних по площади зеркала озерах (Суоярви, Вендорское, Урос, Риндозеро, Куроярви, Роппомо и др.). В некоторых малых озерах (Голубая ламба, Урос) при нагревании придонных слоев воды более 4°C возникает гравитационная неустойчивость и перемешивание глубинных вод с образованием конвективных ячеек с вертикальными масштабами до 1-2 м и горизонтальными до нескольких десятков метров.

Ледостав на водоемах Карелии, за исключением крупных глубоких озер, устанавливается обычно в ноябре и длится 170-200 суток до середины мая. В первую очередь покрываются льдом са-

мне малые неглубокие озера из-за небольшого теплозапаса их водных масс. Предледоставный период на Ладожском и Онежском озерах растянут во времени. На Онежском озере от начала появления льда до его полного замерзания проходит 35–40 суток с колебаниями от 25 до 80. Полный ледостав на нем наступает в среднем 18 января. Ладожское озеро один раз в течение 4–5 лет покрывается льдом лишь частично, охватывая прибрежную мелководную часть. В некоторые исключительные годы сплошного ледостава не бывает и на Онежском озере. В теплые зимы, когда значительные площади крупных озер остаются открытыми продолжительное время, их водные массы выхолаживаются больше, чем в холодные при раннем ледоставе. Водные массы имеют слабую термическую стратификацию с вертикальными градиентами  $0,01-0,03^{\circ}/\text{м}$  и квази-однородны по химическому составу.

В приточных заливах этих озер гидрологические структуры более разнообразны. Важные сведения для понимания динамики вод и формирования гидрологической структуры получены в Петрозаводской губе Онежского озера. В узком Соломенском проливе, соединяющем Петрозаводскую губу с оз. Логмозером, наблюдались флуктуации скоростей течения от 0 до 37 см/с. Они связаны с эффектом наложения на постоянно направленное стоковое течение р. Шуи сейшевых колебаний Онежского озера, Логмозера и собственно Петрозаводской губы. За период наблюдений с 9 по 16 февраля 1987 г. отмечено 18 случаев поворота направления течения на противоположное с продолжительностью от 15 минут до 1 часа. Максимальная скорость противотечения достигала 8 см/с. Наибольший вклад в изменчивость течений вносит одноузловая баротропная сейша основной котловины Онежского озера с периодом 4 часа 20 мин. Большие скорости течения и их пульсирующий характер способствовал интенсивному перемешиванию речных и озерных вод. Стоковое течение инструментально прослеживалось (Лифшиц, Титов, Бояринов, 1981) лишь вблизи Соломенского пролива на расстоянии до 2 км, распространявшееся на средних горизонтах узким потоком около 300 м, отклоняясь под действием силы Кориолиса к правому берегу и поворачивая вместе с ним на юг.

О дальнейшем распространении речных вод можно судить лишь по распределению консервативных показателей, например, электропроводности воды. Сформированная в результате смешения шуйская водная масса распространялась вдоль всей губы преимущественно

на средних горизонтах, прижимаясь к юго-западному берегу. Вторая ветвь потока меньших размеров отклонялась влево. Скорости течения в губе на два порядка меньше, чем в Соломенском проливе. Из-за малых скоростей течения водные массы в губе слабо трансформировались. В результате формировалась четырехслойная структура вод. В слое под шуйскими водами располагались остатки осенних вод губы. В поверхностном слое отмечалось поступление свежих вод из Снежского озера. Непосредственно у самого дна наблюдался слой с большими градиентами температуры и электропроводности из-за обменных процессов с донными отложениями и разгрузки подземных вод гдовского горизонта.

Оз. Панаярви относится к глубоким проточным озерам каньонного типа, длиной - 24 км, шириной около - 1 км, максимальной глубиной - 128 м, с коэффициентом условного водообмена 2,6 ( $\text{год}^{-1}$ ). В период ледостава 1987 г. речные воды распространялись в нем в поверхностном слое до 8 м. Нижние слои были представлены квазиоднородными водами, сформированными в осенний период с температурой 2,5-3,7°C. Из-за значительного градиента плотности в слое скачка температуры эти две водные массы почти не перемешивались. Показано, что в проточных озерах каньонного типа при формировании гидрологической структуры в предледоставный период имеет место эффект уплотнения при смешении вод. Он возникает при перемешивании холодных речных и относительно теплых (осенью) менее минерализованных озерных вод из-за нелинейного изменения плотности воды от температуры и почти линейного от концентрации солей. Это явление, действуя одновременно с ветровым перемешиванием и внутренними волнами, может приводить к более глубокому перемешиванию и дополнительному выхолаживанию озер.

