



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления
прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

«Межгодовая изменчивость абиотических условий озера Байкал»

Исполнитель: Кулик Константин Владиславович

Научный руководитель: Кандидат географических наук

Хаймина Ольга Владимировна

Научный консультант: Кандидат физико-математических наук

Асламов Илья Александрович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«14» 06 2024 г.

Санкт-Петербург
2024 г.

Оглавление

Введение.....	2
1. Характеристика объекта исследования – озера Байкал	3
1.1 Районирование и геоморфология	3
1.2 Гидрологический режим	7
1.3 Течения и водообмен	9
1.4 Ветровой режим	13
1.5 Термический режим.....	15
2. Материалы и методы	18
2.1 Материалы исследования.....	18
2.2 Статистический и графический анализы пространственно-временной структуры вод озера Байкал.....	22
3. Анализ результатов.....	25
3.1 Межгодовая изменчивость температуры воздуха в районах котловин озера.....	25
3.2. Анализ температуры воды в Южном Байкале.....	28
3.3. Анализ температуры воды в Среднем Байкале.....	49
3.4. Анализ температуры воды в Северном Байкале.....	56
3.5. Сравнительный анализ температуры воды	65
3.6 Анализ взаимосвязи температур воды и воздуха	68
Заключение	71
Список использованных источников	74

Введение

Озеро Байкал, расположенное в центральной части Восточной Сибири, является одним из самых крупных, глубоких и древних озер на планете. Его уникальная геологическая и экологическая значимость делает его объектом интенсивного исследования. Одним из ключевых аспектов изучения Байкала является его абиотическая среда - набор физико-химических параметров, определяющих условия жизни в озере.

Межгодовая изменчивость абиотических условий озера Байкал привлекает особое внимание ученых в связи с ее важностью для понимания долгосрочных тенденций и изменений в экосистеме озера. Этот аспект исследования становится особенно актуальным в контексте современных вызовов, таких как изменение климата и антропогенное воздействие на природную среду.

Основное внимание в данном исследовании уделено межгодовой изменчивости температуры воды и изучение ее тенденций.

Целью данного исследования являлся анализ межгодовой изменчивости температуры воды озера Байкал, как основного абиотического фактора, влияющего на экосистемы этого уникального водоема.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) подготовить краткую справку об изученности пространственно-временной изменчивости абиотических факторов озера Байкал;
- 2) сформировать массивы данных на основании результатов экспедиций лаборатории гидрофизики Лимнологического института СО РАН;
- 3) выполнить сравнительный анализ межгодовой изменчивости температуры воды в трех котловинах озера;
- 4) обосновать наиболее вероятную тенденцию дальнейших изменений температурного режима озера в летний период.

1. Характеристика объекта исследования – озера Байкал

1.1 Районирование и геоморфология

Озеро Байкал, с его глубиной в 1642 метра, является не только самым глубоким, но и самым объёмным пресным озером на планете. Расположенное практически в центре азиатского континента на высоте 456 метров над уровнем моря, оно представляет собой уникальный гидрологический объект. Впадина Байкала простирается на 636 километров с юго-запада на северо-восток, ограниченная координатами $51^{\circ} 28'$ и $55^{\circ} 47'$ северной широты, а также $103^{\circ} 43'$ и $109^{\circ} 58'$ восточной долготы (рис. 1.1).

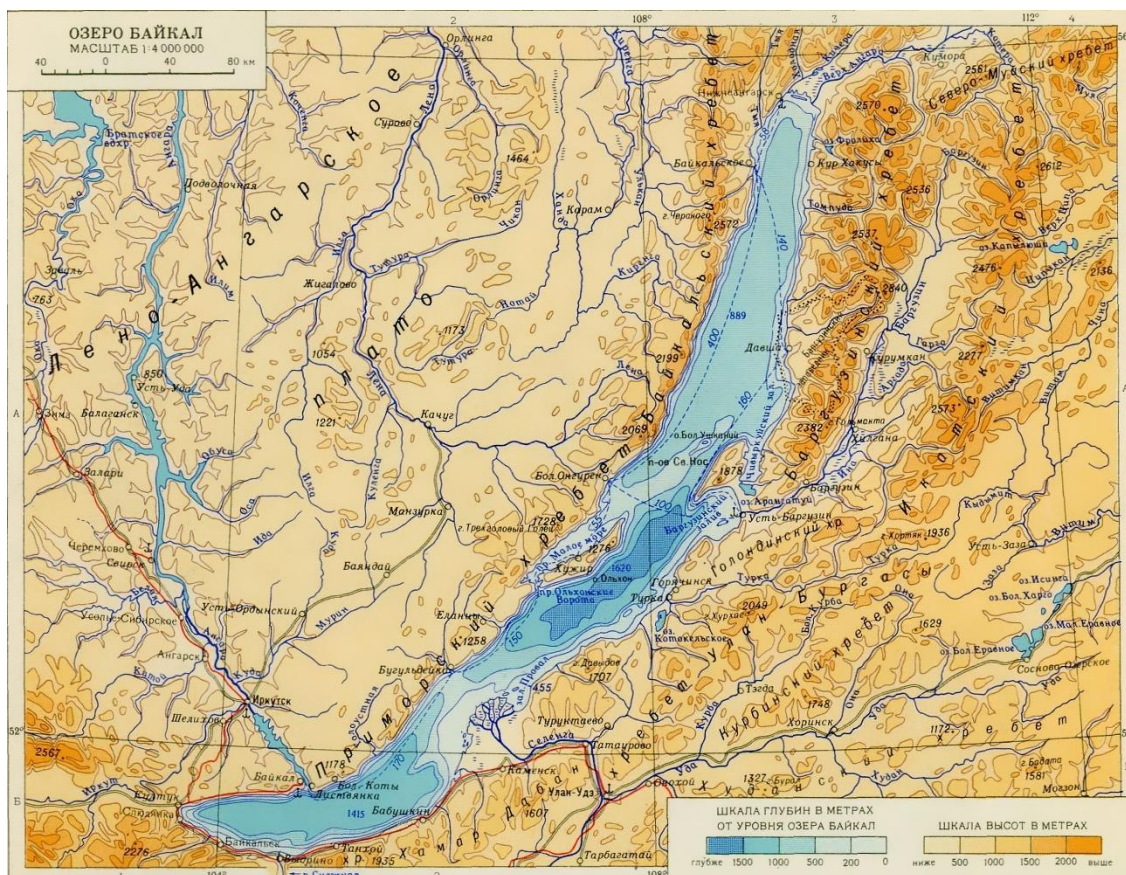


Рисунок 1.1 Карта озера Байкал [1]

С общей площадью бассейна в 540 000 км², из которых 52 % приходится на территорию Монголии, озеро Байкал собирает воду из обширной горной местности (рис. 1.2). В российской части этой местности горы, высотой более 1000 м, занимают около 49 % общей площади (рис. 1.2).

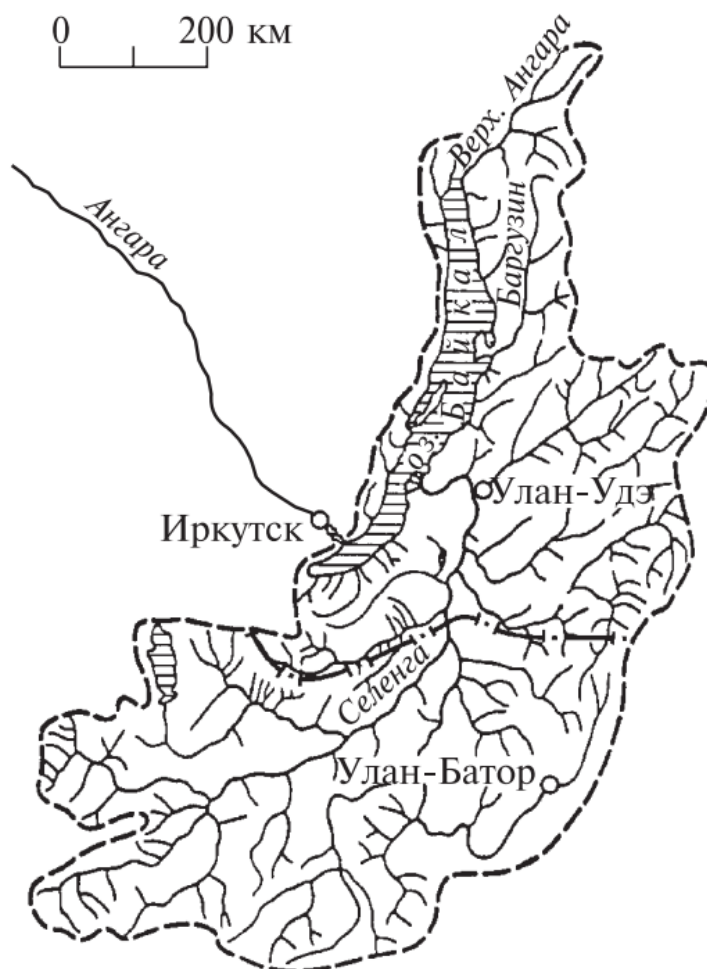


Рисунок 1.2 Обзорная карта оз. Байкал [2]

Впадина озера является ключевым элементом Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), которая включает в себя систему горных хребтов, тянущихся с юго-запада на северо-восток, а также межгорные впадины, такие как Верхнеангарская, Баргузинская, Тункинская и другие. Общая протяжённость БРЗ составляет около 1800 км, с шириной от 200 до 220 км. Внутри зоны БРЗ насчитывается более

70 межгорных впадин различного размера. Впадина Байкала также окружена горными хребтами, с которых в озеро впадает около 500 крупных и мелких притоков. Вне горного контура озера находится только один бассейн, но самый крупный приток – река Селенга, площадь водосбора которой составляет 447 000 км². Из озера сток осуществляется в его южной части через реку Ангара [2].

Байкал – это не просто водное пространство, это уникальный экосистемный комплекс с богатым биологическим разнообразием. Более половины видов, обитающих в озере, встречаются только здесь, что делает его объектом особой научной и природоохранной ценности.

Максимальная ширина озера Байкал в его средней части достигает 81 километра, в то время как минимальная ширина, напротив дельты реки Селенги, составляет 27 км. Средняя ширина озера составляет 49,3 км. Протяженность Байкала достигает 636 км, а его береговая линия простирается на около 1800 км. Озеро разбросано среди 22 островов, общая площадь которых составляет 716 км². Наиболее заметными из них являются Ольхонский (690 км²) и Большой Ушканый (9,4 км²). Крупнейшие заливы находятся на восточном берегу, включая Баргузинский (791 км²), Чивыркуйский (268 км²) и Провал (196 км²). Пролив Малое Море, расположенный между островом Ольхон и западным побережьем, имеет площадь 905 км².

Хребты, прилегающие к западному берегу (рис 1.3), такие как Приморский и Байкальский, поднимаются почти к самому озеру. Восточные хребты, такие как Хамар-Дабан, Улан-Бургасы и Баргузинский, отделены от береговой линии более пологими прибрежными равнинами или невысокими предгорьями. Высота гор увеличивается от южной части озера к северной.

Байкальская впадина, особенно ее подводная часть, имеет асимметричную форму. Склоны западного берега обычно более крутые, достигая иногда 60 градусов. Прибрежные отмели вдоль западного берега в основном имеют абразионное происхождение, в то время как склоны восточного берега менее крутые и более расположены под углом 7-10 градусов. Вдоль восточного берега,

особенно в средней части Байкала, прибрежные отмели встречаются значительно чаще. Подводные склоны рассечены многочисленными подводными каньонами, по которым переносятся наносы к абиссальной зоне. Дно впадины практически ровное и незначительно наклонено к западному берегу.

