



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему

**Многолетнее изменение
характеристик ледово-
термического режима в
отдельных котловинах Байкала**

Исполнитель Дьяков Тимофей Николаевич

Руководитель доцент кафедры гидрологии суши, к.г.н.

Тимофеева Лариса Александровна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

к.г.н. Сикан Александр Владимирович

«20» 06 2016 г.

Санкт-Петербург
2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДОВО–ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗ. БАЙКАЛ	7
1.1. Общие сведения об оз. Байкал.....	7
1.2. История и результаты исследований	8
2. ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗ. БАЙКАЛ И ФАКТОРЫ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ	13
2.1. Природные особенности озера	13
2.1.1. Рельеф и орография прилегающей территории.....	13
2.1.2. Морфометрия отдельных котловин озера.....	13
2.2. Климатические характеристики	14
2.2.1. Тепловой баланс.....	14
2.2.2. Осадки.....	17
2.2.3. Ветер.....	18
2.3. Термический режим и процессы	20
2.3.1. Годовой термический цикл.....	20
2.3.2. Конвекция	23
2.3.3. Термический барьер (термобар).....	24
2.4. Вертикальный и горизонтальный перенос тепла.....	26
2.4.1. Течения	26
3. ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ОЗ. БАЙКАЛ И ФАКТОРЫ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ	28
3.1. Характеристики ледостава	28
3.1.1. Толщина льда	29

3.2. Факторы формирования ледового режима.....	30
3.2.1. Климатические факторы формирования ледового режима..	30
3.2.2. Морфометрические особенности и ледовый режим	31
4. МАТЕРИАЛЫ И ИХ ОБРАБОТКА	31
4.1. Гидрометеорологические посты и станции.....	31
4.2. Исходные данные.....	33
4.3. Статистическая обработка исходных данных.....	34
4.3.1. Проверка рядов на однородность.....	35
4.3.2. Выявление трендов и оценка их значимости.....	37
4.3.3. Сглаживание рядов	38
4.3.4. Построение диаграмм.	Ошибка! Закладка не определена.
5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВО-ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ИХ АНАЛИЗ...	44
5.1. Изменения в Северной котловине	44
5.1.1. Изменение температуры воздуха	44
5.1.2. Изменение температуры поверхности воды	45
5.1.3. Изменение дат замерзания и вскрытия.....	46
5.1.4. Изменение толщины льда	48
5.2. Изменения в Центральной котловине	48
5.2.1. Изменение температуры воздуха	48
5.2.2. Изменение температуры поверхности воды	49
5.2.3. Изменение дат замерзания и вскрытия озера	50
5.2.4. Изменение толщины льда	52
5.3. Изменения в Южной котловине	52

5.3.1. Изменение температуры воздуха	53
5.3.2. Изменение температуры поверхности воды	53
5.3.3. Изменение дат замерзания и вскрытия озера	54
5.3.4. Изменение толщины льда	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	59

ВВЕДЕНИЕ

Байкал – крупнейшее из пресноводных озер мира, занимающее первое место среди них по максимальной и средней глубинам и объему водных масс и седьмое место по площади. В соответствии с рельефом дна озера выделяются три котловины: Северная, Центральная, Южная. Северная котловина является самой большой по площади, но самой мелкой. Центральная котловина является самой объемной и глубокой. Эти особенности, наряду с климатическими, играют важную роль в формировании ледово-термического режима.

Изменение климата в Прибайкалье оказывает заметное воздействие на ледовые характеристики озера. Знать эти характеристики необходимо для организации ледовых переправ, например, на о. Ольхон, так как за короткий период действия этой переправы нужно успеть доставить на остров большой объем разнообразных грузов.

Целью работы является изучение современных изменений характеристик ледово-термического режима в отдельных котловинах Байкала в условиях глобального потепления.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- собрать и статистически обработать данные;
- оценить значимость временных трендов;
- проанализировать взаимосвязи между характеристиками ледово-термического режима, климатическими и морфометрическими характеристиками котловин озера;
- оценить изменение характеристик ледово-термического режима за два периода: с 1950-х годов до 1990 г. и с 1990 до 2015 гг.

В качестве исходных данных использовались ряды средних месячных температур воздуха и поверхности воды, дат вскрытия и замерзания и средней

годовой толщины льда за период 1950-2015 гг. Данные получены: в Северной котловине – ст. Нижнеангарск и Байкальское, в Центральной – ст. Узур, в Южной – ст. Листвянка.

Данная работа выполнена в сотрудничестве с лабораторией гидрологии и гидрофизики Лимнологического Института СО РАН.

1. ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДОВО–ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗ. БАЙКАЛ

1.1. Общие сведения об оз. Байкал

Озеро Байкал, самое глубокое (1 642 м) и самое большое по объему ($23\,615\text{ км}^3$ при площади поверхности $31\,700\text{ км}^2$) из всех пресных озер мира, расположено почти в центре Азиатского континента на высоте 456 м над ур. м. Котловина Байкала простирается на 636 км с юго-запада на северо-восток. Площадь водосборного бассейна составляет $540\,000\text{ км}^2$, из них 52% приходится на территорию Монголии (рисунок 1). Территория бассейна представляет собой горную местность; горы выше 1000 м занимают около половины площади ее российской части [2].

Котловина озера является центральным звеном Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), включающей систему горных хребтов, простирающихся с юго-запада на северо-восток, и межгорных впадин (Верхнеангарская, Баргузинская, Тункинская и др.). Длина БРЗ достигает 1800 км (от Дархатской впадины в Монголии и хребтов Восточного Саяна до бассейна р. Олекма на востоке), ширина – 200-220 км. В пределах БРЗ насчитывается свыше 70 межгорных впадин разного размера. Котловина самого Байкала также окружена горными хребтами, с которых в озеро стекает около 500 больших и малых притоков. Вне пределов горного обрамления озера располагается бассейн только одного, но самого крупного притока – р. Селенга, площадь водосбора которой составляет $447\,000\text{ км}^2$. Сток из озера осуществляется в его южной части через р. Ангара [2].

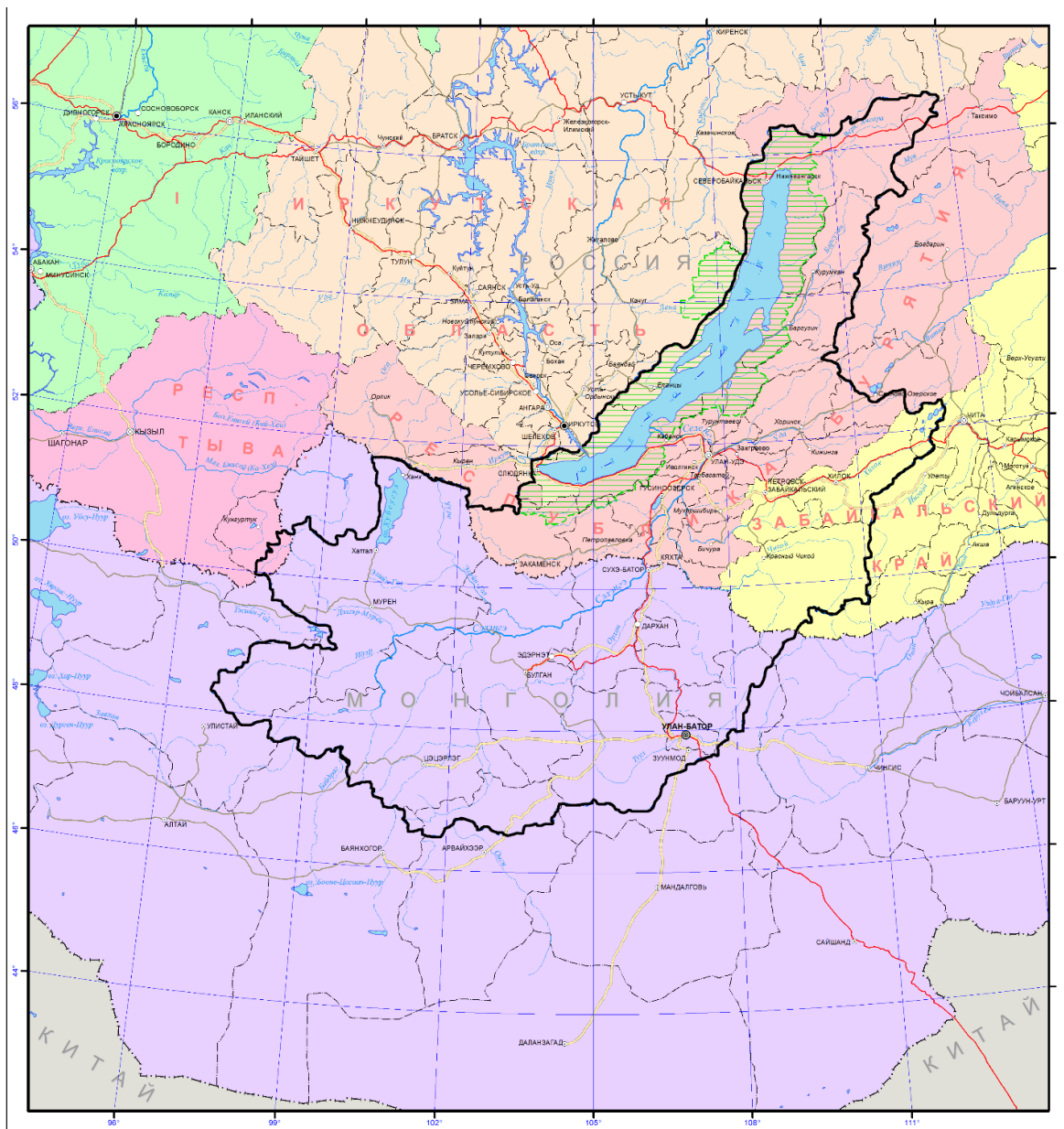


Рисунок 1 – Водосборный бассейн оз. Байкал

1.2. История и результаты исследований

Байкал привлекает внимание исследователей начиная с XVII в. Озеро можно считать наиболее изученным природным водоемом планеты, но и сегодня оно таит еще немало загадок.

Научное познание Байкала осуществлялось в несколько этапов, границы между которыми достаточно условны.

Сбор первых сведений

Сравнительно недавно о Байкале и даже о Сибири европейцы ничего не знали. В «Космографии» С. Мюнстера (1544 г.) говорится, что «живут в тех краях люди с песьими головами» Даже на карте Европы 1689 г. Байкал еще не обозначен. Коренные жители Сибири сложили о нем множество легенд и преданий. Само слово «Байкал» в языках народов, населявших эту территорию или бывавших на ней, означает: «золотое» – по-алтайски, «северное» – по-китайски, «огненное» – по-бурятски, «богатое» – по-якутски. Называют Байкал и славным морем, и священным озером.

«Немецкий» этап (исследования немецких членов Петербургской академии наук)

В 70-х годах XVIII в. Екатерина II пригласила из Германии на службу в Петербургскую академию наук П.С. Палласа. Вскоре Паллас возглавил большую экспедицию в Сибирь и на Байкал, который произвел на него огромное впечатление. Ученый пытался объяснить причины возникновения Байкальской впадины. Он считал, что котловина Байкала представляет собой громадную трещину, разделившую горы и заполнившуюся водой. Паллас отметил, что прибрежные горы имеют черты как сильнейших и довольно свежих изменений, так и признаки глубокой древности.

«Польский» этап (исследования ссыльных поляков)

Начиная с 1867 г., почти 10 лет своими силами на собственные средства Б. Дыбовский и В. Годлевский проводили стационарные наблюдения. Был проделан комплекс работ: выполнены промеры глубин Байкала, создана батиметрическая карта юго-западной части озера, осуществлены первые измерения уровня и температуры воды, проведены наблюдения за ледовыми процессами. Основные работы велись в зимнее время со льда.

Исследования начала XX в.: на пути к научным станциям

Строительство Кругобайкальской железной дороги послужило новым стимулом для дальнейшего изучения озера. Была организована гидрографическая экспедиция (1896-1902 гг.) под руководством Ф.К. Дриженко. Экспедицией выполнены батиметрическая съемка, астрономические и магнитные измерения, установлены десятки маяков, составлены карты Южной, Центральной и Северной котловин, Генеральная карта озера и атлас, судоходная лоция, а также атлас Верхней Ангары и волока до р. Витим.

В конце XIX – начале XX в. А.В. Вознесенский и В.Б. Шостакович составили первые обстоятельные очерки по климатическим особенностям Байкала, его термике, прозрачности воды, особенностям ледового покрова и учредили метеостанции на берегу озера и на о. Ольхон.

Призывы ученых-энтузиастов к организации на Байкале систематических научных исследований привели к тому, что в 1916 г. при Президиуме Петербургской академии наук была создана Комиссия по изучению Байкала. В ней, наряду с известными учеными (Л.С. Берг, В.А. Обручев, А.Н. Северцов), приняли участие их молодые увлеченные коллеги: В.Ч. Дорогостайский, Г.Ю. Верещагин.

Советский этап

Работы Байкальской комиссии АН возобновились только в декабре 1924 г. В 1925 г. состоялось возвращение академической науки на Байкал: под руководством Г.Ю. Верещагина была организована постоянная экспедиция АН СССР на юго-западном берегу оз. Байкал на станции Маритуй.

В 1928 г. экспедиция реорганизована в Байкальскую лимнологическую станцию АН СССР (БЛС), директор Г.Ю. Верещагин. Станция в 1930 г. была переведена в пос. Листвянка.

Главной задачей Байкальской экспедиции являлись гидрохимические исследования Байкала и его притоков. Однако единой методики изучения воды в полевых условиях не было. Это побудило Г.Ю. Верещагина разработать стандартные методы полевого анализа воды. В 1927 г. на IV Международном конгрессе лимнологов для этих целей была создана специальная комиссия.

В послевоенные годы БЛС приступает к углубленному изучению температурного, химического, ледового режима и теплового баланса озера. Гидрологической тематикой занимался В.М. Сокольников, который возглавил ледово-термические и теплобалансовые исследования. В начале 1950-х годов в работах приняли участие В.И. Верболов, В.И. Маньковский, П.А. Новокшенов, В.В. Меншуткин, М.Н. Шимараев и др. В результате было выполнено всестороннее описание байкальского льда, начиная с появления первых его форм до полного очищения озера. В.М. Сокольников получил данные о подледных течениях и о наличии в озере горизонтальных циркуляционных систем.

В 1961 г. Лимнологическая станция была реорганизована в Лимнологический (озероведческий) институт, который возглавил Г.И. Галазий, академик РАН, крупный специалист в области геоботаники, лимнологии и экологии. Г.И. Галазий был признанным экспертом экологического сообщества, непримиримым противником промышленного освоения побережья озера и борцом за чистоту байкальских вод.

Открытие в 1960-е годы Мировой рифтовой системы – глобальной сети новейших разломов, связанных с поднятием и расширением земной коры в океанах, – заставило обратить внимание на байкальские грабены, которые оказались континентальными рифтовыми структурами. В 1967 г. была организована Байкальская секция Научного совета по изучению земной коры и верхней мантии при АН СССР, а Байкал и Прибайкалье включены в состав приоритетных объектов.

Новый этап в изучении уникальных природных особенностей Байкала в 1977 г. открыли исследования с применением подводных обитаемых аппаратов «Пайсис», работавших на озере три сезона (1977, 1990 и 1991 гг.). В результате глубоководных погружений были получены качественно новые данные о сейсмических структурах и сделаны первые фотографии и видеозаписи бентоса.

Международная научная кооперация (конец XX в. – начало XXI в.).

В связи с реорганизацией Лимнологического института в 1987 г. и геополитическими изменениями, был основан Байкальский международный центр экологических исследований, который занимается фундаментальными и междисциплинарными детальными исследованиями с помощью современных методов и приборов.