Неглубокие водоемы крупных и средних размеров из-за обычной их расчлененности на относительно обособленные районы с разными морфологическими особенностями и проточностью имеют отличающиеся гидрологические структуры в различных своих частях. Речные воды в них распространяются в соответствии с плотностью, приобретенной в устьевых областях в результате смешения с озерной водой, в приповерхностном слое или на средних горизонтах, но могут охватывать и почти всю водную толщу в мелких водоемах.

На примере Выгозерского водохранилища показано, что выделение солей в воду при образовании и нарастании льда даже в ультрапресных водоемах приводит к возникновению гравитационной

неустойчивости в подледном слое воды и развитию конвективного перемешивания, если в предледоставный период на водоеме сформировался квазиоднородный поверхностный слой с температурой около  $0^{\circ}\text{C}$ . В мелких водоемах (оз. Суоярви и многие малые озера) большой градиент температуры воды, возникающий под нижней кромкой льда, препятствует этому процессу, а соли накапливаются в тонком подледном слое.

На ГСВ большое влияние оказывает распространение загрязненных вод промышленных предприятий. Так, сточные воды Сегежского ЦБК после биологической очистки поступают в Выгозеро с температурой от  $10$  до  $25^{\circ}\text{C}$ . Зимой в месте их выпуска образуется полынья радиусом  $50-100$  м. У кромки льда формируется фронтальный раздел вод, где происходит интенсивное разбавление промстоков холодными озерными водами (рис. 1). При разбавлении происходит уплотнение вод до наибольшей плотности, опускание ко дну разбавленных загрязненных вод и распространение их по уклону дна в виде придонного плотностного стратифицированного потока. Инструментальные измерения скорости и направления этого течения свидетельствуют о пульсирующем характере струи. На своем пути загрязненные воды последовательно заполняют все котловины дна, в которых скорость течения резко уменьшается, а воды расслаиваются в соответствии с их плотностью. Перемешиванию водных масс в котло-

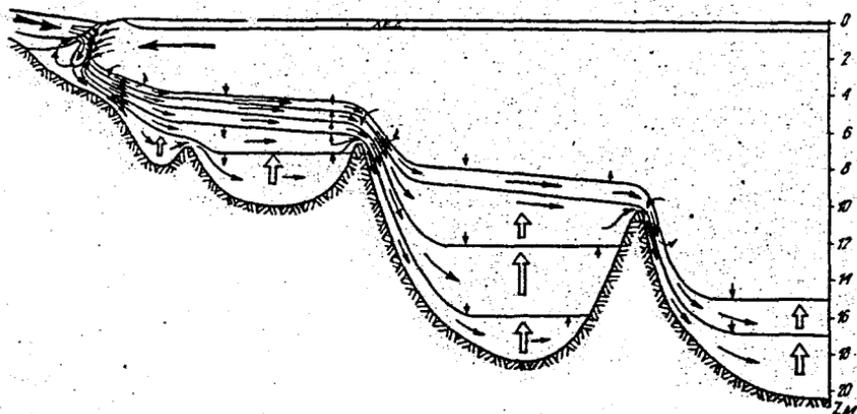


Рис. 1. Схема разбавления и распространения загрязненных вод в Выгозерском водохранилище в период ледостава

винах препятствуют относительно большие вертикальные градиенты плотности воды. На границе раздела озерных и загрязненных вод отмечается увеличение локального числа Ричардсона  $R_1$  до нескольких сотен и даже тысяч. В узких проливах между отдельными котловинами наблюдаются перепады уровня поверхности загрязненных вод, которым соответствует увеличение придонного гравитационного течения. Это сопровождается уменьшением числа  $R_1$  до критического значения (0,25) и ниже. К концу зимы загрязненные воды распространяются на десятки километров. Степень разбавления сточных вод изменяется в зависимости от их температуры в разные годы.