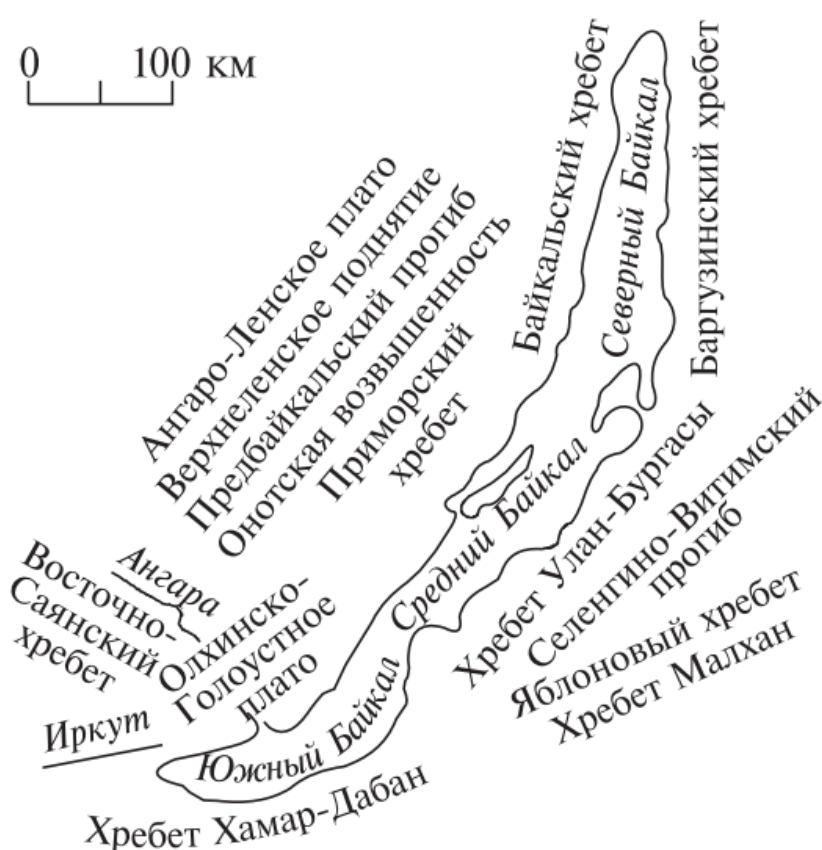


Рисунок 1.3 Схема основных морфотектонических структур Прибайкалья [2]

Впадина озера разделена на три котловины - южную, среднюю и северную глубоководными поднятиями дна. Наличие этих поднятий препятствует прямому водообмену между водными массами котловин на глубинах ниже 400 м. Южная и средняя части Байкала содержат большие объемы воды на глубинах свыше 1 км, составляя 16-20 % от общего объема. Северный Байкал

существенно мельче, но даже его средняя глубина превышает глубину других глубоких озёр мира [2].

1.2 Гидрологический режим

Водный режим этой местности характеризуется несколькими особенностями. Весеннее половодье обычно невелико, а летом и осенью часто происходят дождевые паводки. Зимой вода замерзает, образуя ледяной покров, который сохраняется с ноября по апрель. Среднегодовой расход воды вблизи границы Монголии и России составляет около $310 \text{ м}^3/\text{с}$, но уже через 127 км от устья этот показатель увеличивается до $935 \text{ м}^3/\text{с}$.

Озеро Байкал играет значительную роль в регулировании стока воды и представляет собой огромное природное водохранилище. Изменения в водном балансе вызывают колебания уровня озера. Эти колебания бывают как внутригодовыми, имеющими среднюю амплитуду около 85-90 см за многолетний период, так и многолетними, достигающими амплитуды до 217 см за последние 140 лет.

Колебания уровня озера Байкал в рамках его естественного режима проявляют ярко выраженный сезонный и циклический характер. В течение сезонного цикла уровень воды в озере начинает постепенно повышаться еще до того, как лед начинает таять в апреле. Этот подъем продолжается на протяжении всего теплого периода, достигая своего пика в сентябре, а в отдельные годы – в конце августа или начале октября. Интенсивность подъема уровня озера и период его максимального значения в течение года зависят от обилия атмосферных осадков, выпадающих в бассейне озера, а также от количества снега, накопленного к началу весны, и интенсивности его таяния.

После достижения максимального значения происходит постепенный спад уровня озера, который продолжается до апреля, когда уровень воды достигает своего минимального значения в году. Этот спад обусловлен снижением стока в

озеро в холодный период года из-за уменьшения количества атмосферных осадков и преимущественного накопления их в виде снега в бассейне Байкала.

В Байкал впадает 336 постоянных водотоков. Однако в некоторых литературных источниках упоминается большее количество притоков озера, включая не только постоянные водотоки, но и различные распадки, которые расчлениают байкальское побережье. Некоторые из этих притоков протекают в течение недолгого времени, в основном во время интенсивных дождей во влажные годы.

Единственная река, вытекающая из Байкала, — это Ангара. Самый крупный приток Байкала - река Селенга, объем воды, приносимой которой, составляет почти половину от всего поступающего в озеро.

Речной сток – основной компонент ежегодного пополнения ресурсов озера Байкал. В среднем реки поставляют в Байкал $58,75 \text{ км}^3$ воды в год - 82,7 % общего прихода в водном балансе озера. Они же - основной источник привноса в озеро растворенных и взвешенных веществ. 13 % балансового прихода - атмосферные осадки (в среднем 294 мм осадков в год непосредственно на акваторию озера). 4,3 % приходной части баланса относится на подземный сток в Байкал. При этом в водном балансе самого речного стока подземный сток занимает до 30 – 50%, а в зимний период питание рек происходит только за счет подземных вод и, частично, коммунальных и промышленных сбросов.

Водосборный бассейн озера Байкал охватывает территорию площадью 509,5 тыс. км^2 (без площади акватории Байкала – 31500 км^2). Около 240,5 тыс. км^2 бассейна поверхностного и подземного стока в Байкал находится на территории России. Остальная часть водосборного бассейна ($268,5 \text{ тыс. км}^2$) находится в пределах Монголии.

Территория обеспечена достаточным количеством водных ресурсов хорошего качества для питьевых и рекреационных целей и различных направлений хозяйственной деятельности [3].

Общая площадь бассейна озера Байкал составляет 588 092 км². В эту территорию входят около 299 тысяч км² в России и 289 тысяч км² в Монголии, где находится южная часть бассейна реки Селенга.

Примерно 73 % российской части бассейна занимает Республика Бурятия. Забайкальский край, где берут начало крупные притоки Селенги, такие как реки Чикой и Хилок, охватывает 21 % площади. Иркутская область имеет лишь 6 % водосборной территории Байкала.

Режим рек, питающих Байкал, включает половодье, дождевые паводки и длительный зимний меженный период. Большая часть стока происходит летом, тогда как зимой меженный сток обычно не превышает 2-5 % годового объема.

Распределение водного стока в течение года неравномерно из-за сезонных климатических условий. Присутствие многолетнемерзлых пород затрудняет накопление подземных вод, влияя на водный режим.

В бассейне реки Селенга и южных районах бассейна Байкала преимущественно дождевое питание. В то время как низовья Селенги, бассейн реки Верхняя Ангара и северные районы бассейна Байкала характеризуются снеговым питанием.

С 1960 года уровень Байкала зависит не только от осадков и притока поверхностных и подземных вод, испарения и стока Ангара, но также и от режима эксплуатации Иркутской, Братской и Усть-Илимской ГЭС, которые работают в компенсационном и взаимозависимом режиме. (рис. 1.4)

1.3 Течения и водообмен

В озере Байкал под воздействием ветра, изменений атмосферного давления и других факторов формируются горизонтальные течения. В заливах также присутствуют течения, обеспечивающие обмен воды с основной массой озера. Наиболее интенсивные течения наблюдаются в конце лета и осенью, когда их скорость в верхних слоях достигает 80-90 см/с, а иногда и 1 м/с. На глубинах свыше 300-400 м скорость течений снижается до 2 см/с.

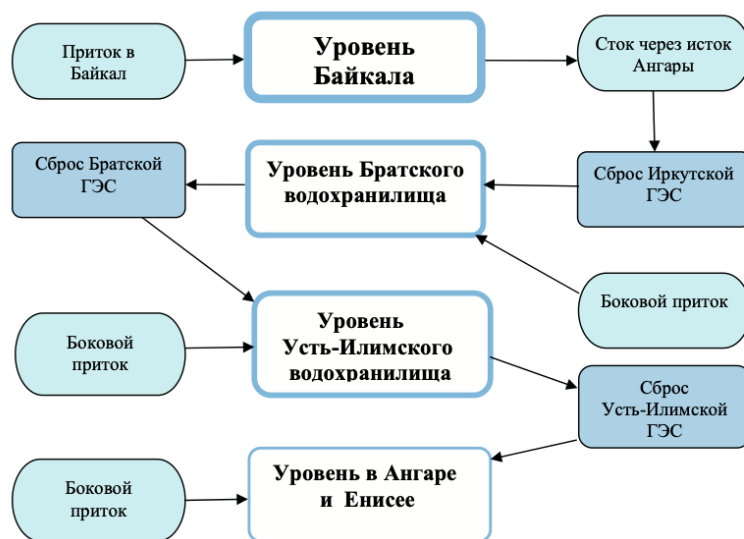


Рисунок 1.4 Зависимость уровня Байкала от сбросов ГЭС Ангарского бассейна [4].

Зимой течения продолжают действовать, но под ледяным покровом их скорость падает до 2 см/с и менее, хотя временами может достигать 8-12 см/с. В основной водной толще зимой скорости течений минимальны, около 2 см/с или меньше. Однако на глубине 50-200 метров над дном скорость течений иногда увеличивается до 10 см/с зимой и до нескольких десятков см/с весной и осенью. Причины такого усиления включают нисходящие течения и сгонно-нагонные явления.

Водообмен между озером Байкал и его притоками характеризуется длительными временными интервалами замещения вод. Воды Северного Байкала обновляются за 430 лет, Среднего Байкала – за 230 лет, а Южного Байкала – за 100 лет. В целом для всего озера этот процесс занимает 370 лет, что указывает на медленное замещение речных вод и высокую инерционность его физико-химических свойств.

Горизонтальный водообмен внутри озера, в значительной степени обусловленный ветровыми и дрейфовыми течениями, происходит гораздо

быстрее. В зимний период средняя скорость перемещения водных масс составляет около 1 см/с, а в безледный период – 2 см/с и более. В каждой из котловин обнаруживаются вторичные циклонические циркуляции. Эти течения позволяют водным частицам в течение года обойти весь периметр южной и средней котловин, а также 80 % периметра северной котловины. Расчеты показывают, что годовой водообмен между южной и средней котловинами составляет 90-130 км³, а между средней и северной котловинами – около 240±50 км³.