Международная экспедиция «Мир» (2008-2010 гг.) позволила получить палеоклиматические данные для прогноза климата будущего.

В 1996 г. Байкал включен в список всемирного наследия ЮНЕСКО. В 1999 г. был принят Федеральный закон «Об охране озера Байкал».

2. ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗ. БАЙКАЛ И ФАКТОРЫ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

2.1. Природные особенности озера

2.1.1. Рельеф и орография прилегающей территории

Максимальная ширина озера в его средней части достигает 81 км; минимальная (напротив дельты Селенги) – 27 км; средняя ширина – 49.3 км. Протяженность озера 636 км. Длина его береговой линии составляет около 1800 км. На Байкале имеются 22 острова общей площадью 716 км², самые большие из них Ольхон (690 км²) и Большой Ушканий (9,4 км²). Самые крупные заливы располагаются на восточном побережье: Баргузинский (791 км²), Чивыркуйский (268 км²), Провал (196 км²). Между о. Ольхон и западным побережьем озера находится пролив Малое Море площадью 905 км². Прибрежные хребты западного побережья – Приморский (с отметками вершин от 700 до 1 500 м над ур. м.) и Байкальский (1 500-2 588 м над ур. м.) – подступают почти вплотную к озеру. Хребты восточном побережья – Хамар-Дабан (1 300-2 370 м над ур. м.), Улан-Бургасы (1 100-2 000 м над ур. м.) и Баргузинский (1500-2840 м над ур. м.) – отделены от береговой линии полого наклоненными прибрежными равнинами или невысокими предгорьями. Высота гор увеличивается от южной части озера к северной.

2.1.2. Морфометрия отдельных котловин озера

Байкальская впадина асимметрична, особенно ее подводная часть. Наибольшую крутизну (до 60°, в среднем 30-35°) имеет подводный склон западного берега. Прибрежные отмели вдоль него развиты слабо и в основном

имеют абразионное (волноприбойное) происхождение. Средняя крутизна склонов восточного берега 7-10°. Вдоль него, особенно в Центральной котловине Байкала, гораздо чаще встречаются прибрежные отмели. Их происхождение смешанное, абразионно-аккумулятивное. Подводные склоны расчленены многочисленными подводными каньонами, по которым прибрежные наносы перемещаются в абиссаль. Обширная глубоководная равнина (дно впадины) выровнена и имеет небольшой уклон к западному берегу.

Впадина озера разделена на три котловины – Южную, Среднюю и Северную глубоководными поднятиями дна. Одно из них находится напротив дельты Селенги (Селенгинское поднятие), другое протянулось по направлению от о. Ольхон на Ушканьи острова (Академический хребет с вершинами на глубинах 350-400 м). Наличие поднятий исключает прямой водообмен между водными массами котловин ниже 400 м. Южный и Средний Байкал заключают большие объемы воды на глубинах свыше 1 км (16 – 20% от общего их объема). Северный Байкал существенно мельче.

2.2. Климатические характеристики

2.2.1. Тепловой баланс

Прибайкалье относится к зоне резко континентального умеренного климата, с жарким летом и холодной зимой.

Водная масса Байкала смягчает климат в пределах озерной котловины: летом воздух над озером на 6-8° С теплее, чем над сушей. Годовые амплитуды температуры воздуха над Байкалом (30-38° С) намного ниже, чем за пределами котловины (41-50° С).

Прогрев и охлаждение вод озера происходит в результате их теплового взаимодействия с окружающей средой, учитываемого уравнением теплового баланса:

$$B = R + P + LE + Q_p + Q_{oc} + Q_{лед} + Q_g, \quad (2.1)$$

- где B – результирующий поток тепла на границе вода – атмосфера;
 R – радиационный баланс поверхности, Дж/м²;
 P – потери тепла на турбулентный теплообмен вода – воздух;
 LE – потери тепла на испарение;
 Q_p – баланс притока тепла с водами рек и его выноса со стоком р. Ангары, Дж;
 Q_{oc} – баланс тепла жидких и твердых атмосферных осадков, Дж;
 $Q_{лед}$ – тепло замерзания (таяния) льда, Дж;
 Q_g – геотермический поток тепла от дна, Дж.

Главными факторами, определяющими специфику теплового баланса Байкала, являются особенности климата региона и участие в теплообмене практически всей водной толщии озера.

Баланс длинноволновой радиации (обмен тепловой энергией между поверхностью озера и атмосферой за счет инфракрасного излучения $E_{эф}$) при климатических расчетах для озера может быть определен с погрешностью не более 10% по выведенной для условий водоемов формуле Т.В. Кирилловой:

$$E_{эф} = 0,91 \cdot \delta \cdot T^4 (0,41 - 0,05\sqrt{e}) \cdot (1 - 0,5n) + 0,14\Delta T - 0,28, \quad (2.2)$$

- где T – абсолютная температура воздуха, К;
 e – влажность воздуха, мбар;
 n – общая облачность в долях единицы;
 ΔT – разность температур поверхности и воздуха, К.

Годовой ход $E_{\text{эф}}$ характеризуется максимумом в ноябре – декабре и минимумом в июне и июле. Годовая величина $E_{\text{эф}}$ по многолетним расчетным данным составляет около 1820 МДж/м².

Годовой ход радиационного баланса поверхности $R=Q_{\text{п}} - E_{\text{эф}}$ определяется в основном изменением суммарной поглощенной радиации. Годовая сумма R для всего Байкала близка к 1910 МДж/м².

Турбулентный теплообмен озера с атмосферой P и теплообмен за счет испарения (конденсации) LE рассчитываются по полуэмпирической формуле, которая позволяет определить суммарный поток $P + LE$ в ккал/(см²·сут) для меняющихся в течение года гидрометеорологических условий на Байкале следующим образом:

$$P + LE = 0,1[(T_0 - T_2) + 1,6(e_0 - e_2)] \cdot (k + 0,39w_2), \quad (2.3)$$

где T_0 – температура поверхности воды (льда), К;

T_2 – температура и воздуха на высоте 2 м, К;

e_2 – влажность воздуха на высоте 2 м, мбар;

e_0 – максимальная упругость водяного пара (мбар) при температуре поверхности;

w_2 – скорость ветра на высоте 2 м, м/с.

Коэффициент k зависит от величины $T_0 - T_2$. Значения P и LE в кал/ (см² × сут) могут быть определены и методом теплового баланса с использованием соотношения Боуэна по зависимостям:

$$LE = \frac{1,55(R - B)\Delta e}{1,55\Delta + \Delta T} \text{ и } P = \frac{(R - B)\Delta T}{1,55\Delta e + \Delta T}, \quad (2.4)$$

где $\Delta e = e_0 - e_2$, мбар;

$\Delta T = T_0 - T_2$, мбар;

B – результирующий теплообмен в водной толще.

Годовой максимум потерь тепла P , LE и их суммы $P + LE$ приходится на Байкале на ноябрь и декабрь. В июне и июле потоки направлены от теплого и влажного воздуха к холодной водной поверхности. Годовая сумма потоков $P + LE$ (1940 МДж) складывается из потерь тепла осенью, зимой и весной (2300 МДж) и поступления в воду летом (360 МДж/м²).

Тепло кристаллизации (в январе – марте) и таяния льда (в апреле – июне) $Q_{\text{лед}}$ составляет 250 – 290 МДж/м². Второстепенные по значению элементы баланса – Q_p (46 МДж), $Q_{\text{ос}}$ (-30 МДж) и геотермический поток тепла от дна (2 – 4 МДж) дают суммарно за год всего 20 МДж/м².

2.2.2. Осадки

Распределение осадков в озерной котловине зависит от форм рельефа и ориентации склонов относительно направления западных атмосферных потоков. Максимум осадков (до 1 400 мм/год) выпадает на северных и северо-западных склонах хр. Хамар-Дабан на высотах 1 000-1 400 м. Это обуславливает формирование на этих склонах особенно мощного снежного покрова в зимний период. Осадки, выпадающие на акваторию самого озера, составляют от 200 до 500 мм/год. Наименьшее их количество (около 200 мм) приходится на Средний Байкал (район о. Ольхон и Приольхонье).

Большая часть осадков (от 70% на склонах прибрежных гор и до 80% на побережье и зеркале озера) выпадает в период с апреля по октябрь с максимумом (17% от годовой величины) обычно в июле. На некоторых станциях (Давша, Большой Ушканий остров, Усть-Баргузин) в ноябре – декабре осадки возрастают из-за дополнительного притока влаги за счет большого испарения с водной поверхности озера. В холодный период года атмосферные осадки незначительны. Количество их несколько повышено на

склонах и вершинах хребтов Хамар-Дабан и Баргузинского. Минимум осадков отмечается обычно в феврале.

2.2.3. Ветер

Окружающие Байкал горы трансформируют направление преобладающего в атмосфере западно-восточного переноса, и над поверхностью озера получают развитие ветровые потоки, ориентированные вдоль и поперек озерной котловины (рисунок 2.1).

В безледоставный период (май – декабрь) наибольшее значение имеют поперечные западные и северо-западные ветры с западного побережья (местные названия – горная, сарма) и продольные – юго-западные, култук) и северо-восточные (верховик и баргузин). Ветры с восточного и юго-восточного побережья (шелонник) имеют небольшую повторяемость. Так же редко одновременное сочетание северо-западного и юго-западного ветров. Повторяемость слабых и неустойчивых по направлению ветров составляет около 33% от общего числа наблюдений.

Все типы полей ветра имеют выраженный сезонный ход. С мая по сентябрь преобладают неустойчивые ветры, а с октября по декабрь резко возрастает роль северо-западных и, отчасти, северо-восточных ветров. В соответствии с изменением интенсивности планетарной циркуляции годовой ход скорости ветра над прилегающей к озеру территорией характеризуется весенним (апрель – май) и более слабым осенним (сентябрь – октябрь) максимумами. Над Байкалом, из-за возрастания термобарических контрастов между озером и окружающей сушей в конце года, осенний максимум более выражен и смещен на ноябрь – декабрь. Наибольшие скорости достигаются при ветрах северо-западного направления и наблюдаются обычно в позднеосенний период. В это время штормовые ветры достигают наибольшей силы при скорости свыше 20 м/с, иногда 40 м/с [1].



Рисунок 2.1 Схема основных байкальских ветров

1 – верховик; 2 – горная; 3 – баргузин; 4 – култук; 5 – шелонник

В пределах котловины среднемесячные и годовая скорости ветра выше в Центральном и Южном Байкале и ниже на Северном Байкале. Это связано с преобладанием выхода циклонов и тыловых вторжений на южную и среднюю части озера и с большей орографической защищенностью северной котловины.

Сезонные контрасты температуры и атмосферного давления между озером и сушей вызывают, как и на побережье морей, местную муссонно-бризовую циркуляцию с преобладанием летом потоков с озера на берег, а поздней осенью и в начале зимы – с берегов в сторону озера. Хорошо выражена горно-долинная циркуляция, связанная с неодинаковым прогревом (охлаждением) воздуха на разных по высоте участках горных долин на прибрежных склонах и долин крупных рек (Верхняя Ангара, Баргузин).

2.3. Термический режим и процессы

2.3.1. Годовой термический цикл

В зависимости от знака теплового баланса поверхности, стратификации температуры и условий перемешивания годовой цикл температуры разделяется на периоды нагревания и охлаждения, включающие отдельные этапы. Их продолжительность, сроки наступления не одинаковы в районах Байкала, различающихся по широтному положению, удаленности от берега и характеру глубин [5].

Наиболее подробные данные о годовом ходе температуры T и переносе тепла дают материалы непрерывной регистрации T . Такие данные получены, например, с помощью приборов $TR-1050$, $TR-1060$ и других, размещенных на четырех буйковых станциях в районе Байкальского нейтринного телескопа. Приборы позволяют измерять температуру воды с разрешением $0,001^{\circ}\text{C}$ в течение года.

Этап подледного прогрева после перехода теплового баланса поверхности к положительным значениям начинается раньше в малозаснеженных прибрежных районах западной части котловин. Распределение температуры представляет устойчивую мезотермию с максимумом T на глубинах 150-250 м ($3.5-3.7^{\circ}\text{C}$). На глубинах до 25 м расположен слой с малыми градиентами температуры. По мере усиления температурной конвекции при радиационном прогреве в апреле – мае слой увеличивается до 50-100 м, его температура перед вскрытием озера варьирует от 0.4 до 2°C . На глубинах больше 100 м сохраняется устойчивая температурная стратификация, на глубинах 150-250 м находится мезотермический максимум температуры $3,5-3.7^{\circ}\text{C}$. На больших глубинах круглогодично наблюдается прямая температурная стратификация (т.е. температура воды понижается с глубиной).

На этапе весеннего прогрева под действием конвекции и ветра диапазон глубин с очень малым градиентом температуры постоянно увеличивается и увеличивается толщина слоя воды, температура которого почти постоянна. При приближении температуры поверхности к $3,5-3,7^{\circ}\text{C}$ – значению $T_{\text{м.п.}}$ (температура максимальной плотности) для глубин 150 – 250 м – мезотермический максимум исчезает, и вся водная толща озера становится практически однородной по температуре (весенняя гомотермия).

После перехода через это значение температуры глубина проникновения конвекции постоянно уменьшается, а после перехода T поверхности через значение $T_{\text{м.п.}}$ (3.98°C) конвекция прекращается. Вертикальная устойчивость воды в этом слое близка к нулю, что создает хорошие условия для перемешивания под действием ветра и течений.

Во время этапа летнего прогрева, в отсутствие температурной конвекции, быстро формируются теплый верхний слой – эпилимнион толщиной до 5-10 м и слой температурного скачка – термоклин, с большими вертикальными градиентами температуры ($0,2-0,4^{\circ}\text{C м}^{-1}$). Его нижняя граница

10-40 м. Термоклину принадлежит большая роль в круговороте вещества и энергии в озере. Термоклин служит преградой для перемешивания воды в гипolimнионе и обогащения его кислородом. Температура эпилимниона в открытом Байкале повышается к июлю – августу в среднем до 10-12° С. Однако при отсутствии ветра верхний слой воды толщиной 1 – 2 м может временно прогреваться до 14-16, а иногда до 18-22° С. Вблизи крупных теплых притоков (реки Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин), в мелководных заливах и сорах (Чивыркуйский, Мухор, Провал, Истокский и Посольский сора у Селенги и Ангарский сор вблизи Верхней Ангара) температура у поверхности уже в июне может превышать 10° С, а в июле и августе достигать 18-24° С. Ниже термоклина до глубин 150-250 м сохраняются близость профилей T и $T_{м.п}$ и низкая устойчивость вод, что создает условия для инициирования (при усилении ветров) динамического перемешивания вод эпилимниона и термоклина с залегающими ниже холодными водами гипolimниона.

Этап осеннего охлаждения начинается после перехода теплового баланса поверхности к отрицательным значениям в сентябре. Только в это время отмечается рост температуры воды на глубинах, превышающих 20-30 м, за счет свободной конвекции. Температурная конвекция и ветровое перемешивание ведут к увеличению размеров эпилимниона, заглублению и размыванию слоя температурного скачка. Толщина перемешанного слоя возрастает от 20-30 м в сентябре до 100-150 м в начале ноября. Усиливается передача тепла в нижние слои, в которых температура воды растет, достигая годового максимума на глубинах 30-150 м в октябре, 150-300 м в ноябре, а в более глубоких слоях – в ноябре и даже в декабре.