Период весеннего перемешивания на водоемах наступает с началом таяния снежного покрова на льду. Проникающая через лед солнечная радиация поглощается в верхнем слое воды, создавая гравитационную неустойчивость. Свободная конвекция, перемешивая воду, приводит к вертикальному выравниванию в слое не только температуры, но и различных растворенных химических веществ до однородного состояния. В это время в квазиоднородном слое на вертикальных профилях температуры наблюдаются элементы тонкой структуры, а на границе раздела однородного и расположенного ниже градиентного слоев формируется локальный термоклин (ступенька), резко обостряющийся днем и несколько ослабевающий — ночью. Инверсии температуры в квазиоднородном слое составляют  $0,005-0,020^\circ\text{C}$  с вертикальными размерами от сантиметров до нескольких дециметров. Скорости их вертикальных движений около  $1 \text{ см/с}$ . Изменение термической структуры во времени имеет ступенчатый характер, так как прогрев осуществляется только днем.

В четвертой главе приведены оценки характеристик водных масс Петрозаводской губы и ее водообмена с Онежским озером, а также излагается метод расчета разбавления и распространения загрязненных вод в водоемах со сложной формой дна в период ледостава.

Водообмен Петрозаводской губы с Онежским озером определен на основании анализа гидрологической структуры вод (глава 3) и расчетов по уравнению водно-солевого баланса отдельных элементов этой структуры. Установлено поступление в губу за период ледостава  $0,1-0,2 \text{ км}^3$  озерных вод, в то время как объем речного притока составил  $0,95 \text{ км}^3$ . Это указывает на то, что зимой динамика вод в губе в значительной мере определяется сто-

ковым течением, средняя скорость которого (оценка сделана по распространению ядра шуйских вод) была равна 0,16 см/с. Того же порядка скорости течения в губе были получены в результате расчетов с помощью модифицированного динамического метода. Истинная скорость градиентного течения в данном случае определялась без назначения нулевой динамической поверхности, а из допущения, что расход воды через любое поперечное сечение губы из условия сохранения неизменности объема ее вод равен расходу реки.

На основе выявленных закономерностей разбавления и распространения загрязненных вод в Выгозерском водохранилище в период ледостава (рис. 1) разработан относительно простой физико-балансовый метод расчета, заключающийся в следующем:

I. Степень разбавления промышленных стоков определяется из условия уплотнения вод до наибольшей плотности при их смешении. Мерой уплотнения вод при смешении сточных (СВ) и озерных вод (ОВ) может служить выражение

$$\Pi = \frac{1}{d} \cdot \left( \frac{\partial d}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dn} + \frac{\partial d}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dn} \right)$$

где  $d, x, T$  - соответственно плотность, удельная электропроводность и температура загрязненной воды;  $\Pi$  - доля ОВ в загрязненной водной массе. Так как зависимость плотности воды от содержания растворенных солей почти линейна, то при разбавлении СВ первое слагаемое в скобках есть отрицательная величина и при этом близка константе. Зависимость плотности воды от температуры - функция нелинейная и в данном случае с большим диапазоном изменения. Поэтому при смешении водных масс плотность ЗВ сначала будет возрастать ( $\Pi > 0$ ) до тех пор, пока ее увеличение за счет падения температуры не станет равной ее понижению из-за уменьшения концентрации солей, т.е.  $\Pi = 0$ , а  $d = \max$ . Таким образом, точка наибольшей плотности при смешении не совпадает с температурой максимальной плотности воды. Дальнейшее разбавление СВ приведет к уменьшению плотности ( $\Pi < 0$ ). На основе уравнений состояния и смешения вод построена номограмма (рис. 2), характеризующая изменения плотности ЗВ (сплошные линии) при разной степени их разбавления. Она рассчитана на среднюю электропроводность СВ (830 мкСм/см), но для различных ее температур (от 0 до 24°C). В ней учитывается содержание взвешенных веществ в СВ. Точки пересечения сплошных линий со

штрих-пунктирными характеризуют степень разбавления СВ. Для удобства степень разбавления приведена относительно доли СВ (т.е. 1 - n) с интервалом через 0,1.

2. Для учета дополнительного перемешивания в придонных гравитационных течениях на основе натуральных данных построены эмпирические кривые распределения ЗВ. Если функции распределения сохраняют общий вид относительно точки наибольшей плотности смещения, то гистограммы позволяют получить весь спектр ЗВ по градициям степени разбавления.

3. Водоем разбивается на отдельные районы с учетом морфологической обособленности. Для каждого из районов строятся объемные кривые и определяются истинная и критическая глубина проливов. При заполнении котловины и достижении истинной глубины пролива ЗВ начинают поступать в соседний район, но уровень ЗВ еще продолжает расти. Критическая глубина соответствует уровню ЗВ в районе. Она отвечает условию равенства объемов притока и стока разбавленных ЗВ.