Вертикальный водообмен в Байкале способствует постоянному обновлению глубинных вод, насыщению их кислородом и вовлечению биогенных элементов в процессы формирования первичной продукции. Основными механизмами обновления глубинных вод являются различные формы температурной конвекции, опускание вод у берегов под воздействием течений и процессы, происходящие вблизи весенних термобаров со скоростью от 0,01 до 0,2-0,4 см/с. В центрах горизонтальных циклонических вихрей глубинные воды поднимаются со скоростью от 10⁻⁴ до 10⁻² см/с, что часто наблюдается летом и вблизи берегов. Исследования с использованием химических индикаторов, таких как фреоны и соотношение гелия и трития, показали, что вода Байкала на глубинах свыше 300 м ежегодно обновляется на 10-12 %.

Для наблюдения за течениями в Байкале используются различные методы, включая морские вертушки, поплавки, а также мониторинг дрейфа льдов с помощью аэро- и космических снимков. В начале 1960-х годов было запущено несколько тысяч бутылок с открытками, призывающими нашедших указать место и дату обнаружения и отправить открытку обратно. Около 10 % открыток вернулись. Интересно, что бутылки, выпущенные в Южной котловине Байкала, были найдены в Северной, на расстоянии 400 км.

Основными факторами, влияющими на движение воды в Байкале, являются речные притоки, отток воды и ветровая активность. Среди постоянных течений можно выделить Селенгинское, Ангара-Кичерское и Баргузинское

течения. Селенгинское течение состоит из двух ветвей: основная юго-западная ветвь направляется от дельты Селенги к западному берегу, а другая ветвь наблюдается в районе Больших Котов и вблизи истоков Ангары. Ангаро-Кичерское течение, исходящее от устьев рек Верхней Ангары и Кичеры, сначала движется на запад, затем поворачивает на юг. Баргузинское течение от устья реки Баргузин сначала движется на север вдоль одноименного залива, а затем поворачивает на юго-запад вдоль побережья полуострова Святой Нос и далее вдоль восточного берега на север.

Кроме постоянных течений, в Байкале возникают временные потоки воды различных направлений, вызванные сильными ветрами. Эти временные течения проявляются в поверхностных слоях воды и на глубине 15-20 метров, где они быстро затухают (рис. 1.5).

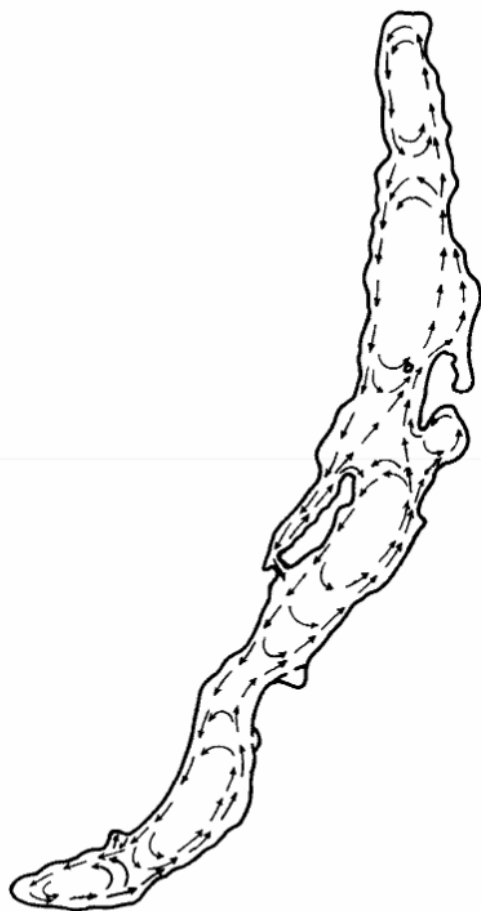


Рисунок 1.5 Схема поверхностных течений озера Байкал [5]

1.4 Ветровой режим

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 1.6).

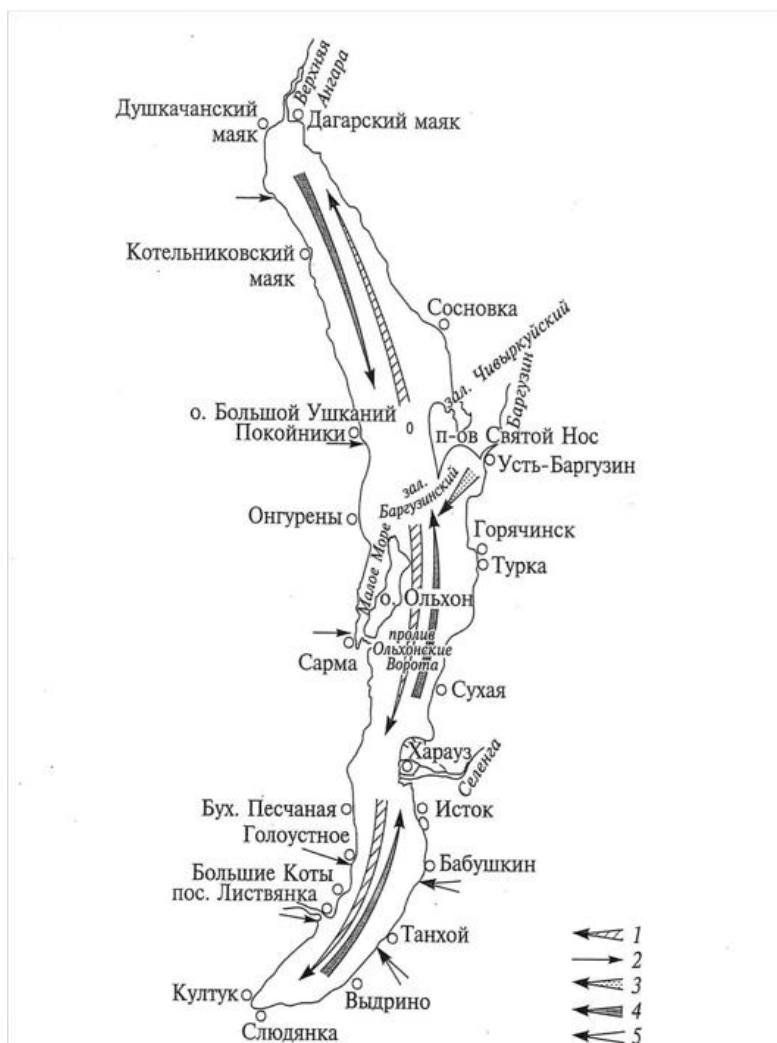


Рисунок 1.6 Схема основных байкальских ветров [6]:

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

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.

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) [6].

1.5 Термический режим

Озеро Байкал относится к димиктическим озерам, у которых температура поверхности воды дважды в год достигает 4°C — температуры наибольшей плотности воды. В зависимости от теплового баланса поверхности, температурной стратификации и условий перемешивания, годовой температурный цикл делится на периоды нагрева и охлаждения, каждый из которых включает несколько этапов. Продолжительность и сроки этих этапов варьируются в разных частях Байкала в зависимости от их широты, удаленности от берега и глубины.

Этап подледного прогрева начинается раньше в малозаснеженных прибрежных районах западной части котловин, когда тепловой баланс поверхности становится положительным. Температура воды распределяется в виде устойчивой мезотермии с максимумом $3,5-3,7^{\circ}\text{C}$ на глубинах 150-250 м. На глубинах до 25 м находится слой с небольшими температурными градиентами. С усилением температурной конвекции в апреле-мае, этот слой увеличивается до 50-100 м, а температура воды перед вскрытием озера варьируется от $0,4$ до 2°C . На глубинах больше 100 м сохраняется устойчивая температурная стратификация с мезотермическим максимумом $3,5-3,7^{\circ}\text{C}$ на глубинах 150-250 м.

Во время весеннего прогрева, конвекция и ветер увеличивают диапазон глубин с небольшим температурным градиентом, и слой воды становится почти однородным по температуре, достигая $3,5-3,7^{\circ}\text{C}$. После достижения этой температуры, глубина проникновения конвекции уменьшается, а когда температура поверхности воды превышает $3,98^{\circ}\text{C}$, конвекция прекращается. Это создает условия для перемешивания воды под воздействием ветра и течений.

Летом, при отсутствии температурной конвекции, быстро формируется теплый верхний слой (эпилимнион) толщиной до 5-10 м и термоклин с большими вертикальными градиентами температуры ($0,2-0,4^{\circ}\text{C}$ на метр). Эпилимнион прогревается к июлю-августу до $10-12^{\circ}\text{C}$, а в поверхностном слое может

достигать 14-22°C в зависимости от погодных условий и близости к теплым притокам. Температура ниже термоклина на глубинах 150-250 м остается около 3,5-3,7°C, создавая условия для динамического перемешивания воды при сильных ветрах.

Осеннее охлаждение начинается в сентябре, когда тепловой баланс поверхности становится отрицательным. В это время температура воды на глубинах более 20-30 м повышается за счет конвекции. Ветровое перемешивание увеличивает размеры эпилимниона и заглубляет слой температурного скачка. К ноябрю толщина перемешанного слоя достигает 100-150 м. После перехода температуры поверхности через 3,98°C начинается этап предзимнего охлаждения, характеризующийся ветровым перемешиванием, которое увеличивает толщину верхнего слоя воды. В этот период температура водного слоя становится наиболее однородной (осенняя гомотермия). Зимний профиль температуры формируется с повышением температуры до глубин 150-250 м и последующим понижением до дна. Граница между верхней зоной с обратной стратификацией и глубинной зоной с прямой стратификацией определяется температурным максимумом (мезотермия), который зависит от интенсивности ветрового перемешивания.

После замерзания, в период подледного охлаждения, окончательно устанавливается обратная стратификация температуры в верхнем слое воды. В зависимости от интенсивности осенне-зимнего конвективно-ветрового перемешивания, значения температуры и глубина максимума температуры варьируются в разные годы и участки озера.

Следует отметить, исследованиям межгодовой изменчивости температуры озера Байкал в период с 1972 по 2007 годы была посвящена работа М.Н. Шимараева с соавторами [10]. Для проведения исследований использовались различные методы измерения температуры, включая ртутные термометры и STD-зонды, что позволило зафиксировать температурные данные на глубинах от поверхности до 1200 метров.

На начальных этапах (1972–1992 гг) температурные тренды в глубоких слоях бассейнов озера Байкал оказались статистически незначительными, показывая изменения менее $0.01\text{--}0.001^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. Однако в период с 1995 по 2007 годы данные показали значительные температурные тренды в самых глубоких слоях. В частности, в Южном Байкале наблюдалось снижение температуры в 100-метровом придонном слое, в то время как в Центральном и Северном Байкале температура увеличивалась на глубинах ниже 600 и 700 метров соответственно. Было показано, что эти изменения не являются следствием климатических изменений, а отражают уникальные особенности теплового взаимодействия между верхними и глубокими водными слоями в каждом из бассейнов.

Важной особенностью данных была синхронность межгодовых колебаний температуры в глубоких слоях, с периодами колебаний от 6 до 10 лет и амплитудой изменений от 0.03 до 0.1°C в разных глубинных слоях. Эти колебания подчеркивают сложность и многофакторность термических процессов, происходящих в озере Байкал.

Накопленный более поздний массив экспедиционных данных лаборатории гидрофизики Лимнологического института СО РАН позволил продолжить такие исследования в рамках данной работы.

2. Материалы и методы

2.1 Материалы исследования

Для анализа абиотических условий озера Байкал, использовались экспедиционные данные с 1996 по 2022 годы за июль, сентябрь и октябрь, а именно рассматривалась температура воды от поверхности до дна, осредненная с шагом в 2 метра.