После перехода T поверхности через 3,98° С и прекращения свободной температурной конвекции начинается этап предзимнего охлаждения. Формирование профиля T в это время связано с ветровым перемешиванием, ведущим к увеличению толщины верхнего слоя. Такое увеличение

практически заканчивается, когда энергии ветра уже недостаточно для преодоления растущей устойчивости быстро охлаждающихся верхних слоев воды. При температуре вод деятельного слоя $3,5-3,7^{\circ}\text{C}$ его водная толща, как и весной, наиболее однородна по температуре (осенняя гомотермия). При дальнейшем охлаждении формируется зимний профиль температуры с ее повышением до 150-250 м и последующим понижением до дна. Горизонт пересечения профилей T и $T_{\text{м.п.}}$, в котором отмечается мезотермический максимум температуры (T), является границей раздела вод верхней зоны с обратной стратификацией T и глубинной зоны с ее прямой стратификацией. Характеристики мезотермического максимума – его глубина H и температура – зависят от интенсивности ветрового перемешивания на этапе предзимнего охлаждения.

После замерзания на этапе подледного охлаждения в условиях постепенного затухания динамического перемешивания происходит окончательное установление обратной стратификации температуры в верхнем слое водной массы. В зависимости от интенсивности осенне-зимнего конвективно-ветрового перемешивания значения $T_{\text{м.м}}$ и H в разные годы и в разных участках озера меняются в широких пределах – от $3,7^{\circ}\text{C}$ при $H = 150$ м до $3,5^{\circ}\text{C}$ при $H = 250$ м.

2.3.2. Конвекция

Свободная температурная конвекция обеспечивает эффективный вертикальный обмен вод только в верхнем 300-метровом слое Байкала. Процесс не затрагивает большие глубины, потому что в этой зоне температура воды ниже, а плотность выше, чем у воды температурой $3,5 - 3,7^{\circ}\text{C}$, находящейся в верхнем слое, охваченном активной свободной конвекцией. Другими словами, из-за зависимости температуры максимальной плотности от давления на глубинах больше 300 м вода с температурой меньше $3,4^{\circ}\text{C}$

оказывается более плотной, чем вода с температурой выше 3,5 °С. В этих условиях обновление глубинных вод возможно только за счет иных физических механизмов.

Наличие ветра вдоль береговой линии со скоростью около 6 м/с может быть достаточным для инициирования присклонового даунвеллинга в периоды, близкие к гомотермии; такие ветры не редкость на Байкале. Впервые инструментально наблюдать процесс затекания вдоль склона через потенциальный барьер холодных приповерхностных вод в придонную зону удалось с помощью высокоточных глубоководных измерителей температуры воды TR-1000, TR-1050, TR-1060, расположенных на притопленных буйковых станциях, одна из которых находилась на береговом склоне на расстоянии 1200 м от берега, а две другие на удалении 3500 м от берега в окрестности Байкальского нейтринного телескопа. Одна из наиболее мощных интрузий объемом порядка 30 км³ наблюдалась в конце 2006 г. В результате воздействия на поверхность озера длительного северо-восточного ветра возникло течение вдоль западного берега, средняя скорость которого на глубине 15 м, по данным прибора AANDERRA, установленного на присклоновой буйковой станции на расстоянии 1 200 м от берега, составила 0,28 м/с.

2.3.3. Термический барьер (термобар)

Неравномерность глубин, поступления речных вод, широтные различия, течения являются причиной пространственных неоднородностей в распределении температуры поверхности воды озера. В июле – октябре температура понижается от берегов к центру озера. Летом это связано с более быстрым прогревом прибрежных вод, а также с перераспределением тепла в поле преобладающих в Байкале циклонических течений. Их влияние приводит к заглублению прогретых верхних слоев у берегов и подъему более холодных

вод в центре озера. Локализация участков холодных вод в центре озера присуща каждой из котловин Байкала, в то время как на границах между ними под влиянием направленных поперек озера струй течений происходит повышение температуры. Такой характер распределения сохраняется в период с прямой стратификацией температуры до октября. Только в ноябре, после смены стратификации на обратную, температура прибрежных районов становится ниже, чем в центре озера. Широтные различия проявляются в более раннем прогреве и позднем охлаждении вод Южного Байкала по сравнению с Центральным и особенно северным Байкалом.

Термобар, как термический, плотностной и динамический фронт, относится к явлениям, играющим важную роль в гидрологических и биологических процессах всех озер умеренных широт. Его возникновение вызывается уплотнением при смешении теплых ($T > 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) речных и прибрежных с холодными ($T < 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) водами открытого озера на границе их раздела. На Байкале весной значительные различия в темпах прогрева прибрежных и озерных вод приводят к образованию термобара у берегов, особенно в зонах влияния крупных рек (Селенги, Баргузина, Верхней Ангары) и в больших заливах (Малое Море, Баргузинский, Чивыркуйский). Уплотнение сопровождается опусканием вод на фронте термобара на малых глубинах до дна, а в открытом озере до глубины 200-300 м. Фронт представляет собой естественный барьер, затрудняющий обмен прибрежных и озерных вод до этих глубин, что отражается на условиях протекания физических и биологических процессов в теплой (у берега) и озерной части термобара.

В конце осени термобар возникает вторично, однако слабые горизонтальные градиенты температуры в это время года не вызывают таких крупномасштабных явлений, какие наблюдаются на весеннем термобаре.

2.4. Вертикальный и горизонтальный перенос тепла

2.4.1. Течения

На всех глубинах Байкала на протяжении всего года под действием ветра, перепадов атмосферного давления и ряда других факторов (неоднородности поля плотности воды, влияния притока рек и стока и др.) наблюдается горизонтальный перенос вод – течения.

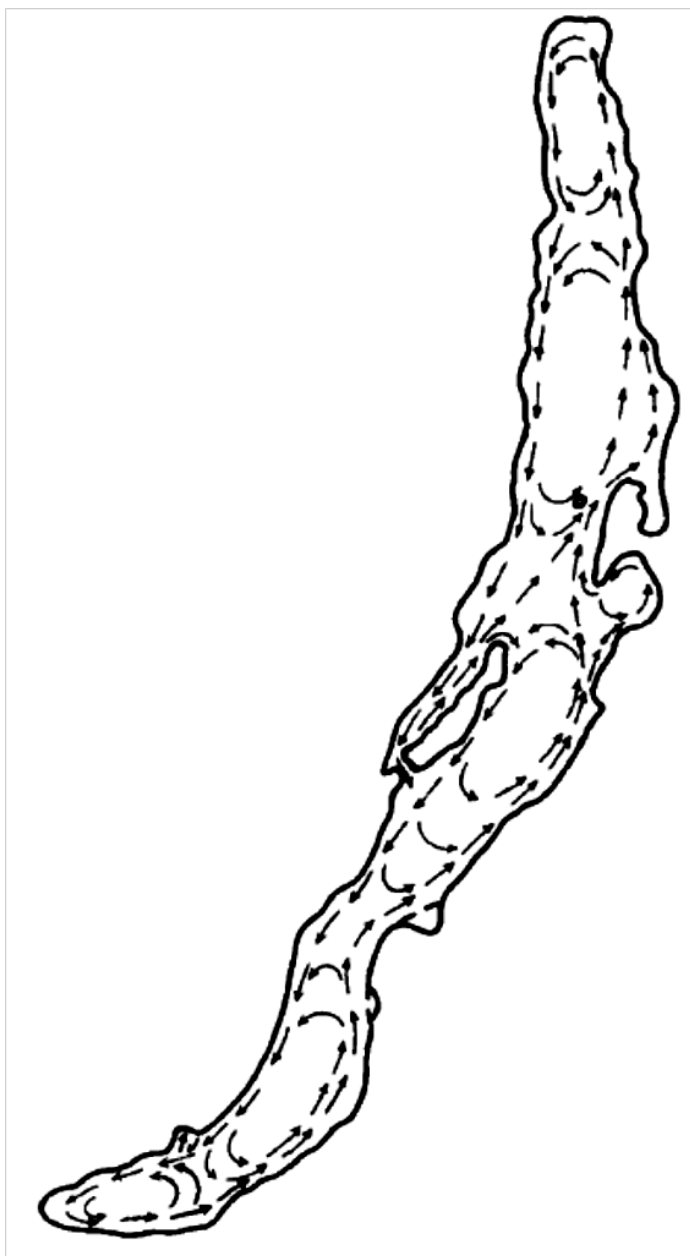


Рисунок 2.2 – Поверхностные течения оз. Байкал

В период открытой воды главной причиной течений является ветер. В соответствии с изменением его скорости ветровые (дрейфовые) течения усиливаются в мае, ослабевают в июне – августе и вновь усиливаются осенью, достигая максимального развития в декабре. В период особенно сильных ветров возникают сгонно-нагонные явления, когда происходит перемещение поверхностных вод, приводящее к изменению уровня примерно на 10 см. Летом и осенью сгоны продолжаются в среднем около 40 ч, а зимой – около 35 ч; нагоны – 44 и 40 ч. Кроме того, на Байкале, так же как в морях и океанах, формируются геострофические течения – стационарные течения,

сохраняющие свои основные черты (положение, направление, скорость) на протяжении длительного времени. Они вызваны различием в температуре (плотности) прибрежных и озерных вод, отклоняющими силами вращения Земли и другими факторами. В оз. Байкал эти течения охватывают как все озеро, так и отдельные котловины и действуют в течение всего года (рисунок 2.2).

Самые большие скорости течений наблюдаются в верхних слоях озера – в эпилимнионе, иногда ниже термоклина. Их средние скорости здесь составляют до десятков сантиметров в секунду, усиливаясь от летних месяцев к осенним. Максимальная зафиксированная при очень сильном ветре скорость у поверхности может превышать 1 м/с. Вторичный максимум скорости отмечается ниже термоклина, причем осенью по величине он часто превышает приповерхностный максимум. С глубиной под влиянием трения слоев воды и турбулентных процессов энергия ветровых течений постепенно затухает.

3. ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ОЗ. БАЙКАЛ И ФАКТОРЫ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

3.1. Характеристики ледостава

Из-за большого объема водной массы оз. Байкал долго сохраняет тепло. Формирование устойчивого ледяного покрова первоначально происходит в

мелководных заливах. В глубоководных частях Северной и Центральной котловин озера ледостав наступает в первых числах января, а в Южной котловине – в середине января.

В Северной котловине вскрытие происходит в начале июня, в Центральной – в конце мая, а в Южной – в середине мая. Окончательное вскрытие и разрушение ледяного покрова начинается на юго-западном побережье в районе мысов Б. Кадильный и М. Кадильный. Здесь еще в конце марта – начале апреля образуются многочисленные закраины, которые, соединяясь, формируют большую полынью.

В Южной котловине Байкал покрыт льдом 4-4.5 месяца, а в Северной – 6-6.5 месяца.

Глобальное потепление климата отразилось на ледовом режиме Байкала. За последние 100 лет в Южном Байкале (пос. Листвянка) продолжительность зимнего ледостава сократилась на 18 сут в результате запаздывания сроков замерзания (на 11 сут) и более раннего вскрытия ледяного покрова (на 7 сут). Результаты наблюдений с 1950 г. показывают, что толщина льда уменьшается в среднем на 2.3 см за каждые 10 лет [3].

3.1.1. Толщина льда

Максимальная толщина льда в конце марта-начале апреля обычно достигает 70-90 см. В разные годы в Южной котловине озера она может меняться от 50 до 130 см, а в Северной котловине до 130-140 см. Обычно более толстый лед образуется в малозаснеженных прибрежных западных районах и на севере озера, уменьшаясь к заснеженным районам у восточного побережья.

При толщине снежного покрова в 0 см толщина льда – 1 м; при 1-10 см – 86 см; при 11-20 см – 80 см; при 21-40 см – 77 см; при 41-60 см – 60 см; при 60-80 см – 58 см [3].

3.2. Факторы формирования ледового режима

3.2.1. Климатические факторы формирования ледового режима

Основным метеорологическим фактором, влияющим на ледовые процессы, является температура воздуха в месяцы холодного полугодия. Так, сроки замерзания тесно связаны с температурой воздуха в ноябре-декабре, которая определяет интенсивность потерь тепла с водной поверхности и скорость выхолаживания верхнего слоя воды.

Наряду с общим трендом в изменении ледовых характеристик от года к году отмечаются колебания, вызываемые процессами циркуляции атмосферы. При значительном усилении западного переноса воздушных масс, приносящего более теплый воздух Атлантики, замерзание наступает очень поздно (в конце января и даже начале февраля). При ослаблении этих процессов замерзание происходит в ранние сроки.

После замерзания под влиянием колебаний температуры воздуха в ледяном покрове образуются становые щели. Они проходят вдоль берегов, а также поперек озера, расчлняя ледяной покров на отдельные крупные (в десятки километров) блоки. Концентрация становых щелей обычно наблюдается вблизи крупных мысов и в отдельных заливах. Основные деформации ледяного покрова зимой на становых щелях вызываются растяжением и сжатием льда при изменении температуры воздуха, а также при сильных ветрах. В некоторые годы становые щели сохраняются весь ледовый период, они постоянно двигаются, и их ширина может составлять несколько десятков метров.

3.2.2. Морфометрические особенности и ледовый режим

Морфометрические особенности Байкала заключаются в том, что озеро делится на три существенно различающиеся котловины: Северную, Центральную и Южную. Северная котловина имеет наименьшие глубины и ящикообразную форму. Из-за малого объема воды происходит быстрое остывание и наступление ледостава. Центральная котловина имеет максимальные глубины и объем воды. Между Северной и Центральной котловинами более четкая граница в виде о. Ольхон и Академического хребта.

В Южной и Северной котловинах западные склоны значительно круче восточных.

4. МАТЕРИАЛЫ И ИХ ОБРАБОТКА

4.1. Гидрометеорологические посты и станции

В работе использовались данные по следующим постам: в Северной котловине – ст. Нижнеангарск и Байкальское; в Центральной – ст. Узур; в Южной – пос. Листвянка и ст. Бабушкин (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Расположение станций

Станция Нижнеангарск

Водпост расположен в п. Нижнеангарск, в 1 км к юго-западу от устья р. Кичеры. В районе поста берег представлен уступом нижней плоской террасы высотой 5-6 м; сложен аллювиальными отложениями из гальки и песка. Дно озера в прибрежной части валунно-галечное, с удалением от берега переходит в песчано-илистое. В декабре ежегодно наблюдается образование

донного льда до глубины 2-х м, способствующего скоплению шуги в районе поста Нижнеангарск.

Станция Байкальское

Водпост расположен на окраине с. Байкальское в неглубокой губе. С северо-востока расположен высокий (100-150 м) скалистый мыс Лударь, отвесно обрывающийся к берегу оз. Байкал, а с юга – залесенным мысом в устье р. Рель. В створе водпоста берег представлен высоким (20 м) крутым уступом террасы, у подошвы которого выделяется неширокий галечный приплесок.

Станция Узур

Водпост расположен в северо-восточной части о. Ольхон на восточном берегу. Прилегающая местность гористая, с высотами 300-350 м. В районе водпоста оз. Байкал образует небольшую бухту с плавно очерченными, крутыми берегами высотой 50-200 м. Дно в районе водпоста устойчивое.

Станция Бабушкин

Водпост расположен на юго-восточном побережье оз. Байкал в г. Бабушкин, на берегу обширного невысокого мыса, вдающегося в озеро. В районе поста берег пологий, 20-ти метровая изобата проходит в 2-3 км от берега: сложен из песка и гальки. Дно озера ровное, каменисто-галечное [10].

4.2. Исходные данные

Использовались данные о средней месячной температуре воздуха, температуре поверхности воды, датах вскрытия и замерзания и толщине льда (приложения А) по следующим постам: в Северной котловине – ст. Нижнеангарск и Байкальское; в Центральной – ст. Узур; в Южной – пос. Листвянка и ст. Бабушкин. Длительность наблюдений представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Продолжительность рядов исходных данных

Станция	Температура	Температура	Даты	Даты	Толщина
---------	-------------	-------------	------	------	---------

	воздуха, годы	пов. воды, годы	замерзания, годы	вскрытия, годы	льды, годы
Нижнеангарск	1933–2015	1941–2010	1950–2014	1951–2015	1952–2014
Байкальское	—	1960–2014	1950–2014	1951–2015	1959–2004
Узур	1952–2015	1957–2014	1950–2014	1951–2015	1953–2014
Листвянка	1950–2014	1941–2014	1869–2015	1869–2015	1950–2014

4.3. Статистическая обработка исходных данных

На первом этапе были оценены средние значения и другие статистические характеристики рядов значений температур воздуха и поверхности воды за безледоставный совместный период наблюдений.