4. В расчетах принимается условие мгновенного расслаивания. Оно соответствует однородному горизонтальному распределению физико-химических показателей в каждом отдельном районе. Таким образом, одномерные балансовые модели последовательного заполнения котловин отражают пространственное распределение ЗВ.

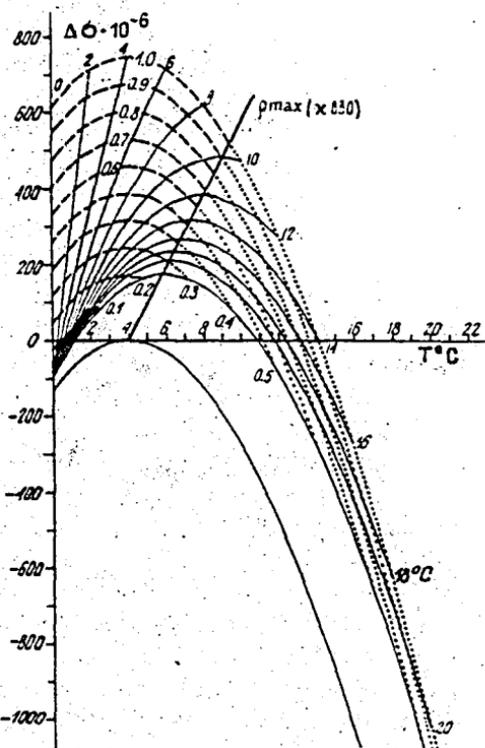


Рис. 2. Номограмма для определения степени разбавления сточных вод Сегежского ЦБК до точки наибольшей плотности

ВМБ ЛЕНИНГРАД  
 АСР-100-10-40  
 Академии наук СССР

Разработанный метод применим для расчета распространения ЗВ в водоемах со сложной формой рельефа дна, как при береговом, так и при глубинном безнапорном выпуске СВ, если скорость распространения ограничена скоростью заполнения котловин.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Многочисленные инструментальные исследования, выполненные на разнотипных водоемах Карелии в период ледостава свидетельствуют о наличии в них различных гидрологических структур. Наряду с образованием макроструктуры на вертикальных профилях температуры и электропроводности воды обнаружены элементы тонкой слоистой структуры и микроструктуры, являющиеся результатом действия различных гидрофизических процессов. На примере даже ультрапресных водоемов Карелии показано, что при относительно малой подвижности водных масс и температуре воды близкой к температуре наибольшей плотности необходимо принимать во внимание явления, связанные с влиянием на плотность воды не только температуры, но также ее минерализации и давления. Для учета уникальных PVT свойств воды предложено модифицированное уравнение состояния для пресной природной воды, отражающее ее ионный состав.

2. Основными факторами, определяющими гидрологические структуры водоемов, являются их морфометрические особенности и проточность. Установлено, что чем больше глубина водоема, меньше проточность и площадь зеркала, тем большую роль зимой в его термическом режиме играет собственный теплозапас в водной толще, сохранившийся к моменту установления ледостава, и меньшую - донные отложения, выступающие в качестве аккумулятора тепла. В водоемах с периодом условного водообмена от 2-3 месяцев до 1-2 лет на относительно больших акваториях формируются поля с неоднородным распределением в пространстве физических и химических характеристик. В очень и слабо проточных озерах водные массы более однородны по различным показателям.

3. Речные воды зимой в озерах и водохранилищах распространяются в соответствии с плотностью, приобретенной в устьевой области в результате смешения и стратификации в водоемах (преимущественно в приповерхностном слое или на средних горизонтах, но могут и медленно стекать по уклону дна или охваты-

вать почти всю водную толщу в мелких водоемах). В глубоких проточных озерах каньонного типа установлен характерный для них эффект уплотнения вод при смешении холодных речных и относительно теплых менее минерализованных озерных из-за нелинейного изменения плотности воды от температуры и линейного от концентрации солей. Этот эффект совместно с ветровым перемешиванием может приводить к более глубокому перемешиванию и дополнительному выхолаживанию озерных водных масс.

4. Процессы тепло- и массообмена на границе вода-дно, играющие большую роль в формировании гидрологической структуры почти всех неглубоких водоемов, нередко приводят, совместно с разгрузкой в озера глубинных грунтовых вод, к образованию температурных инверсий, уравновешенных по плотности увеличением минерализации воды. В ряде малых озер при нагревании их придонных слоев более  $4^{\circ}\text{C}$  возникает гравитационная неустойчивость и перемешивание глубинных вод с образованием конвективных ячеек.