Все данные были получены с помощью океанографического зонда STD SBE 25 (рис 2.1). Данная конфигурация логгера включает в себя датчики температуры, электропроводности и давления. Также присутствует возможность установки дополнительных датчиков таких как растворенного кислорода, pH, освещенности, мутности, прозрачности, флюоресценции и др.



Рисунок 2.1. Океанографический зонд STD SBE 25 [9]

Ниже в таблице 2.1 указана информация о количестве станций и их глубине с разделением по районам. Красным цветом в таблице отмечены годы, в которые экспедиции не проводились (либо данные отсутствуют в исходном массиве).

Таблица 2.1 Ежегодное количество станций наблюдений лаборатории гидрофизики Лимнологического института СО РАН в акватории озера Байкал

Годы / Регион	Южный Байкал		Средний Байкал		Северный Байкал	
	Кол-во станций	Макс глубина, м	Кол-во станций	Макс глубина, м	Кол-во станций	Макс глубина, м
1996	11	1432	4	1624	6	896
1997	3	1430	0	-	0	-
1998	0	-	0	-	0	-
1999	0	-	0	-	0	-
2000	16	1428	9	1628	19	888
2001	10	1434	11	1626	16	888
2002	12	1422	13	1624	10	892
2003	5	1482	4	1616	6	892
2004	0	-	0	-	0	-
2005	4	1426	8	1620	0	-
2006	0	-	0	-	0	-
2007	5	1436	4	1472	7	900
2008	12	1434	5	1566	1	852
2009	12	1422	12	1628	15	896
2010	10	1432	6	1626	6	886
2011	6	1432	3	1624	0	-
2012	15	1432	9	1626	0	-
2013	9	1434	11	1628	7	890
2014	6	1434	3	1566	0	-
2015	0	-	0	-	0	-
2016	12	1328	9	1614	8	896
2017	14	1434	15	1628	12	890
2018	14	1420	12	1626	13	888
2019	15	1436	6	1362	11	892
2020	25	1434	11	1628	13	898
2021	11	1422	14	1628	13	898
2022	11	1434	13	1628	7	896

Для визуального представления расположения станций были построены карты-схемы на базе навигационных карт [20] для каждой котловины Байкала отдельно (рис. 2.2- 2.4). В процессе построения использовалось программное обеспечение OziExplorer.

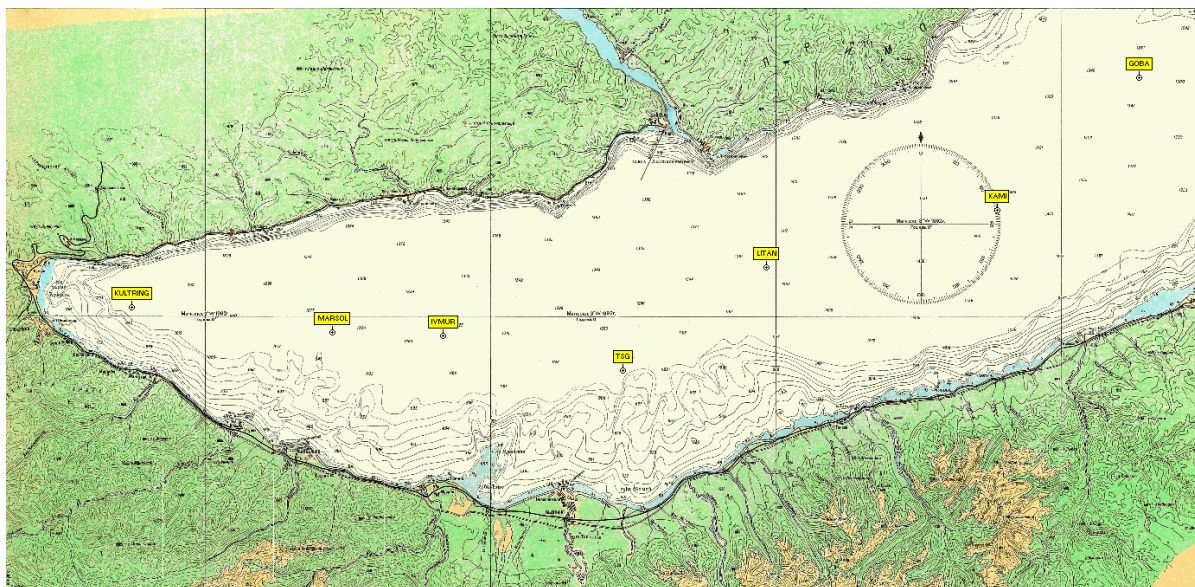


Рисунок 2.2 Карта-схема расположения станций на южном Байкале

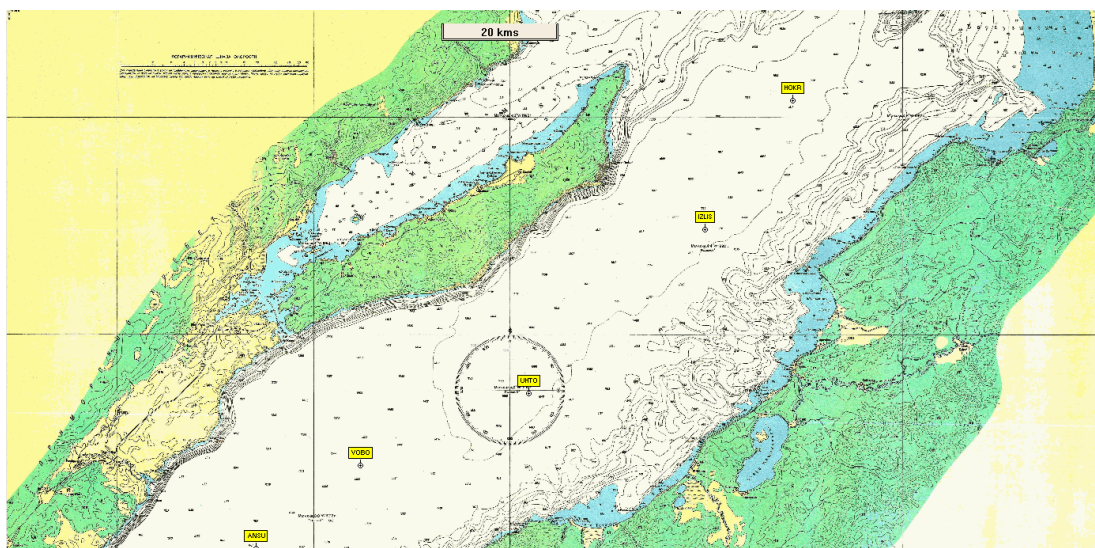


Рисунок 2.3 Карта-схема расположения станций в среднем Байкале

В связи с невозможностью увеличения изображения, названия станций плохо видны. Ниже, в таблице 2.2 представлены названия станций и их координаты. Станции указаны в точном порядке с запада на восток и с юга на север.

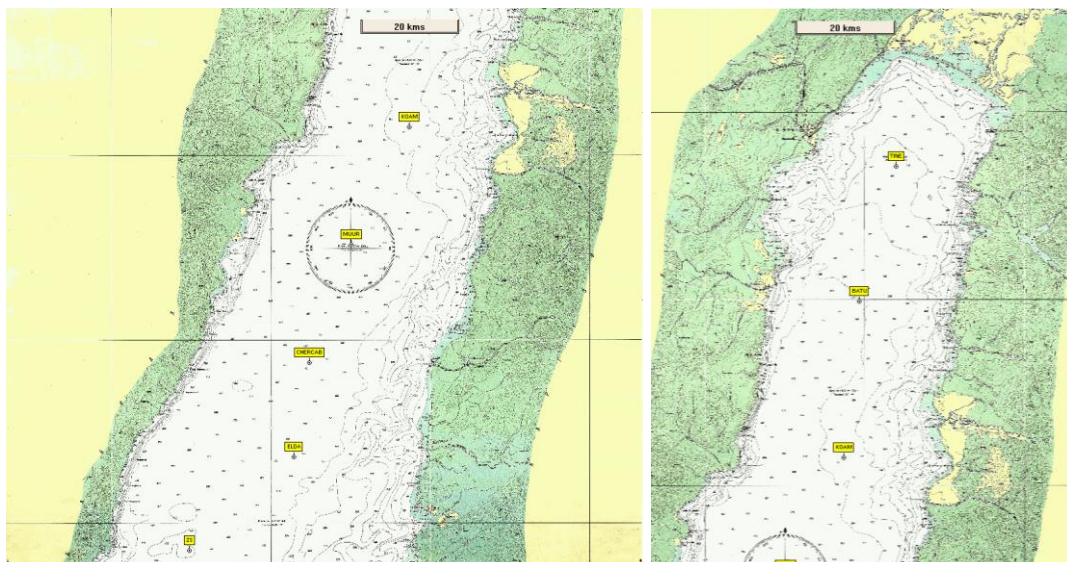


Рисунок 2.4 Карта-схема расположения в северном Байкале

Следует отметить, что выполнение экспедиционных работ ежегодно именно по единой схеме станций позволяет считать результаты исследований межгодовой изменчивости температурного режима в летне-осенний период, выполненные с использованием таких данных, репрезентативными.

Также в работе использовались данные о температуре воздуха, загруженные с портала Columbia, из базы данных NOAA NCEP-NCAR CDAS-1. Загружены ежемесячные данные за июль, сентябрь и октябрь месяцы за период с 1972 по 2023 годы, с последующим осреднением до ежегодных за сезон. В качестве точек были выбраны центры каждой из котловин – $52,38^{\circ}$ с.ш. 105° в.д. в Южном, $52,38^{\circ}$ с.ш. $106,88^{\circ}$ в.д. в Среднем и $54,29^{\circ}$ с.ш. $108,75^{\circ}$ в.д. в Северном Байкале.

Таблица 2.2 Названия станций экспедиционных исследований в озере Байкал и их координаты

Южный Байкал

Назв.	Широта	Долгота	Описание
KULTRING	51 40,397	103 52,265	Култук
MARSOL	51 38,765	104 13,412	Маритуй - Солзан
IVMUR	51 38,559	104 25,044	Ивановский - Мурино
TSG	51 36,307	104 43,949	Толстый - Снежная
LITAN	51 42,997	104 59,061	Листвянка - Танхой
KAMI	51 46,661	105 23,357	Кадильный - Мишиха
GOBA	51 55,230	105 38,214	Голустное - Бабушкин

Средний Байкал

Назв.	Широта	Долгота	Описание
ANSU	52 39,864	106 51,043	Анга-Сухая
VOBO	52 47,629	107 07,057	Ворота-Болдакова
UNTO	52 54,258	107 32,826	Ухан-Тонкий
HOKR	53 21,476	108 13,069	Хобой-Крестовый
IZLIS	53 09,500	107 59,692	Ижимей-Лиственничный

Северный Байкал

Назв.	Широта	Долгота	Описание
ZS	54 16,935	108 44,478	Заворотный-Сосновка
ELDA	54 27,016	109 04,123	Елохин-Давша
CHERCAB	54 37,200	109 07,074	Черемшаний-Кабаний
MUUR	54 49,940	109 15,052	Мужинай-Урбикан
KOAM	55 02,619	109 25,924	Котельниковский-Амундакан
BATU	55 19,442	109 28,895	Байкальский-Турали
TINE	55 33,984	109 35,728	Тыя-Немнянко

2.2 Статистический и графический анализы пространственно-временной структуры вод озера Байкал

Описание полученных данных с помощью статистических методов используется для понимания характеристик процесса, его изменчивости и выявления аномалий при их наличии. В данной работе использовался анализ трендов.