Для анализа использовались данные средних месячных температур поверхности воды и средних месячных температур воздуха с постов: в Северной котловине – ст. Байкальское, в Центральной – ст. Узур, в Южной – ст. Листвянка.

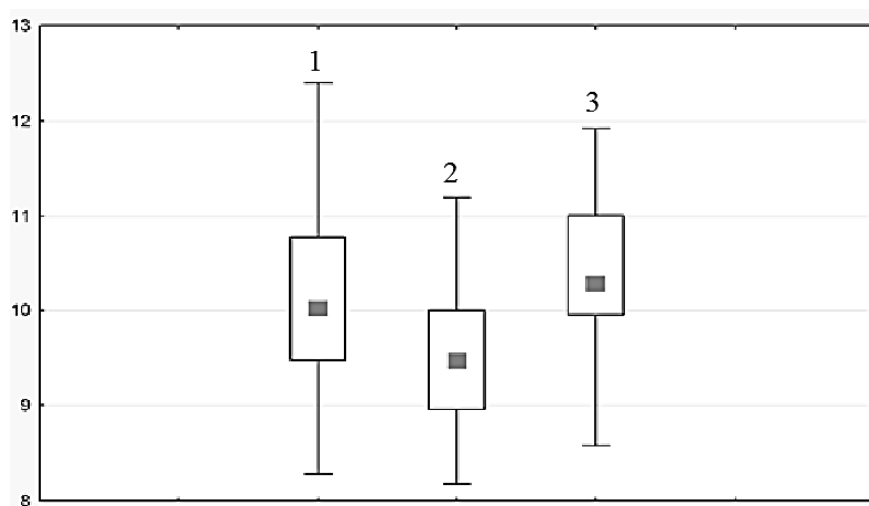


Рисунок 4.1 – Средняя многолетняя температура воздуха, °С
1 – Байкальское; 2 – Узур; 3 – Листвянка.

Самой холодной является Центральная котловина, что объясняется особенностями ее морфометрии. Ожидаемо, дисперсия выше в Северной котловине, что объясняется ее континентальностью (рисунок 4.1).

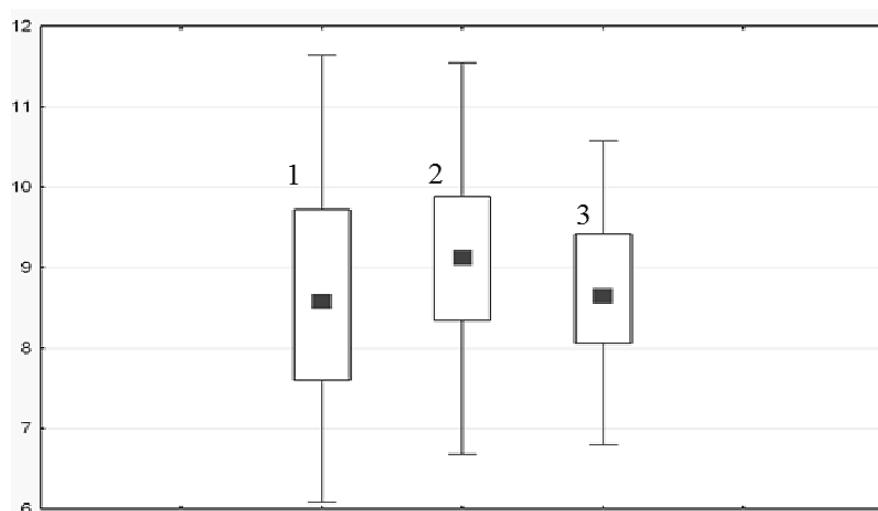


Рисунок 4.2 – Средняя многолетняя температура поверхности воды, ° С
1 – Байкальское; 2 – Узур; 3 – Листвянка.

Дисперсия температуры поверхности воды так же наибольшая в Северной котловине, что объясняется ее континентальностью и не значительной тепловой инерцией, обусловленной мелководность. Обращает внимание то, что по температуре воздуха самой холодной является Центральная котловина, а по температуре воздуха она самая теплая.

4.3.1. Проверка рядов на однородность

Проверка рядов на однородность выполнена по критерию Стьюдента и критерию Фишера.

Критерий Фишера используется для проверки однородности гидрологических рядов по дисперсии. Исходные ряды были разделены на две равные части, затем оценена дисперсия для каждой из частей рядов, и вычислены эмпирические значения статистик Фишера $F^* = \frac{D_1}{D_2}$, где $D_1 > D_2$.

Полученные значения F^* сравнены с табличными значениями F_t . Если при принятом уровне значимости оказывается, что $F^* < F_t$, то расхождение дисперсий считается незначимым и гипотеза об однородности рядов по дисперсии не опровергается.

Критерии Фишера и Стьюдента относятся к категории стандартных критериев и рекомендуются в большинстве нормативных документов в качестве официальных тестов на однородность [4].

Проверка по критерию Стьюдента заключается в следующем.

Исходный ряд делится на две части. Для каждой части ряда находится $Q_{\text{ср}}$, D , σ .

Вычисляется эмпирическое значение статистики Стьюдента.

$$t^* = \left[\frac{(Q_1 - Q_2)}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}} \right] * \sqrt{\frac{n_1 * n_2}{n_1 + n_2}} \quad (4.1)$$

где Q_1 – средний расход воды в первой части ряда;

Q_2 – средний расход воды во второй части ряда;

n_1 – длина первой части ряда;

n_2 – длина второй части ряда;

σ_1 – среднее квадратическое отклонение первой части ряда;

σ_2 – среднее квадратическое отклонение второй части ряда.

Полученное значение t^* сравнивается с табличным значением t_t . Если при принятом уровне значимости оказывается, что $t^* < t_t$, то гипотеза об однородности ряда по среднему значению не опровергается [4].

Результаты проверки рядов исходных данных по критериям Фишера и Стьюдента представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты проверки рядов на однородность

Станция	Критерий	Темпера- тура воздуха	Темпера- тура воды	Дата замерзания	Дата вскрытия	Толщина льда
Узур	Стьюдент	не однороден	не однороден	однороден	не однороден	не однороден
	Фишер	однороден	однороден	однороден	однороден	не однороден
Нижнеангарск	Стьюдент	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден
	Фишер	не однороден	не однороден	однороден	однороден	однороден
Листвянка	Стьюдент	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден

Продолжение таблицы 4.2

	Фишер	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Байкальское	Стьюдент	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	однороден
	Фишер	не однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

По критерию Стьюдента ряды температур воздуха, температур поверхности воды и дат замерзания не однородны на всех станциях. Для ст. Нижнеангарск и Листвянка ряды не однородны по всем характеристикам.

По критерию Фишера для ст. Узур не однороден ряд толщины льда. Для ст. Листвянка ряды по всем характеристикам однородны. Ряды дат замерзания и дат вскрытия однородны на всех станциях.

4.3.2. Выявление трендов и оценка их значимости

В практике гидрологических расчетов наиболее часто используется критерий значимости коэффициента корреляции:

$$R < \sigma_R t_{2\alpha} \quad (4.2)$$

где R — коэффициент корреляции;

σ_R — абсолютная погрешность коэффициента корреляции;

$t_{2\alpha}$ – нормированная ордината нормального закона распределения при уровне значимости 2α .

Результаты проверки рядов по критерию значимости коэффициента корреляции представлены в таблице 4.3.

Тренд значим на всех станциях почти для всех характеристик. На ст. Нижнеангарск, Байкальское и Узур тренд не значим только для ряда толщины льда. На ст. Листвянка тренд не значим для ряда температуры воды.

Таблица 4.3 – Оценка значимости трендов

Станция	Характеристика	R	σR	$2\sigma R$	значимость
Нижнеангарск	температура воздуха	0,53	0,08	0,16	значим
	температура пов. воды	0,59	0,08	0,16	значим
	дата замерзания	0,24	0,12	0,24	значим
	дата вскрытия	0,55	0,09	0,17	значим
	толщина льда	0,23	0,12	0,24	не значим
Байкальское	температура пов. воды	0,57	0,09	0,18	значим
	дата замерзания	0,27	0,12	0,23	значим
	дата вскрытия	0,67	0,07	0,14	значим
	толщина льда	0,18	0,14	0,29	не значим
Узур	Температура воздуха	0,67	0,07	0,14	значим
	температура пов. воды	0,64	0,08	0,16	значим
	дата замерзания	0,16	0,13	0,27	не значим
	дата вскрытия	0,53	0,09	0,18	значим
	толщина льда	0,23	0,12	0,24	не значим
Листвянка	температура воздуха	0,47	0,10	0,20	значим
	температура пов. воды	0,18	0,11	0,22	не значим
	дата замерзания	0,43	0,07	0,13	значим
	дата вскрытия	0,38	0,07	0,14	значим
	толщина льда	0,26	0,12	0,23	значим

4.3.3. Сглаживание рядов

Простейшим статистическим фильтром, или фильтрующей функцией, является скользящая средняя с равными весами. Скользящее среднее рассчитывается путем суммирования n последовательных величин временного ряда и делением полученной суммы на n . При расчете этих средних используются данные с обеих сторон сглаживаемых значений ряда так, что

величины, использованные для расчетов соседних скользящих средних, значительно перекрываются. Поэтому такой тип скользящих средних называют также перекрывающимися средними [4].

В качестве исходных данных были использованы ряды средних годовых температур воздуха и поверхности воды трех станций: Нижнеангарск, Узур и Листвянка.

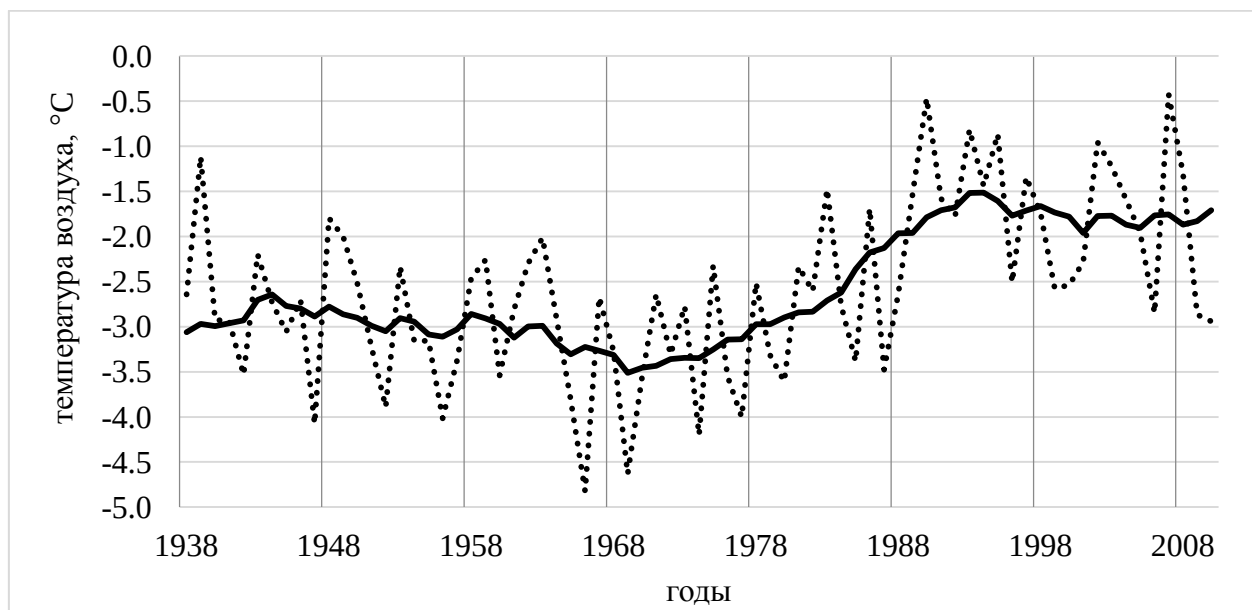


Рисунок 4.3 – Температура воздуха на ст. Нижнеангарск: фактический и сглаженный ряд

В период 1938-1960 гг. (два 11-летних периода) наблюдается медленное понижение температуры воздуха, а с 1970 г. до 1994 г. (примерно два 11-летних периода) она повышается. Однако после 1995 г. – стабилизировалась.

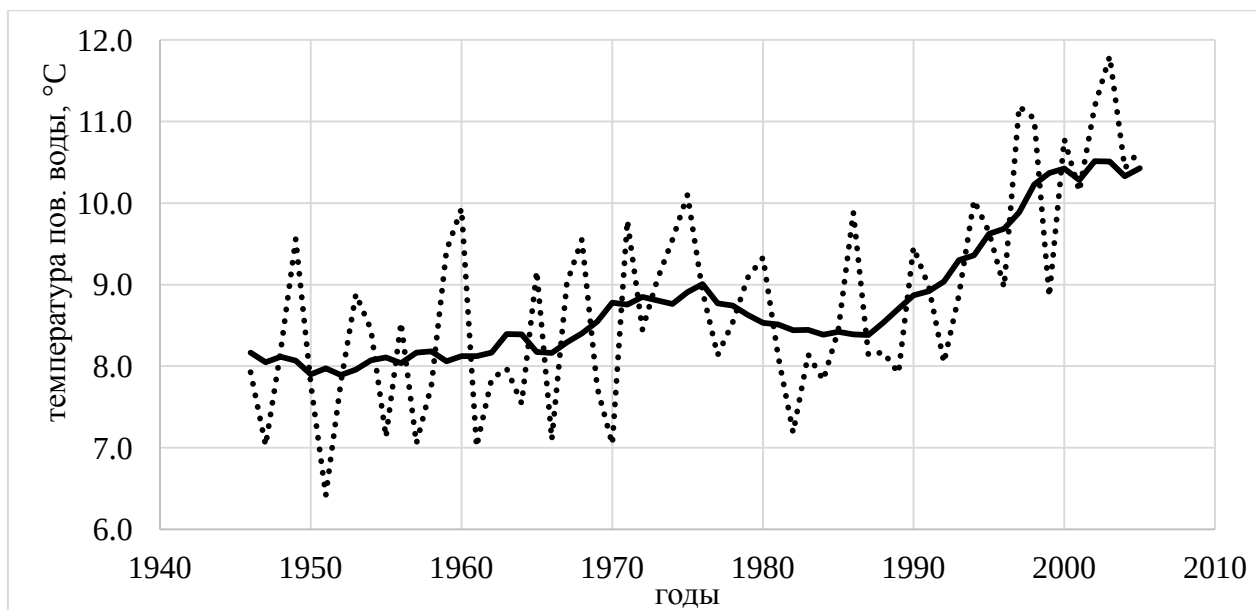


Рисунок 4.4 – Температура поверхности воды на ст. Нижнеангарск: фактический и сглаженный ряд

В течение 1946-1968 гг. (два 11-летних периода) стабильная температура поверхности воды. В период 1988-2000 гг. (11-летний период) наблюдается резкое повышение. Температура поверхности воды начинает повышаться на 18 лет позже температуры воздуха.