5. Выделение солей в воду при образовании льда даже в ультрапресных водоемах может приводить к возникновению гравитационной неустойчивости и развитию конвективного перемешивания, если в предшествующий период сформировался квазиоднородный по температуре (около  $0^{\circ}\text{C}$ ) поверхностный слой воды. В мелких и малых по площади водоемах большой градиент температуры воды, устанавливающийся непосредственно подо льдом, препятствует этому процессу, а соли накапливаются в тонком подледном слое.

6. Промышленные стоки, сбрасываемые в водоемы, изменяют их естественные гидрологические структуры. Поступая зимой в водоемы с высокой температурой после биологической очистки, они разбавляются озерными водами до наибольшей плотности, опускаются ко дну и распространяются по его уклону в озеро в виде придонного стратифицированного потока, заполняя по очереди на своем пути все котловины дна. Скорость распространения загрязненных вод в водоемах со сложной формой дна определяется скоростью заполнения отдельных котловин. На основе обнаруженных закономерностей разработан относительно простой метод расчета разбавления и распространения загрязненных вод.

7. С началом таяния снежного покрова на льду наступает период весеннего перемешивания на водоемах с разрушением зимней гидрологической структуры. Свободная проникающая конвекция приводит к образованию подо льдом квазиоднородного слоя воды не только по температуре, но и содержанию химических ве-

пещь, в котором обнаружены инверсии температуры 0,005-0,020°C с вертикальными масштабами от сантиметров до 1 м. Увеличение толщины этого слоя и изменение температуры в нем происходит преимущественно при дневном прогреве.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Условия формирования водных масс Северного Выгозера // Исследования Онежской губы и водоемов бассейна Белого моря. - Петрозаводск: ОИМ, 1984. - С. 53-56 (соавтор А.М. Глинский).
2. Исследование фронтальной зоны на границе раздела речных и озерных вод // Лимнология Онежского озера и его бассейна. - Петрозаводск: ОИМ, 1985. - С. 17-19 (соавтор П.М. Бояринов).
3. Весеннее вертикальное перемешивание подо льдом в Онежском озере // Лимнология Онежского озера и его бассейна. - Петрозаводск: ОИМ, 1985. - С. 46-48 (соавтор М.П. Петров).
4. Модернизация схемы и режима эксплуатации водозабора руслового типа в условиях сезонных изменений качества воды Петрозаводской губы Онежского озера // Повышение эффективности работы водозаборов из поверхностных и подземных источников (материалы семинара). - М., 1985. - С. 73-77 (соавторы Р.И. Аркаев, Ю.П. Евтифеев).
5. Весенний термический режим неглубокого водоема // Круговорот вещества и энергии в водоемах (материалы к VI Всесоюзному лимнологическому совещанию). - Иркутск, 1985. - вып. VI. - с. 36 (соавтор А.М. Глинский).
6. К оценке водообмена Петрозаводской губы с Онежским озером в период ледостава // Актуальные проблемы современной лимнологии (материалы I Всесоюзной конференции молодых ученых). - Л., 1988. - С. 76-77 (соавтор Т.В. Ефремова).
7. Оценка водообмена Петрозаводской губы с Онежским озером // Исследование водных ресурсов Карелии. - Петрозаводск: ОИМ, 1989. - С. 21-25 (соавтор Т.В. Ефремова).
8. Динамика вод в устье р. Шуи и ее влияние на формирование водных масс в Петрозаводской губе // Исследование водных ресурсов Карелии. - Петрозаводск: ОИМ, 1989. - С. 25-30 (соавтор С.Ф. Руднев).
9. Изменение режима Северного Выгозера и реки Нижний Выг

под действием сточных вод Сегежского ЦБК и допустимый объем их сброса // Практические рекомендации "Наука-производству"-Петрозаводск, 1989. - 36 с. (соавторы П.А. Лозовик, Т.П. Куликова, Т.М. Тимакова, И.Г. Вислянская, Т.А. Чекрыжева).

Ю. Основные закономерности и методика расчета разбавления и распространения промышленных сточных вод в Выгозерском водохранилище в период ледостава // Динамика и термика рек водохранилищ и окраинных морей (материалы III Всесоюзной конференции). - М., 1989. - том II. - С. 240-242.

II. Исследование придонного гравитационного течения в водоеме // Вихри и турбулентность в океане (материалы III Всесоюзной конференции). - Калининград, 1990. - С. 92.