Для применения большинства методов анализа временного ряда одним из основных требований к ряду является его стационарность, т.е. неизменность его основных статистических характеристик во времени. В частности, это касается его среднего значения и дисперсии. Поэтому на первом этапе анализа временного ряда оценивается его стационарность, и, если она не выявляется, ряд преобразовывают к стационарному виду.

В случае нестационарности ряда среднее значение и/или дисперсия для частей выборки могут меняться скачкообразно, а могут иметь непрерывный характер изменения. В последнем случае говорят, что ряд имеет тренд (по математическому ожиданию или по дисперсии) [7].

Заданный уровень значимости трендов в данной работе – $p\text{-value} < 0.05$.

Также в данной работе для построения разрезов температуры воды использовалось ПО Ocean Data View. Это ПО, разработанное для визуализации и анализа океанографических данных. Оно широко используется учеными для обработки данных, полученных из различных источников, таких как гидрографические исследования и спутниковые наблюдения. ODV поддерживает множество форматов данных и предлагает удобные инструменты для их загрузки, обработки и отображения. С помощью программы можно создавать графики, карты и профили, что упрощает анализ сложных данных о состоянии океанов. Основные функции ODV включают интерполяцию данных, анализ временных рядов, построение вертикальных и горизонтальных разрезов, а также визуализацию изолиний. Простота интерфейса и широкий спектр возможностей делают ODV полезным инструментом для океанографов и экологов.

Пример вертикального разреза оз. Байкал представлен на рисунке ниже (рис. 2.5).

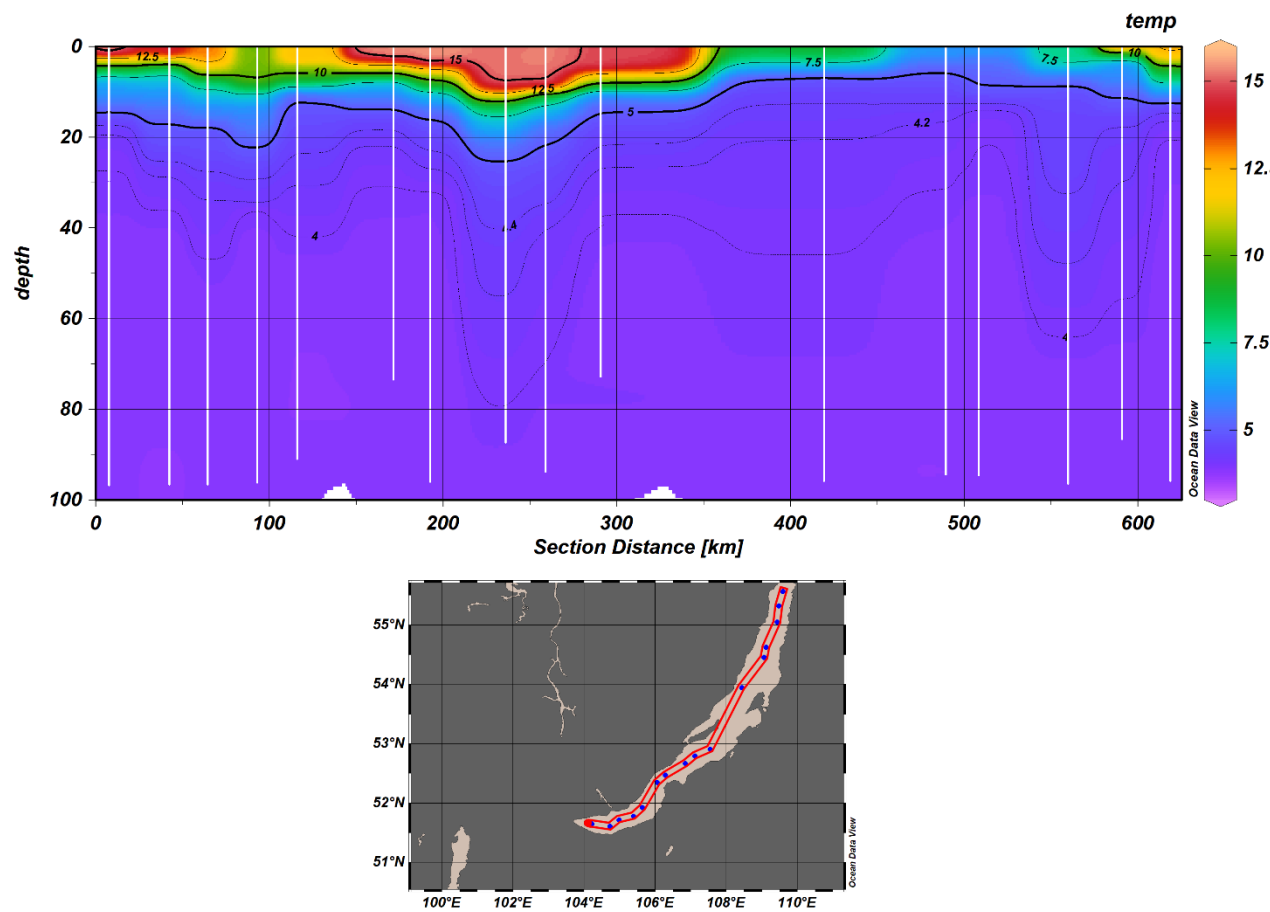


Рисунок 2.5 Вертикальный разрез озера Байкал по центральным станциям. Температура воды (°C). Июль 2023 года.

3. Анализ результатов

3.1 Межгодовая изменчивость температуры воздуха в районах котловин озера

Сперва для объективного оценивания тенденций температуры воды, был оценен межгодовой ход температуры воздуха. На графиках ниже представлены данные о температуре воздуха над Байкалом за июль, август и сентябрь месяцы с 1972 по 2023 годы (рис. 3.1-3.3).

Средняя температура воздуха в июле демонстрирует тенденцию к повышению, особенно заметную после 1990 года. В центральной части Байкала в последние годы температура часто превышает 18°C , тогда как в более ранние годы такие значения встречались реже. В южной и северной частях Байкала также наблюдаются колебания, но в целом средняя температура остается ниже, около $15\text{-}16^{\circ}\text{C}$.

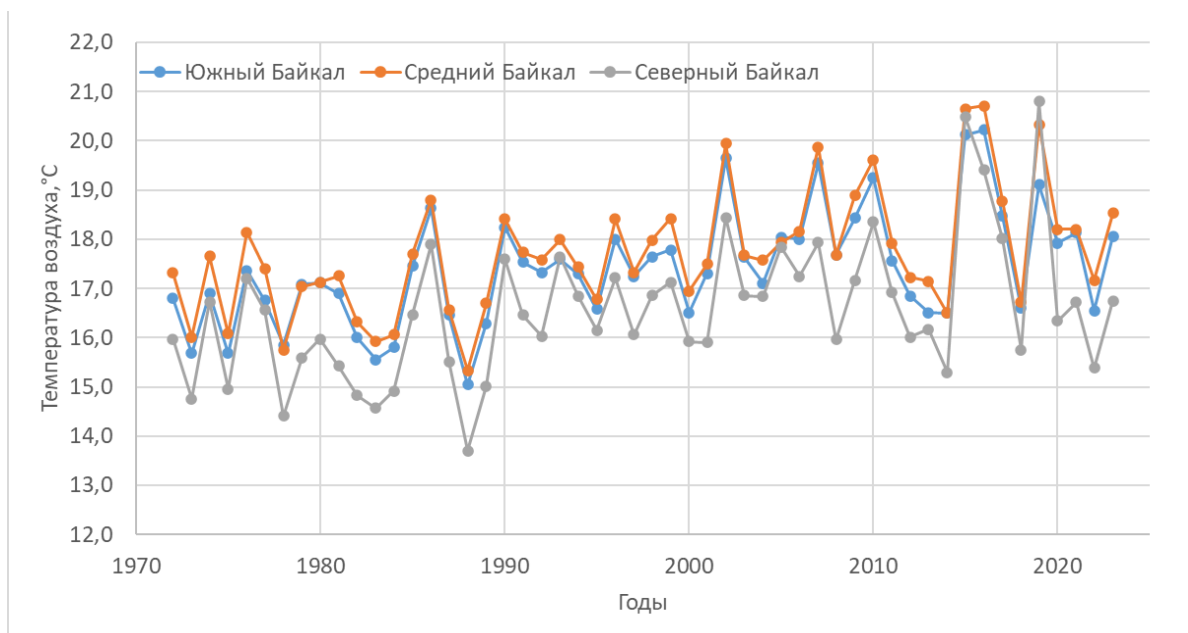


Рисунок 3.1 Динамика температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в период с 1972 по 2022 годы за июль

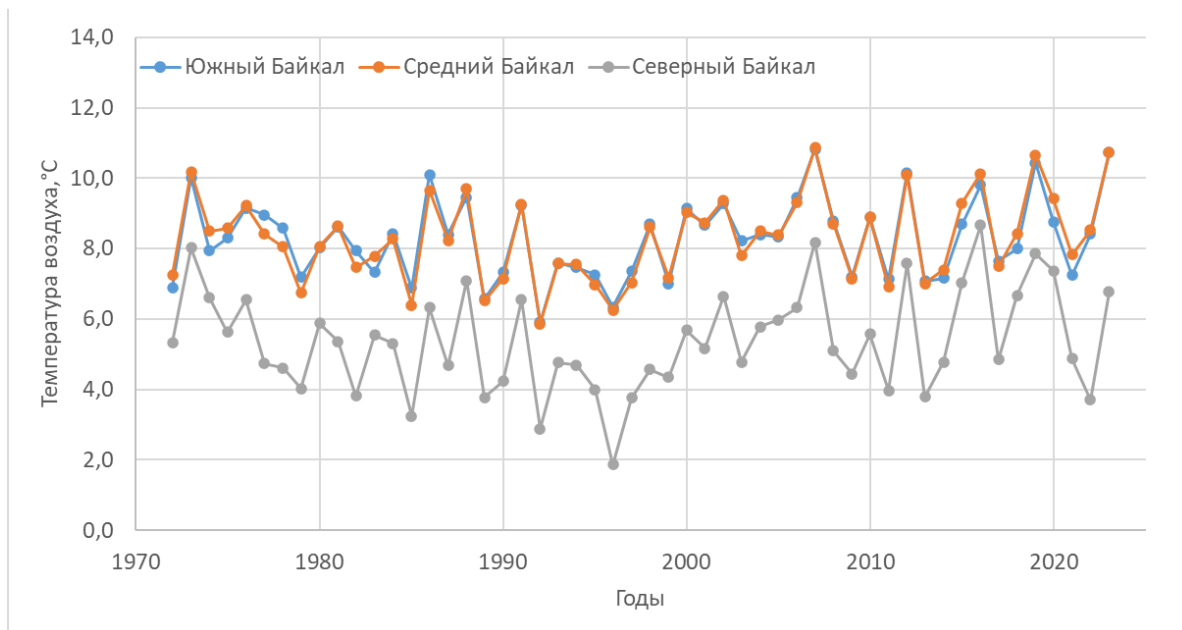


Рисунок 3.2 Динамика температуры воздуха (°C) в период с 1972 по 2022 годы за сентябрь