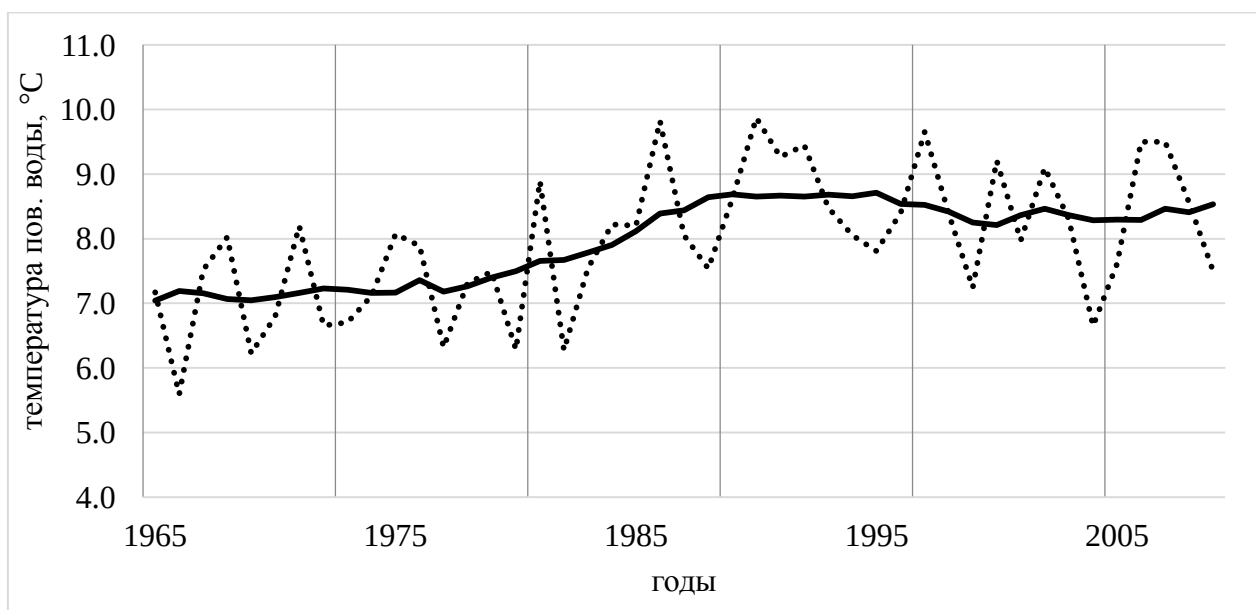


Рисунок 4.5 – Температура поверхности воды на ст. Байкальское: фактический и сглаженный ряд

В течение 1965-1976 гг. (11-летний период) стабильная температура поверхности воды. В период 1977-1988 гг. (11-летний период) наблюдается повышение. Ход температуры воды на ст. Байкальское более плавный, чем на ст. Нижнеангарск.

В период 1957-1968 гг. (11-летний период) наблюдается медленное понижение температуры воздуха, а с 1969 г. до 1994 г. (примерно два 11-летних периода) она повышается. Однако после 1995 г. – стабилизируется.

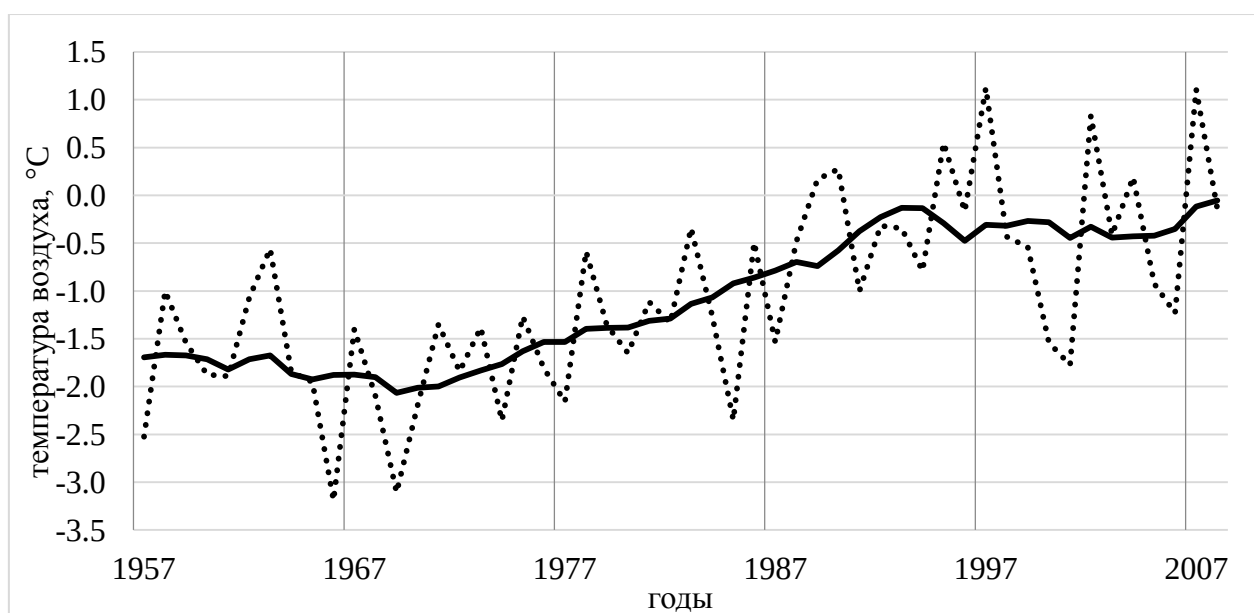


Рисунок 4.6 – Температура воздуха на ст. Узур: фактический и сглаженный ряд

В течение 1962-1971 гг. (примерно 11-летний период) стабильная температура поверхности воды. В период 1972-1994 гг. (два 11-летних периода) наблюдается повышение. Однако после 1995 г. заметно ее незначительное понижение.

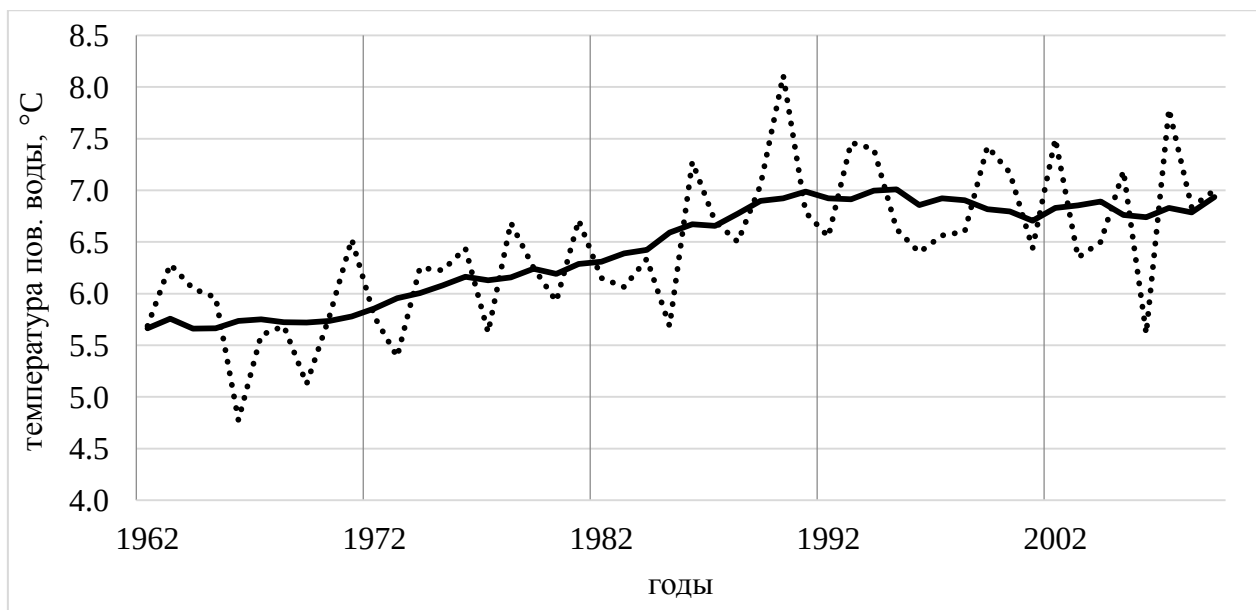


Рисунок 4.7 – Температура поверхности воды на ст. Узур: фактический и сглаженный ряд

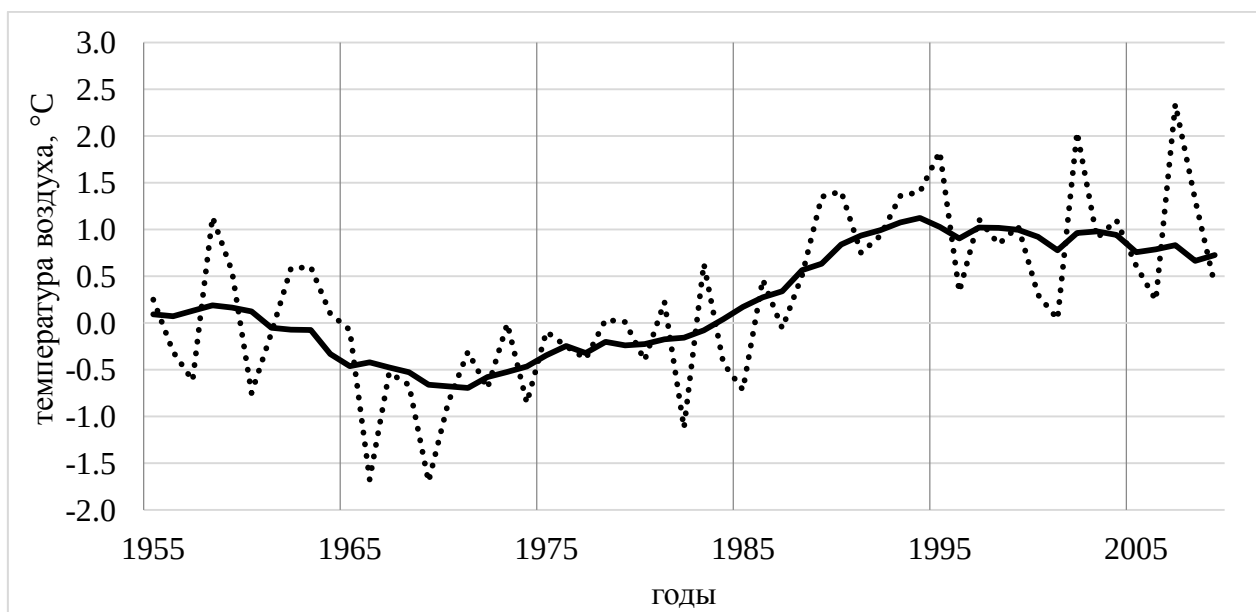


Рисунок 4.8 – Температура воздуха на ст. Бабушкин: фактический и сглаженный ряд

В период 1955-1972 гг. (почти 11-летний период) наблюдается медленное понижение температуры воздуха, а с 1973 г. до 1994 г. (примерно два 11-летних периода) она повышается. Однако после 1995 г. заметно ее незначительное понижение.

В течение 1949-1971 гг. (два 11-летних периода) наблюдается медленное понижение температуры поверхности воды. В период 1972-1994 гг. (два 11-летних периода) наблюдается постепенное ее повышение. Однако с 1995 г. заметно ее значительное понижение.

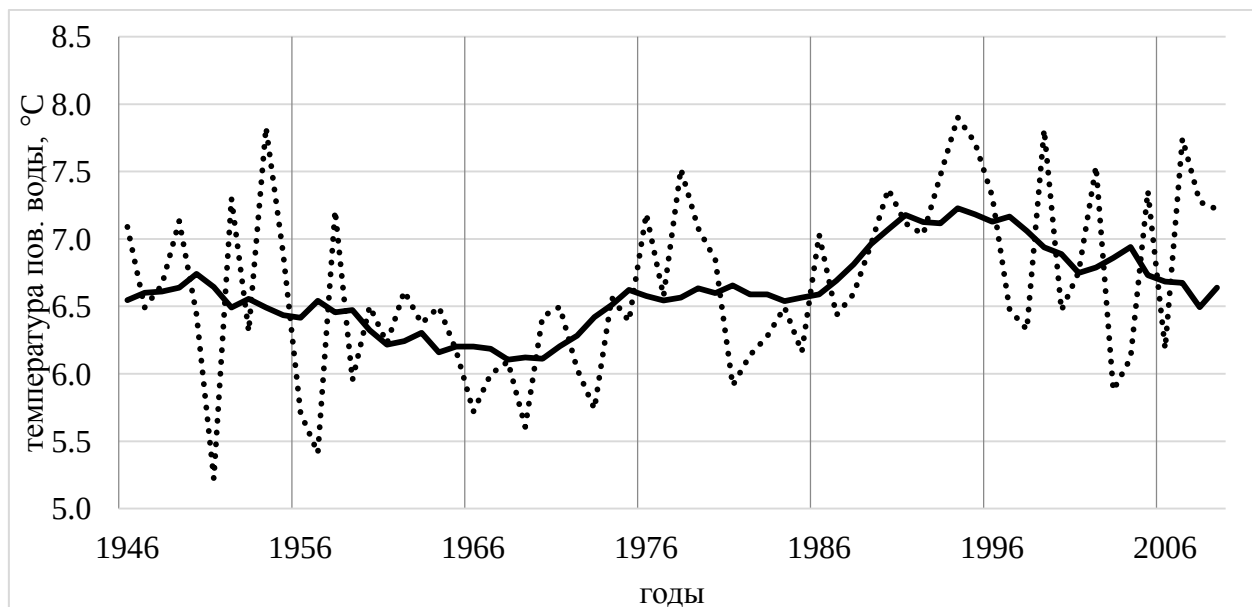


Рисунок 4.9 – Температура поверхности воды на ст. Листвянка: фактический и сглаженный ряд

К сожалению, имеющиеся данные не позволяют выполнить совместный анализ хода температур поверхности воды и воздуха в Южной котловине с той степенью надежности, какой бы хотелось.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВО-ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ИХ АНАЛИЗ

Весь ряд характеристик был разбит на два периода: с начала наблюдений по 1989 г. и с 1990 по 2015 гг. Для каждого периода и каждой котловины рассчитывались средние значения всех исследуемых характеристик. Изменение характеристик оценивалось сравнением их средних значений за указанные периоды.

5.1. Изменения в Северной котловине

Для анализа использовались данные о температуре воздуха, поверхности воды, датах вскрытия и замерзания, толщине льда на ст. Нижнеангарск. Данные ст. Байкальское не использовались из-за отсутствия данных о температуре воздуха.

5.1.1. Изменение температуры воздуха

Средняя годовая температура воздуха за период 1950-1989 гг. составила -3.02°C . За период 1990-2015 гг. значение составило -1.64°C . Таким образом, температура воздуха повысилась на 1.39°C .