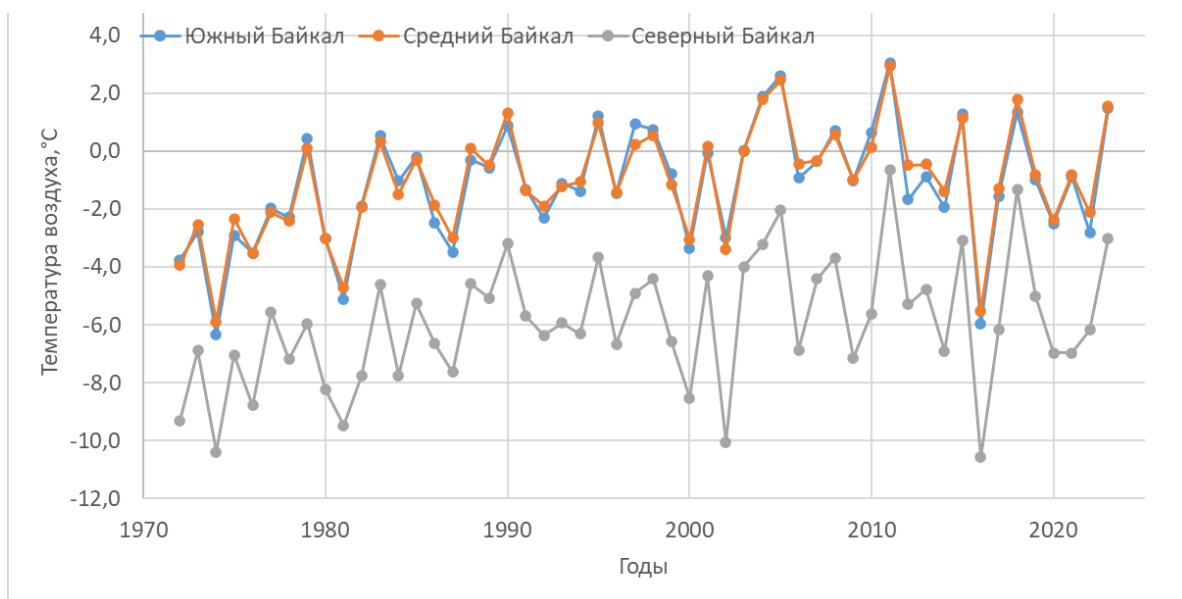


Рисунок 3.3 Динамика температуры воздуха (°C) в период с 1972 по 2022 годы за октябрь

Сентябрьские температуры воздуха (рис. 3.2), очевидно, ниже летних, но также показывают тенденцию к росту. В южной и центральной частях Байкала средняя температура воздуха в сентябре практически совпадает. В последние годы поднимается до 10-11 °С, тогда как в более ранние годы такие значения были редкими. В северной части средние температуры тоже растут после 2010 года достигая 8-9°С. В сентябре и июле наблюдается аномалия низкой температуры воздуха со снижением примерно на 2-4°С.

В октябре за весь исследуемый период, средние температуры (рис. 3.3) выросли на 1°С. До 2010 года можно заметить период холодных лет. К 20-м годам XXI века температура выросла в несколько раз по сравнению с предыдущими десятилетиями. Также присутствуют 2 аномальных минимума температуры воздуха в 2002 и 2016 годах.

Что касается всего сезона целиком (рис.3.4), заметна тенденция роста. До 2000 года значения температуры были относительно стационарны, но после, замечен сильный рост.

С 2010 года начались сильные колебания температуры воздуха, что может говорить о глобальном потеплении и изменении климата, так как, сильные перепады температур могут быть результатом нарушения привычных климатических режимов. Резкое нарушение термических особенностей климата Байкала происходит в тех случаях, когда в воздушные массы, расположенные над озером, вторгаются воздушные массы с его берегов, что бывает при сильных ветрах, которые в начале лета приносят более нагретые, а в конце осени более охлажденные воздушные массы [19].

Следует отметить, что минимумы температуры воздуха были характерны над котловинами в разные годы. Так в июле минимум был отмечен в 1988 году, в сентябре – 1996 году, в октябре - 1972, 2002 и 2016 годах. Это особенно хорошо прослеживается для Северной котловины.

Исходя из вышеперечисленных фактов, и проанализировав общую ситуацию за сезон (рис. 3.4) можно сделать вывод о том, что для периода 1972-2022 годы наблюдается потепление температуры воздуха над озером Байкал.

Однако, с 2007 года и по настоящий момент межгодовые колебания температуры воздуха летне-осенний период могут иметь размах до 3-4 °С, в то время как в 1970-1980-х годах такие колебания были значительно ниже (около 2 °С) .

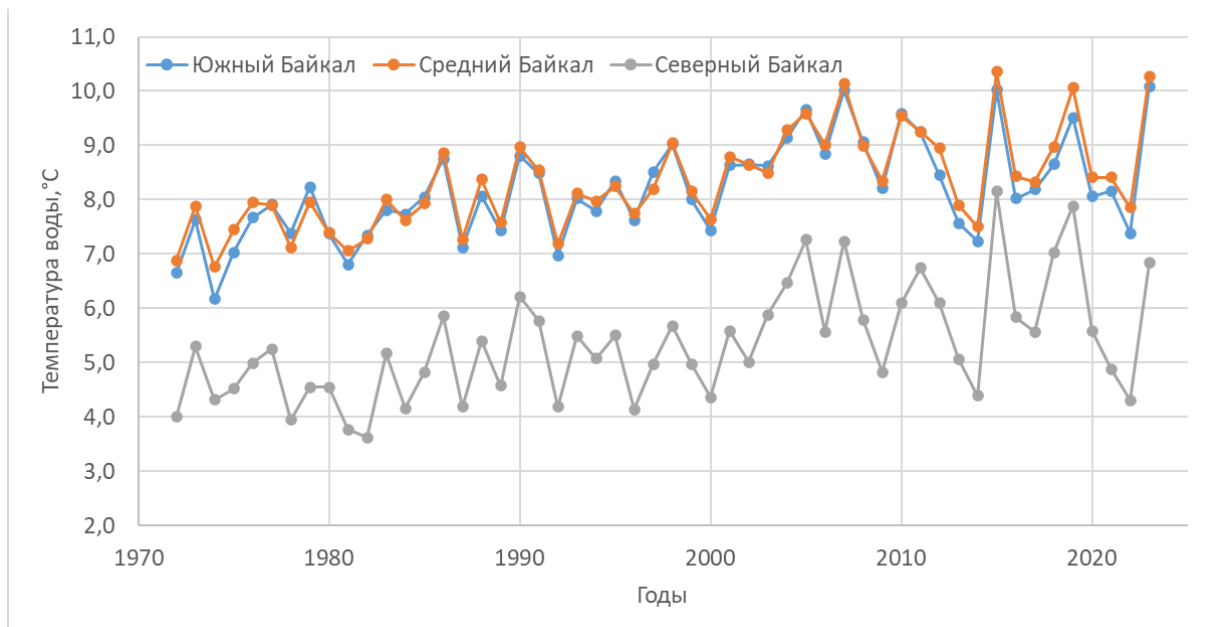


Рисунок 3.4 Межгодовой ход температуры воздуха в период с 1972 по 2022 годы.

3.2. Анализ температуры воды в Южном Байкале

Был рассмотрен каждый регион Байкала отдельно, оценены тренды и их значимость. Во время расчетов трендов для Южного Байкала были обнаружены необычные особенности, которые не видны при расчетах за весь исследуемый период. В связи с этим, южный район был разобран помесечно.

Сперва были описаны слои от поверхности до дна, а затем разобраны придонные слои отдельно.

Несмотря на то, что практически все тренды незначимы (таблица 3.1, рис. 3.5)), видно, что они в большинстве своем отрицательные, за исключением верхнего слоя (0-100 м). В среднем изменения температуры воды имеют

незначительные колебания. Единственный значимый тренд обнаружен в слое 600-1200 м и составляет - 0,004 °C/10 лет.

Таблица 3.1 Тренды температуры воды (°C/10 лет) в июле (жирным шрифтом выделены значимые).

Слой	Июль
0-100	0,168
100-200	-0,003
200-400	-0,007
400-600	-0,006
600-1200	-0,004
200-100	-0,005
100-0	-0,004
6-4	-0,003

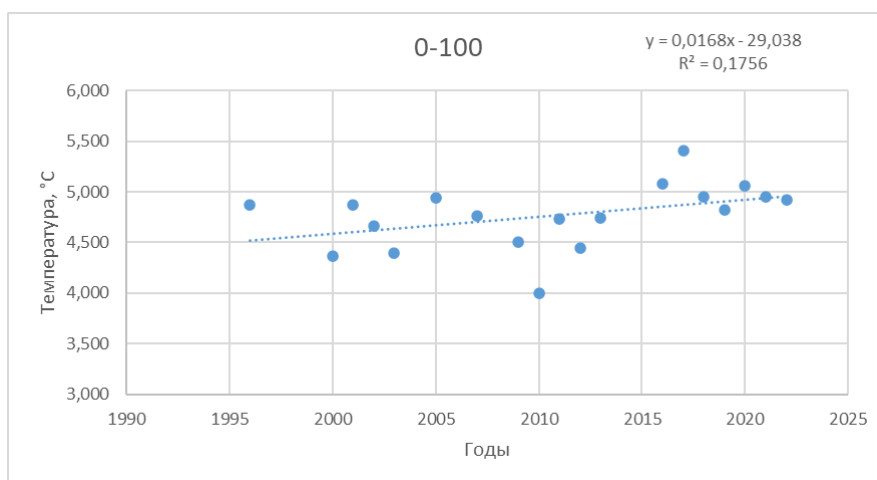


Рисунок 3.5 Тренд температуры воды в слое 0-100 м для Южного Байкала

Для более точного описания изменчивости поверхностного и придонного слоев, ряд был поделен пополам, до 2010 года и после.

Для разделенных слоев тренды были посчитаны отдельно (таблица 3.2, рисунок 3.6)

Таблица 3.2 Тренды температуры воды (°C/10 лет) в июле до 2010 года и после (Южный Байкал) (жирным шрифтом выделены значимые).

До 2010		После 2010	
Слой	Июль	Слой	Июль
0-100	-0,082	0-100	0,572
200-100	-0,016	200-100	0,005
100-0	-0,034	100-0	0,009
6-4	-0,043	6-4	0,013

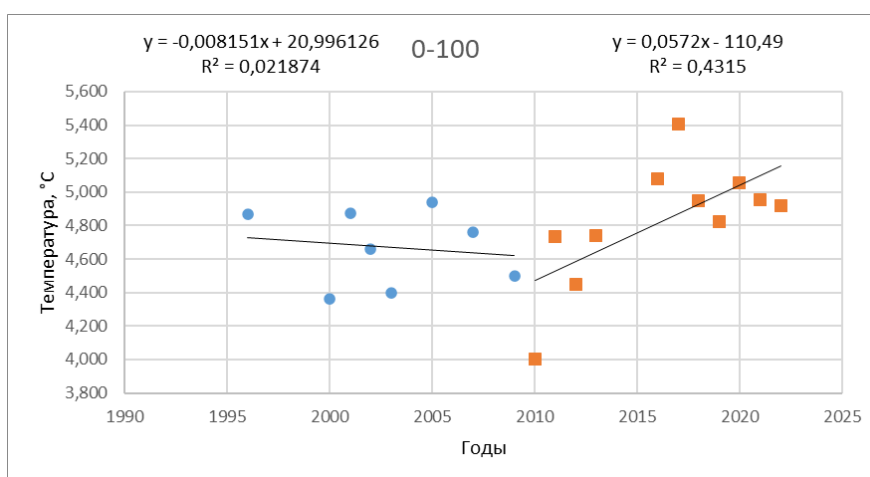


Рисунок 3.6 Тренды температуры воды в слое 0-100 м с разделением в 2010 году. Южный Байкал

До 2010 года наблюдался незначимый отрицательный тренд, а после - резко растущий значимый положительный, равный 0,57 °C/10 лет. В течение 10 лет средняя температура поверхностного слоя выросла практически на 1 °C, что является очень большим показателем.

Далее рассматривалась ситуация в глубинных слоях (рис.3.7-3.8).

На рисунках 3.7 (а-в) также можно наблюдать многолетнюю стабильную температуру воды. Можно заметить на глубинах 100-0 и 6-4 м от дна значительный выброс температуры в 2007 году. Это явление можно объяснить холодной придонной интрузией, характерной для озера Байкал в этот период.

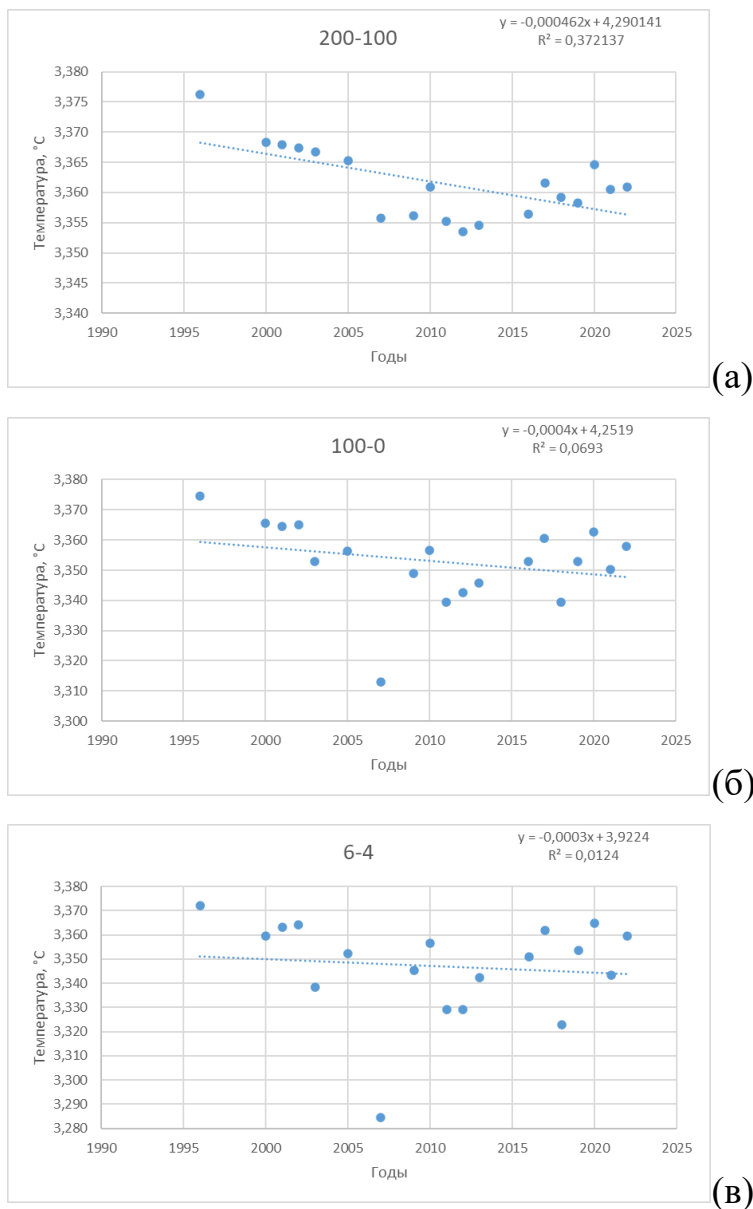


Рисунок 3.7 Тренды температуры воды в придонном слое (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Южный Байкал

Изучение стратификации и развития конвекции в Байкале показало, что в условиях уменьшения температуры максимальной плотности воды (давления) с ростом глубины весной и перед ледосплавом в слоях верхней зоны возникает термобарическая неустойчивость, ведущая к интрузиям холодных вод в глубинные и придонные слои [11, 12]. Причиной неустойчивости могут быть атмосферные воздействия [12], уплотнение при смешении на фронте термобаров

[12, 13], различия в минерализации [14], явления типа «чимни» [15] и апвеллинга [16]. Отмеченное ранее [13, 17] охлаждение глубинных слоев весной и летом объясняется интрузиями – одним из основных механизмов обновления глубинных вод Байкала и аэрации их кислородом [8].

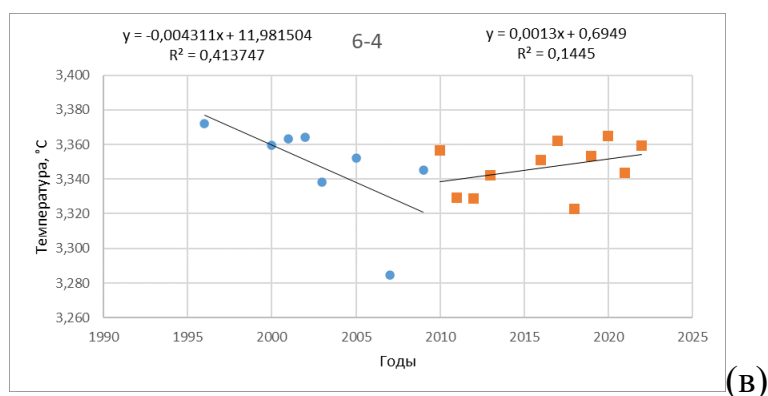
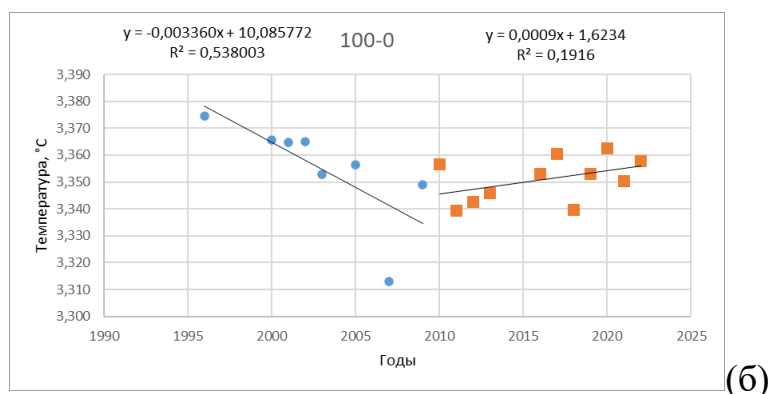
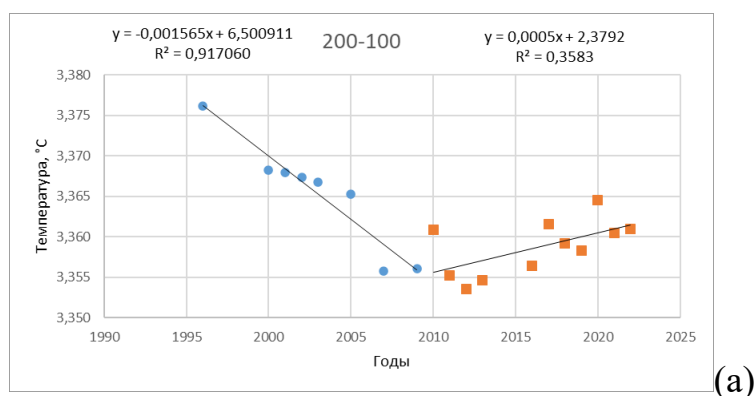


Рисунок 3.8 Тренды температуры воды в придонном, с разделением в 2010 году (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Южный Байкал

Что касается исследуемых придонных слоев, в 2 из 3 случаев наблюдается значимый отрицательный тренд ($-0,016\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ для слоя 200-100 м от дна и $-0,034\text{ }^{\circ}/10\text{ лет}$ для слоя 100-0 м от дна), а затем положительный уже не значимый (рис.3.8).

Следовательно, можно сказать, что тенденция температуры придонных слоев сменилась со снижающейся на растущую.

Далее исследовался температурный режим южной котловины в сентябре (таблицы 3.3-3.4, рис. 3.9-3.12).

Таблица 3.3 Тренды температуры воды ($^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) в сентябре (Южный Байкал) (жирным шрифтом выделены значимые).

Слой	Сентябрь
0-100	-0,164
100-200	0,006
200-400	0,012
400-600	0,000
600-1200	-0,002
200-100	-0,004
100-0	-0,003
6-4	-0,002

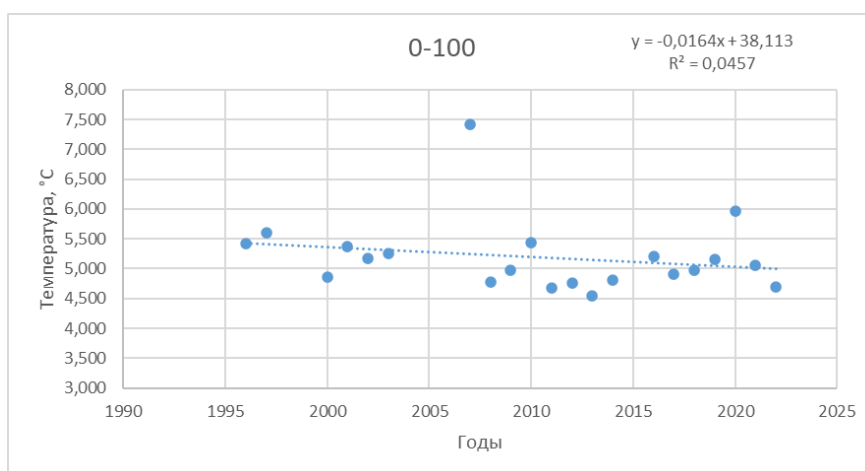


Рисунок 3.9 Тренд температуры воды в слое 0-100 м. Южный Байкал

В сентябре ситуация более стабильная. В слоях от поверхности ни один тренд не значим, и по графикам видно, что ряды близки к стационарности.

Присутствует аномалия высокой температуры в 2007 году, превышающая соседние годы на 2 °С.

Таблица 3.2.4 Тренды температуры воды в сентябре до 2010 года и после. Южный Байкал .(жирным шрифтом выделены значимые).

До 2010			После 2010	
Слой	Сентябрь		Слой	Сентябрь
0-100	0,179		0-100	0,235
200-100	-0,014		200-100	0,003
100-0	-0,023		100-0	0,010
6-4	-0,025		6-4	0,015

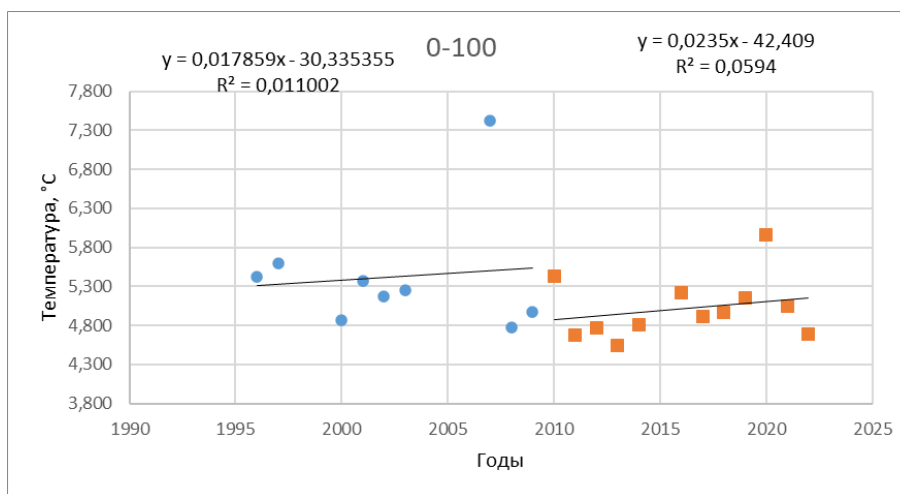


Рисунок 3.10 Тренды температуры воды в слое 0-100 м с разделением в 2010 году. Южный Байкал

В поверхностном слое 0-100 м ситуация по сравнению с июлем изменилась. До 2010 года теперь наблюдается положительная тенденция, но тренд не значим (рис. 3.10).