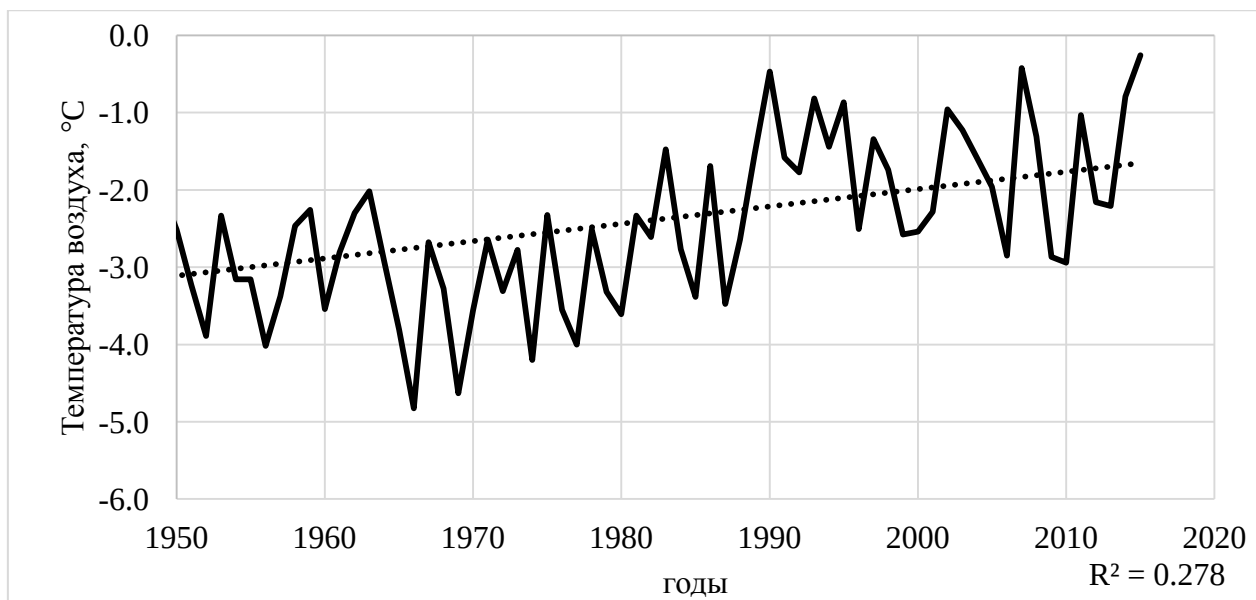


Рисунок 5.1 – Хронологический ход средней годовой температуры воздуха на ст. Нижнеангарск

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом средней годовой температуры воздуха на ст. Нижнеангарск (рисунок 5.1). Следует отметить, что в других котловинах наблюдается меньшее изменение температуры воздуха.

5.1.2. Изменение температуры поверхности воды

Средняя годовая температура поверхности воды за период 1950-1989 гг. составила 8.35°C . За период 1990-2010 гг. температура составила 10.05°C . Таким образом, температура поверхности воды повысилась на 1.70°C .

Температура поверхности воды определяется не только климатическими характеристиками. В данном случае большое воздействие оказывает морфометрия. Так, изменение температуры поверхности воды значительнее, чем в других котловинах. Это объясняется тем, что она самая мелководная, в ней самый малый запас воды и она обладает меньшей тепловой инерцией. Поэтому повышение температуры воздуха сильнее сказывается на повышении температуры поверхности воды. Результаты расчета подтверждаются

хронологическим ходом средней годовой температуры поверхности воды на ст. Нижнеангарск (рисунок 5.2).

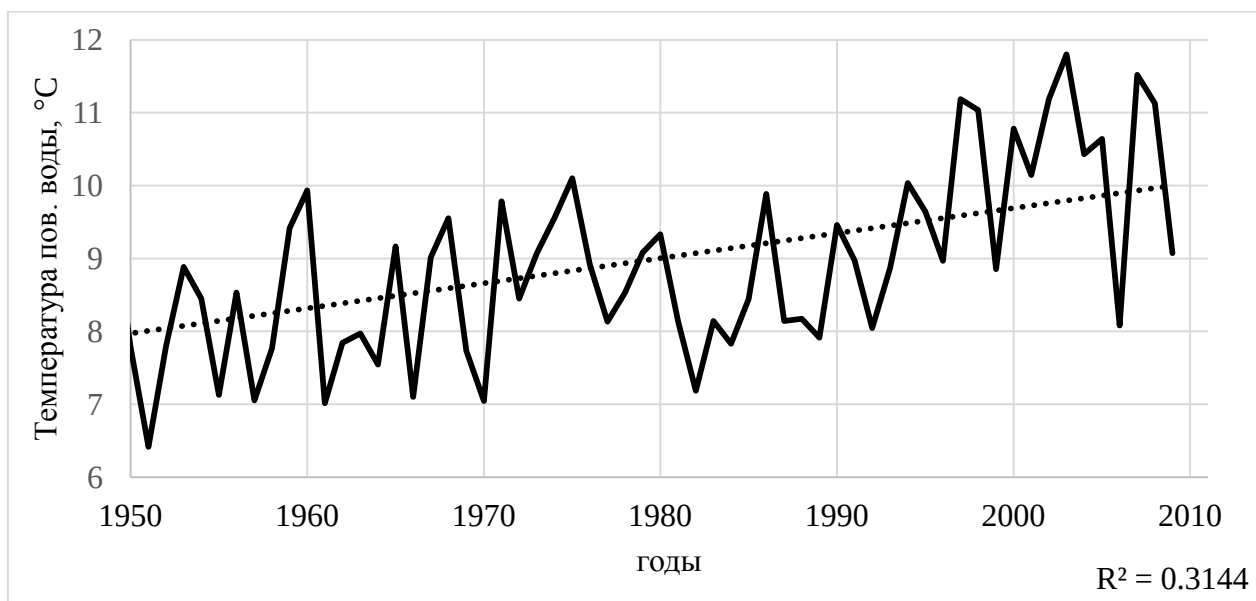


Рисунок 5.2 – Хронологический ход средней годовой температуры поверхности воды на ст. Нижнеангарск

5.1.3. Изменение дат замерзания и вскрытия

Средняя многолетняя дата замерзания с 1950 по 1989 гг. составила четвертое января. За период 1990-2014 гг. дата составила десятое января. Таким образом, в Северной котловине ледостав устанавливается на шесть дней позже.

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом дат замерзания на ст. Нижнеангарск (рисунок 5.3) и соответствуют изменениям температуры воздуха и воды.

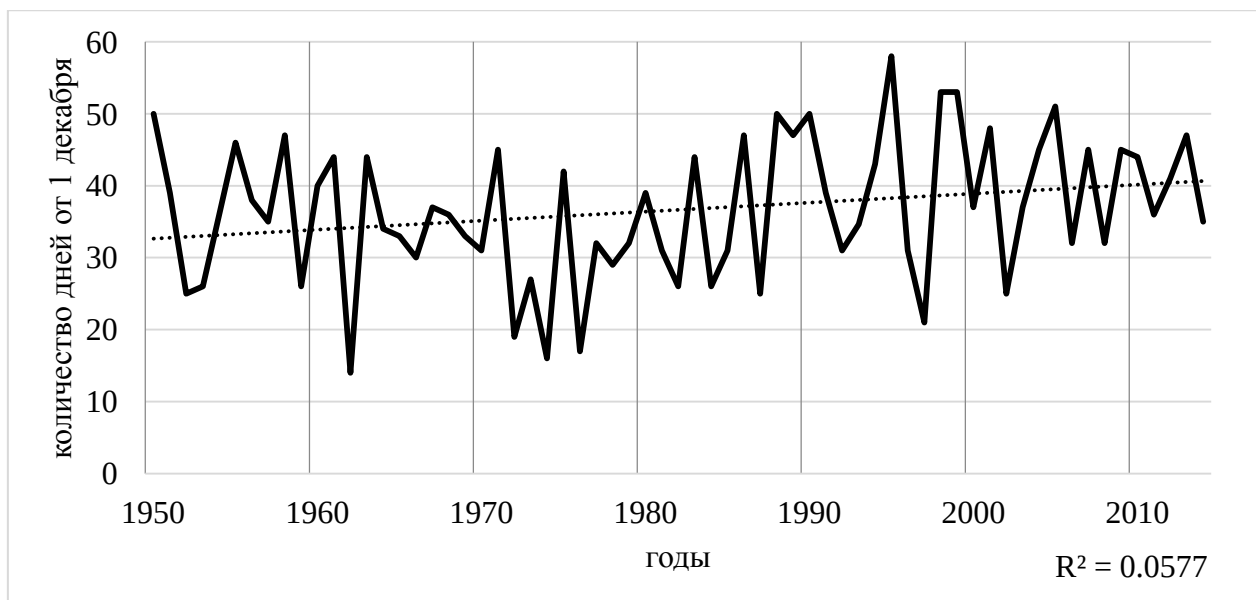


Рисунок 5.3 – Хронологический ход дат замерзания на ст. Нижнеангарск

Средняя многолетняя дата вскрытия с 1951 по 1989 гг. составила двадцать седьмое мая. За период 1990-2015 гг. дата составила девятнадцатое мая. Таким образом, озеро вскрывается на восемь дней раньше.

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом дат вскрытия на ст. Нижнеангарск (рисунок 5.4); такие результаты вполне объяснимы при значительном изменении температуры воздуха.

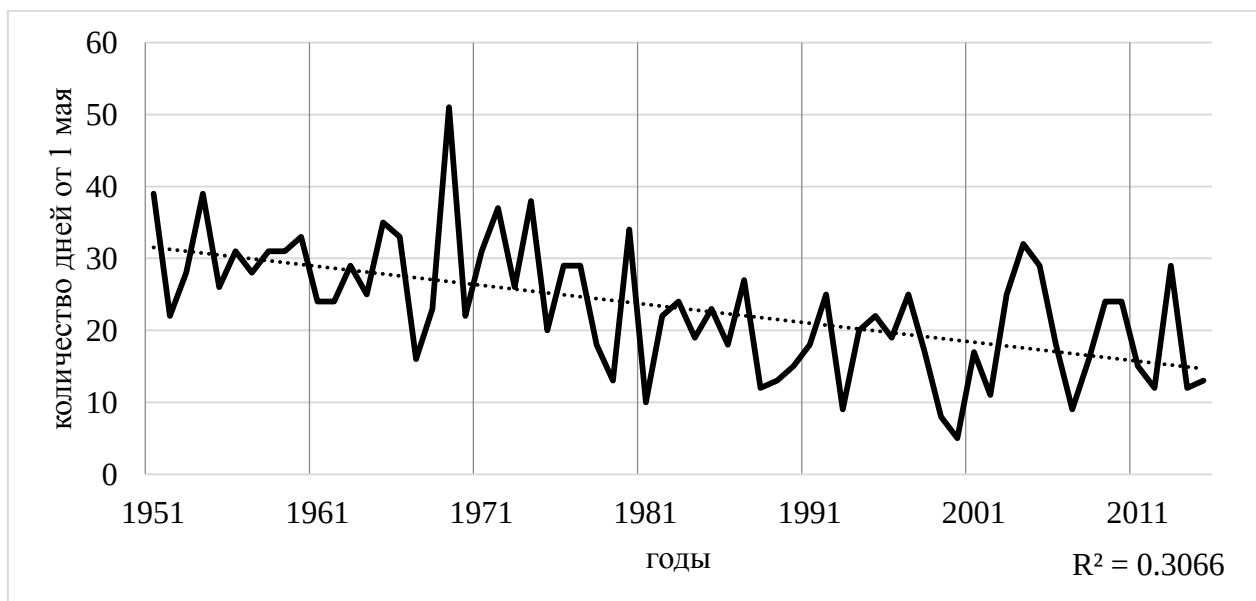


Рисунок 5.4 – Хронологический ход дат вскрытия на ст. Нижнеангарск

5.1.4. Изменение толщины льда

Средняя многолетняя толщина льда за период 1952-1989 гг. составила 101 см, а период 1990-2014 гг. – 89 см. Таким образом, толщина льда уменьшилась на 12 см.

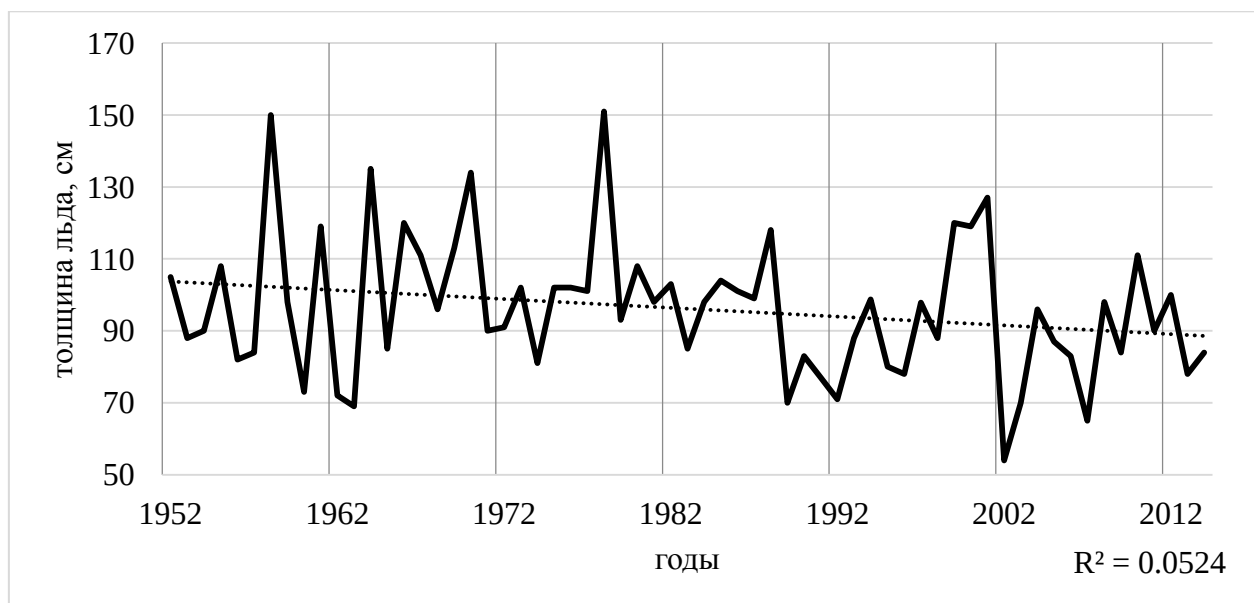


Рисунок 5.5 – Хронологический ход толщины льда на ст. Нижнеангарск

В Северной котловине наблюдается самое значительное изменение толщины льда. Это обусловлено как наибольшим, по сравнению с другими котловинами, повышением температуры воздуха, так и ее меньшей тепловой инерцией, обусловленной мелководностью.

5.2. Изменения в Центральной котловине

Для анализа использовались данные о температуре воздуха, поверхности воды, датах вскрытия и замерзания, толщине льда на ст. Узур, расположенной на острове Ольхон.

5.2.1. Изменение температуры воздуха

Средняя годовая температура воздуха за период 1952-1989 гг. составила -1.57°C , а период 1990-2015 гг. составила -1.27°C . Таким образом, температура воздуха повысилась на 1.30°C .

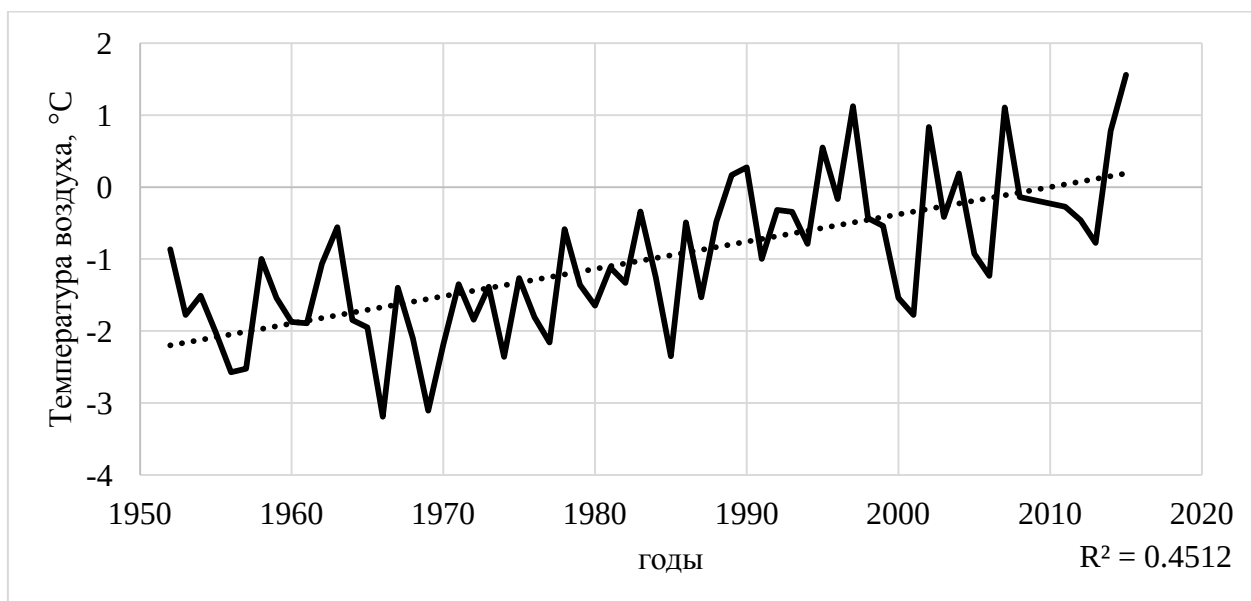


Рисунок 5.6 – Хронологический ход средней годовой температуры воздуха на ст. Узур

Результаты расчета подтверждаются графиком хронологического хода средней годовой температуры воздуха на ст. Узур (рисунок 5.6). Гидрометеорологические параметры зависят не только от зональных характеристик, но и от места положения станции: на острове, в глубоководной части Байкала. С 1994 г. увеличилась амплитуда колебания температуры воздуха.

5.2.2. Изменение температуры поверхности воды

Средняя годовая температура поверхности воды за период 1957-1989 гг. составила 6.01°C ; за период 1990-2014 гг. она составила 6.94°C . Таким образом, температура поверхности воды повысилась на 0.93°C .

Тепловая инерция большего объема водной массы этой котловины обуславливает не столь сильное изменение температуры поверхности воды.

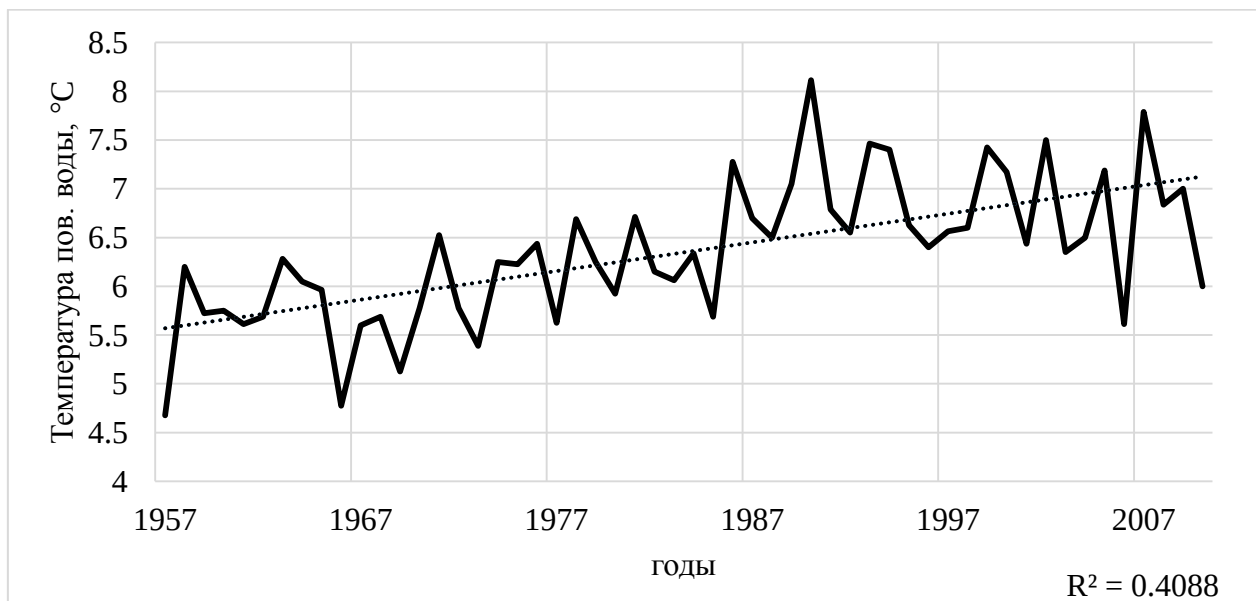


Рисунок 5.7 – Хронологический ход средней годовой температуры поверхности воды на ст. Узур

5.2.3. Изменение дат замерзания и вскрытия озера

Средняя многолетняя дата замерзания с 1950 по 1989 гг. составила девятое января; а за период 1990-2014 гг. – одиннадцатое января. Таким образом, озеро замерзает на 2 дня позже.

Результаты расчета подтверждаются графиком хронологического хода дат замерзания на ст. Узур (рисунок 5.8). За весь период наблюдается большая амплитуда колебания даты замерзания, несмотря на то, что котловина является самой тепло-инертной. Так же на более позднее замерзание влияет сильное ветровое волнение.

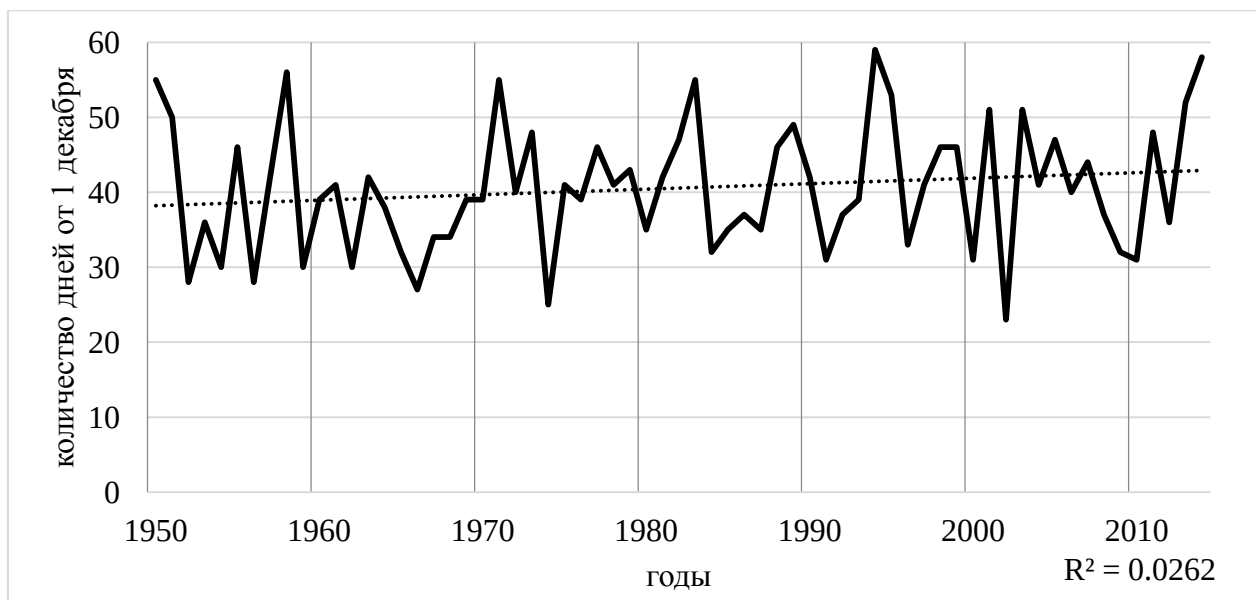


Рисунок 5.8 – Хронологический ход дат замерзания на ст. Узур

Средняя многолетняя дата вскрытия с 1951 по 1989 гг. составила двенадцатое мая, а за период 1990-2015 гг. – четвертое мая, таким образом, озеро вскрывается на 8 дней раньше.

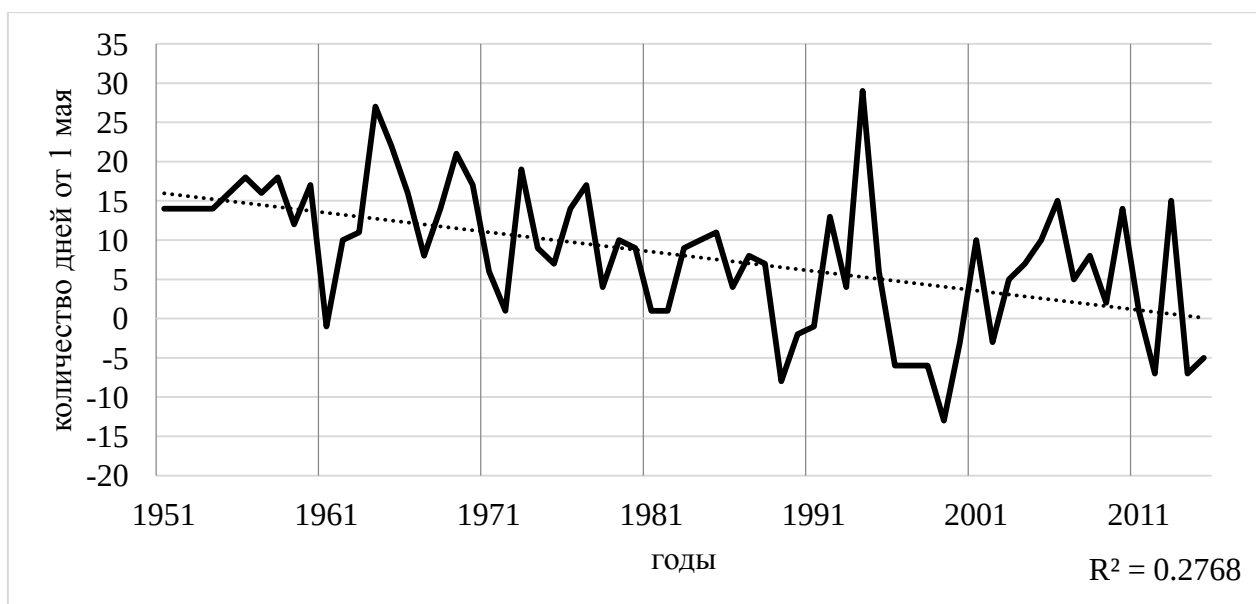


Рисунок 5.9 – Хронологический ход дат вскрытия на ст. Узур

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом дат вскрытия на ст. Узур (рисунок 5.9). С 1989 г. повысилась амплитуда колебания. На вскрытие влияют местные факторы, например, наличие скал – у

скалистых берегов быстрое течение и режим выпадения твердых осадков – увеличение количества снега уменьшает толщину льда.

5.2.4. Изменение толщины льда

Средняя многолетняя толщина льда с 1953 по 1989 гг. составила 102 см. С 1990 по 2014 гг. – 92 см. Таким образом, толщина льда уменьшилась на 10 см.

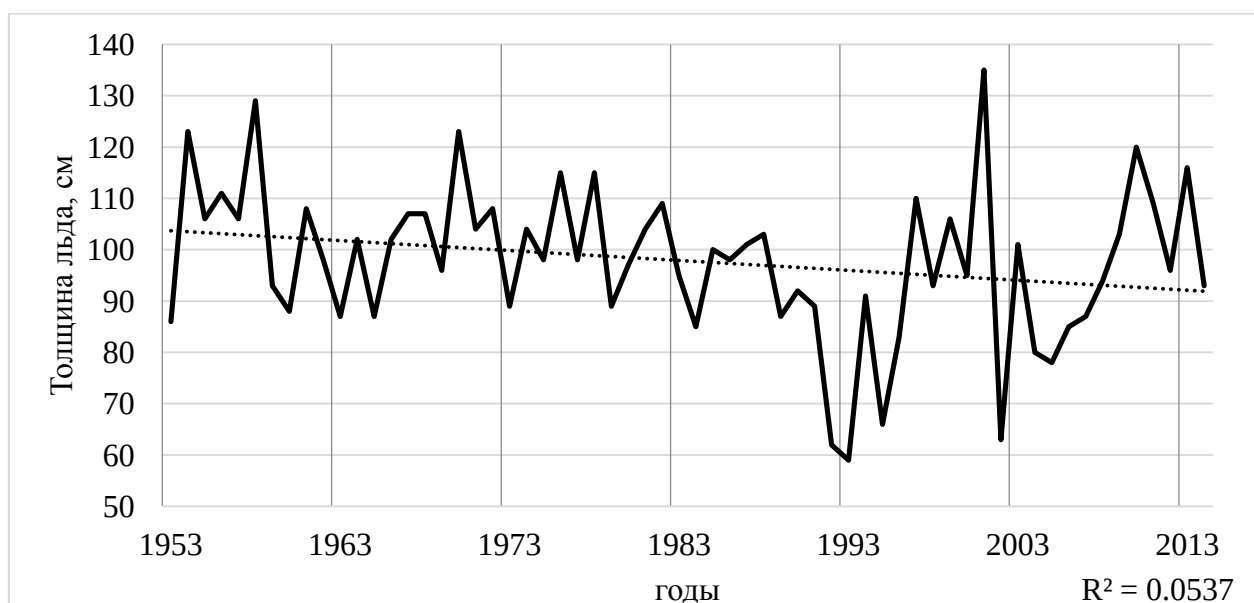


Рисунок 5.10 – Хронологический ход толщины льда на ст. Узур

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом толщины льда на ст. Узур (рисунок 5.10). С 1990 г. значительно повысилась амплитуда колебания, что подтверждается не однородностью по критерию Фишера. На толщину льда так же оказывают влияние местные факторы: ветровое волнение, наличие скал: более сильное течение и более сильный прогрев, выходы термальных вод и изменение количества твердых осадков.

5.3. Изменения в Южной котловине

Для анализа использовались данные о температуре воздуха, поверхности воды, датах вскрытия и замерзания, толщине льда ст. Листвянка и Бабушкин.

5.3.1. Изменение температуры воздуха

Средняя годовая температура воздуха за период 1950-1989 гг. составила -0.14°C , а за период 1990-2014 гг. она составила -0.89°C . Таким образом, температура воздуха повысилась на 1.03°C .

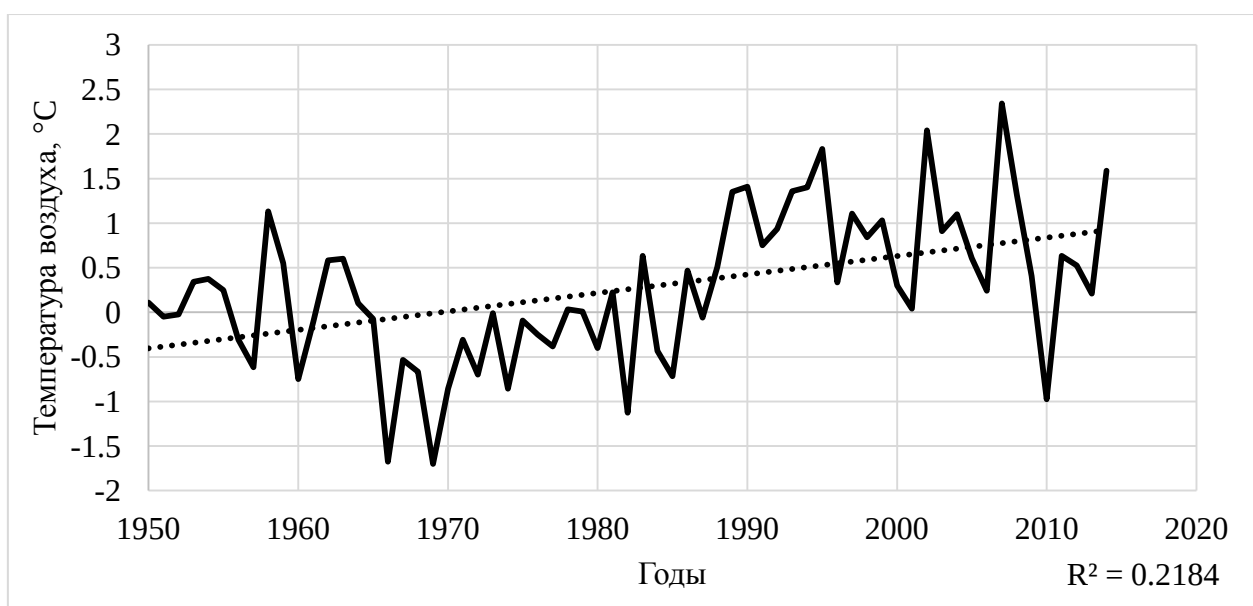


Рисунок 5.11 – Хронологический ход средней годовой температуры воздуха на ст. Бабушкин

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом средней годовой температуры воздуха на ст. Бабушкин (рисунок 5.11). Ее изменение зависит от множества факторов. Поэтому анализ затруднен.

5.3.2. Изменение температуры поверхности воды

Средняя годовая температура поверхности воды за период 1941-1989 гг. составила 6.48°C , а за период 1990-2014 гг. температура составила 6.89°C . Таким образом, температура повысилась на 0.41°C .

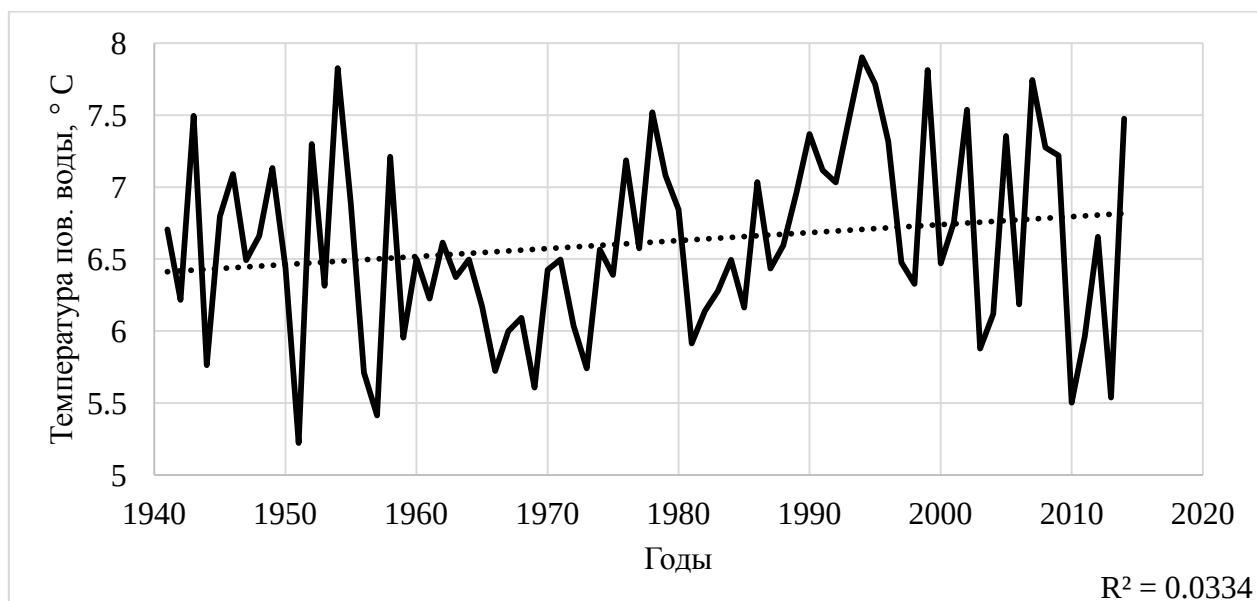


Рисунок 5.12 – Хронологический ход средней годовой температуры поверхности воды на ст. Листвянка

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом средней годовой температуры поверхности воды на ст. Листвянка (рисунок 5.12). Ее малое изменение обусловлено не столь значительным изменением температуры воздуха. Повышенная проточность и антропогенное воздействие на р. Селенга также влияют на температуру воды.

5.3.3. Изменение дат замерзания и вскрытия озера

Средняя многолетняя дата замерзания за период 1869-1989 гг. составила пятнадцатое января. С 1990 по 2014 гг. дата составила девятнадцатое января. Таким образом, озеро стало замерзать на четыре дня позже.

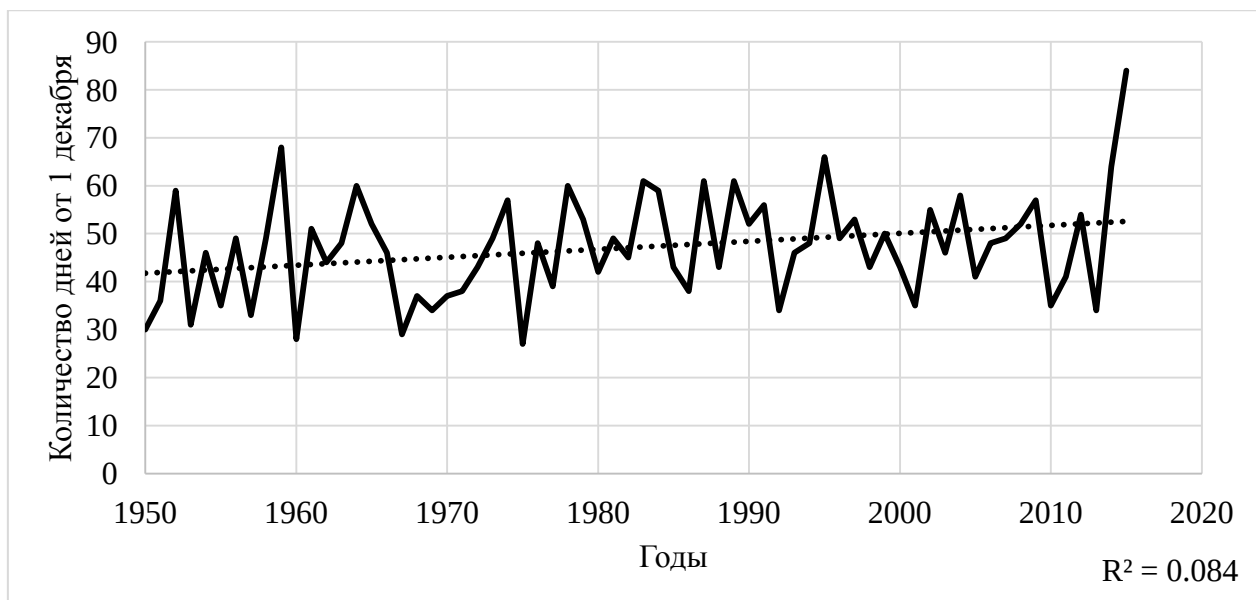


Рисунок 5.13 – Хронологический ход дат замерзания на ст. Листвянка

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом на ст. Листвянка (рисунок 5.12). На дату замерзания в Южной котловине влияет множество факторов: подледные течения, выходы термальных вод, антропогенное воздействие на р. Селенга.

Средняя многолетняя дата вскрытия за период 1950-1989 гг. составила третье мая, а за период 1990-2015 гг. она составила двадцать девятое апреля. Таким образом, озеро вскрывается на четыре дня раньше.

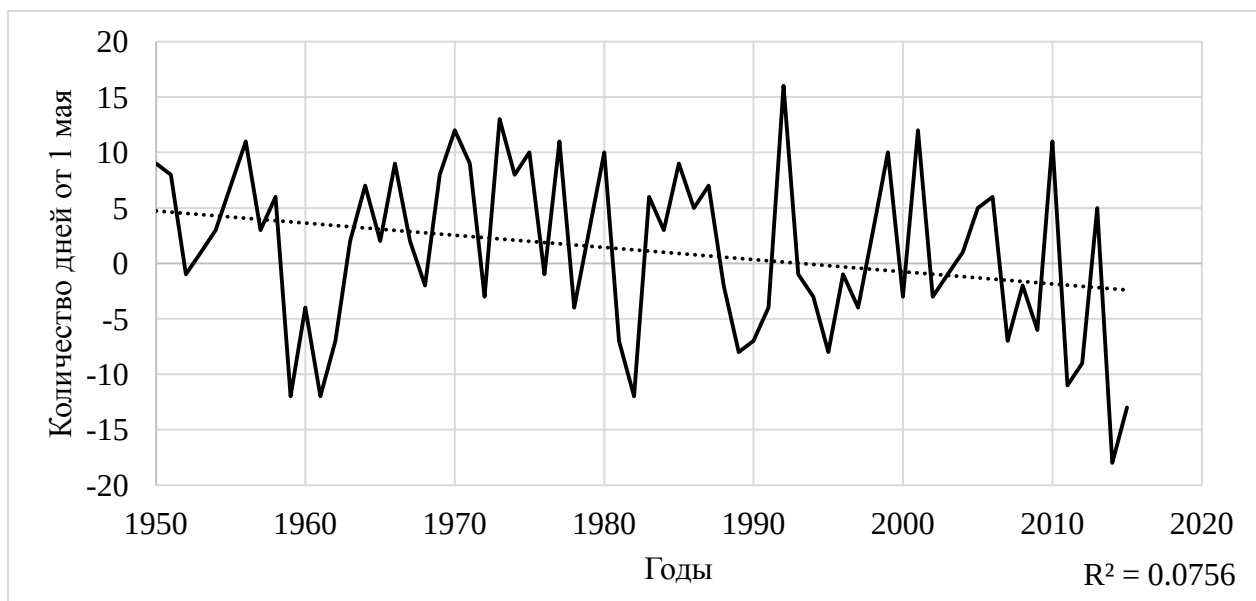


Рисунок 5.14 – Хронологический ход дат вскрытия на ст. Листвянка

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом дат вскрытия на ст. Листвянка (рисунок 5.14). На изменение даты вскрытия повлияло повышение температуры воздуха. Так при более раннем наступлении положительной температуры лед начинал раньше таять.

5.3.4. Изменение толщины льда

Средняя многолетняя толщина льда за период 1950-1989 гг. составила 88 см. За период 1990-2014 гг. – 79 см. Таким образом, толщина льда уменьшилась на 9 см.

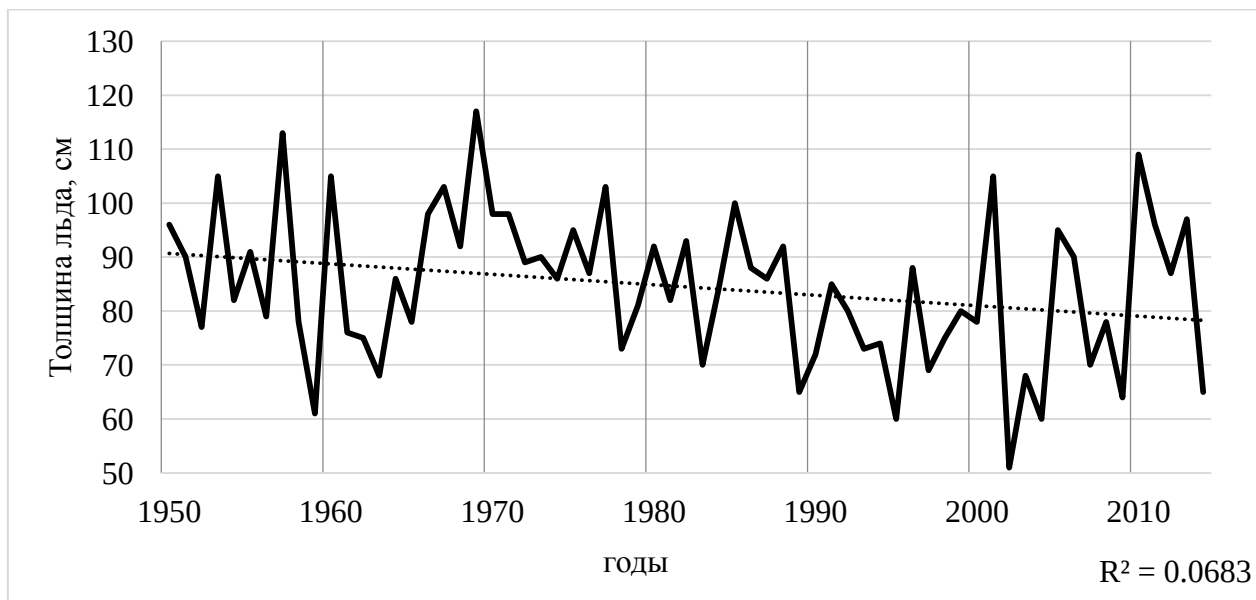


Рисунок 5.15 – Хронологический ход толщины льда на ст. Листвянка

Результаты расчета подтверждаются хронологическим ходом изменения толщины льда на ст. Листвянка (рисунок 5.14). На уменьшение толщины льда повлияли возможное изменение количества твердых осадков и антропогенное воздействие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были оценены изменения ледово-термических характеристик в трех котловинах оз. Байкал. В качестве исходных данных использовались ряды средних месячных температур воздуха, поверхности воды, дат вскрытия и замерзания и средней годовой толщины льда за период 1950-2015 гг. по станциям: Северная котловина – ст. Нижнеангарск и Байкальское, Центральная – ст. Узур, Южная – ст. Листвянка и Бабушкин. Были выделены два периода: с начала наблюдений по 1989 г. и с 1990 по 2015 гг. Общее представление о периодичности изменений температур воздуха и воды было получено в результате сглаживания их рядов методом скользящих средних ($n=11$). Можно сделать вывод, что после 1990-го года в районе Байкала уже не наблюдается заметного потепления. Кроме того, наблюдается некоторая асинхронность изменения температур воздуха и воды, что обусловлено сложным характером взаимодействия атмосферы и водной массы озера.

Статистический анализ рядов исходных данных показал их не однородность. Изменение характеристик ледово-термического режима выявлялось сравнением средних значений этих характеристик за два указанных периода.

В результате анализа удалось показать, что изменение большинства характеристик зависит не только от климатических характеристик, но и от морфометрии отдельно взятой котловины и от различных внутриозерных процессов. Так, температура воздуха повысилась практически одинаково в Северной и Центральной котловинах (на 1.38°C и 1.30°C соответственно), а вот температура поверхности воды в Северной котловине повысилась значительно (на 1.70°C), чем в других, в силу морфометрии котловины.

Влияние морфометрии четко прослеживается на изменении продолжительности ледостава: в Северной котловине она уменьшилась на четырнадцать дней, в Центральной – на десять дней, а в Южной – на восемь. Это связано с тем, что во всех котловинах замерзание происходит позже, а вскрытие – раньше. Сокращение ледоставного периода и потепление вызвало уменьшение толщины льда. В Северной котловине толщина льда уменьшилась на 12 см, что больше, чем в других котловинах. Это обусловлено наибольшим повышением температуры воздуха и сокращением периода ледостава.

Для более детального анализа причин и особенностей изменения характеристик ледово-термического режима в отдельных котловинах Байкала требуется более подробное исследование.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Русинек О.Т., Тахтеев В.В., Гладкочуб Д.П. Байкаловедение: в 2 кн. Новосибирск: Наука, 2012. – Кн 1. – 468 с.
2. Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение: учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2009. – 291 с.
3. Галазий Г.И. Байкал в вопросах и ответах. – Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство, 1984. – 368 с.
4. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ. 2007. – 279 с.
5. Верболов В.И. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал / В.И. Верболов, В.М. Сокольников, М.Н. Шимараев. – М.-Л.: Наука, 1965. – 374 с.
6. Троицкая Е.С. Многолетние изменения температуры поверхности воды в Байкале / Е.С. Троицкая, М.Н. Шимараев, В.В. Цехановский // География и природные ресурсы. – 2003. – № 2. – С. 47-50.
7. Сизова Л.Н., Куимова Л.Н., Шимараев М.Н. Влияние циркуляции атмосферы на ледово-термические процессы на Байкале в 1950-2010гг. // География и природ. ресурсы. – 2013 – № 2. – С. 74-83
8. Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал / М.Н. Шимараев; Отв. ред. А.Н. Афанасьев. – Новосибирск: Наука, 1977. – 150 с.
9. Шимараев М.Н. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии / Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В. // ДАН. – 2002. – Т. 383, № 3. – С. 397-400.
10. Гидрологический ежегодник. Т.7. вып.2-4. Бассейн Карского моря. – Иркутск, 1970. – 661 с.