В глубинных слоях ситуация больше схожа с июлем, имеются отрицательные тренды. Значимый наблюдается только в слое 200-100 м от дна и составляет $-0,004\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, а слои 100-0 м и 6-4 м ближе к стационарным, так как изменения температуры крайне малы (рис. 3.11).

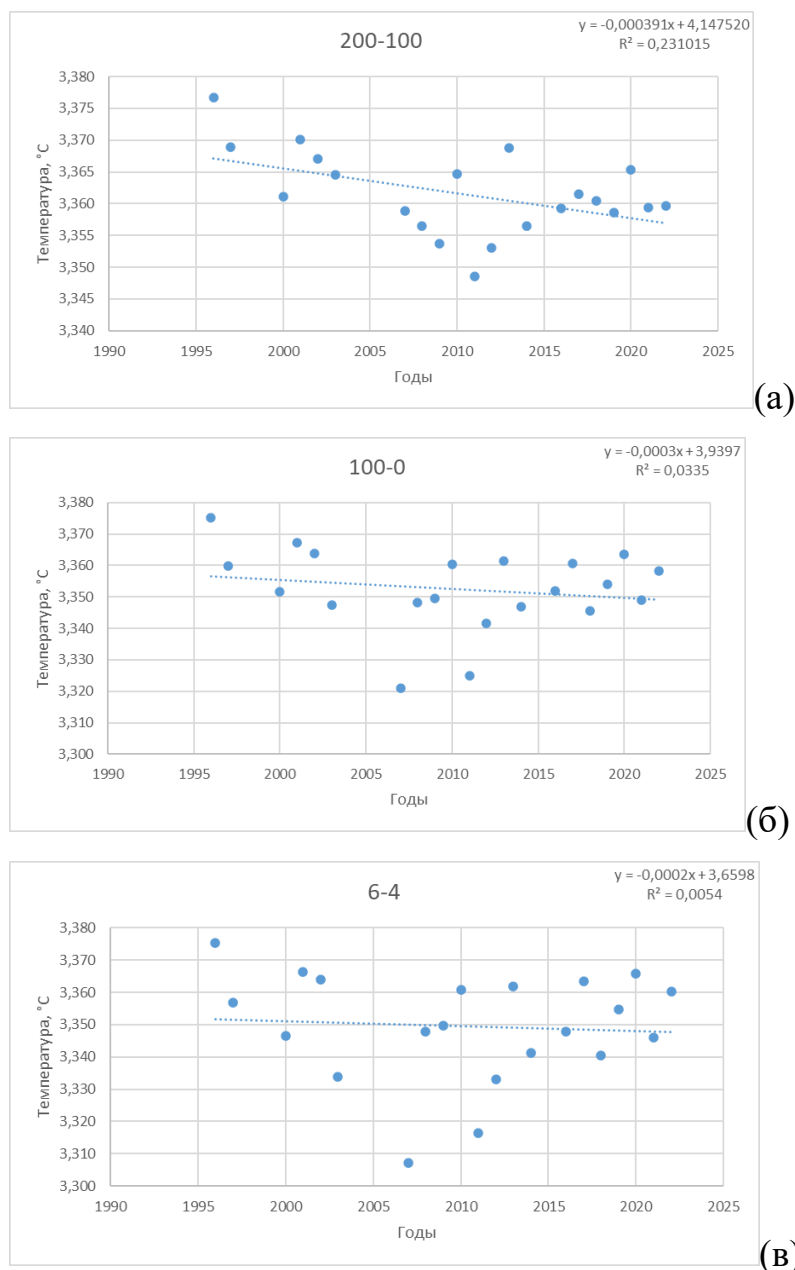


Рисунок 3.11 Тренды температуры воды в придонном слое (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Южный Байкал

В разделенных рядах (рис.3.12) ситуация абсолютно аналогична июлю. До 2010 года в глубинных слоях наблюдаются отрицательные тренды (2 из 3 значимы), а после тенденция сменяется на медленно возрастающую. Тренд в слое 200-100 м от дна равен $-0,014\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, а в слое 100-0 м от дна - $0,023\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$.

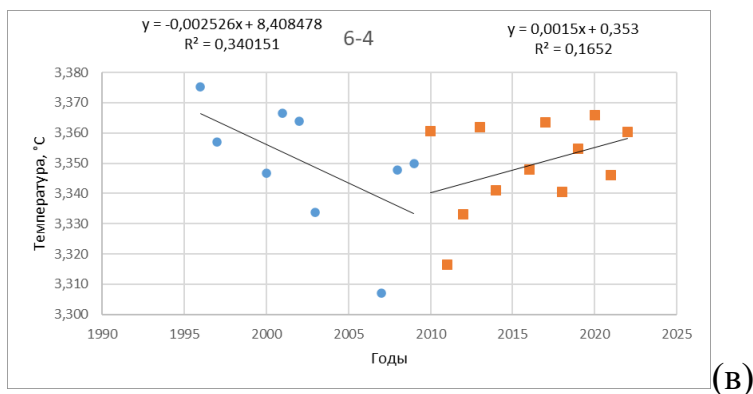
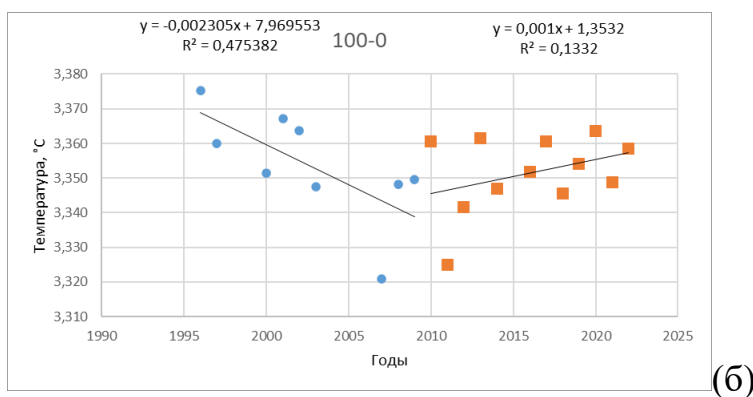
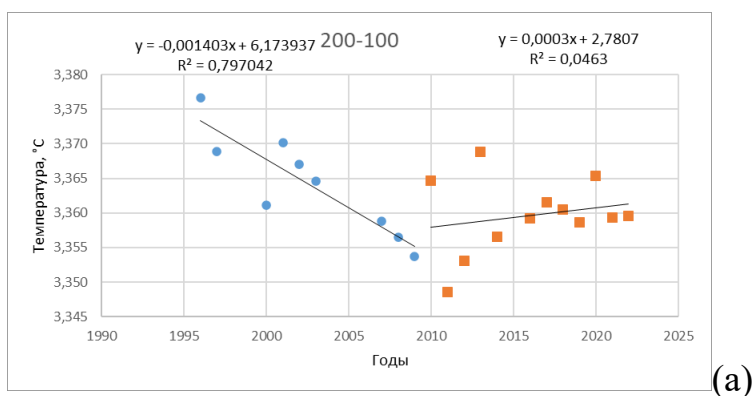


Рисунок 3.12 Тренды температуры воды в придонном слое, с разделением в 2010 году (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Южный Байкал

Следующим этапом изучалась обстановка в октябре (таблицы 3.5-3.6, рис. 3.13-3.16)

В октябре ни один тренд не значим, хотя в графике в слое 0-100 м явно заметна возрастающая тенденция.

Таблица 3.5 Тренды температуры воды (°C/10 лет) в октябре (жирным шрифтом выделены значимые). Южный Байкал

Слой	Октябрь
0-100	0,212
100-200	-0,004
200-400	0,006
400-600	0,004
600-1200	-0,002
200-100	-0,004
100-0	-0,004
6-4	-0,004

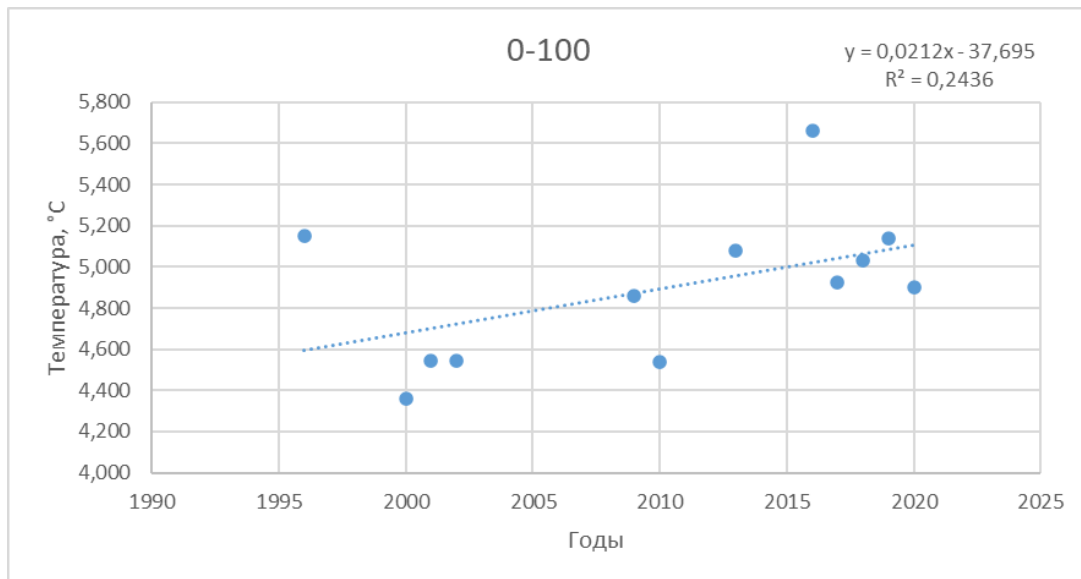


Рисунок 3.13 Тренд температуры воды в слое 0-100 м. Южный Байкал

После разделения на периоды наблюдается картина схожая с июлем, однако ни один тренд незначим. Резко снижающаяся тенденция до 2010 года

может быть обусловлена 2 факторами – или недостаточным количеством станций измерений, или аномально высокой температурой для данного периода в октябре 1996 года.

Таблица 3.6 Тренды температуры воды (°C/10 лет) в октябре до 2010 года и после (жирным шрифтом выделены значимые). Южный Байкал

До 2010			После 2010	
Слой	Октябрь		Слой	Октябрь
0-100	-0,085		0-100	0,337
200-100	-0,019		200-100	0,007
100-0	-0,019		100-0	0,004
6-4	-0,018		6-4	0,005

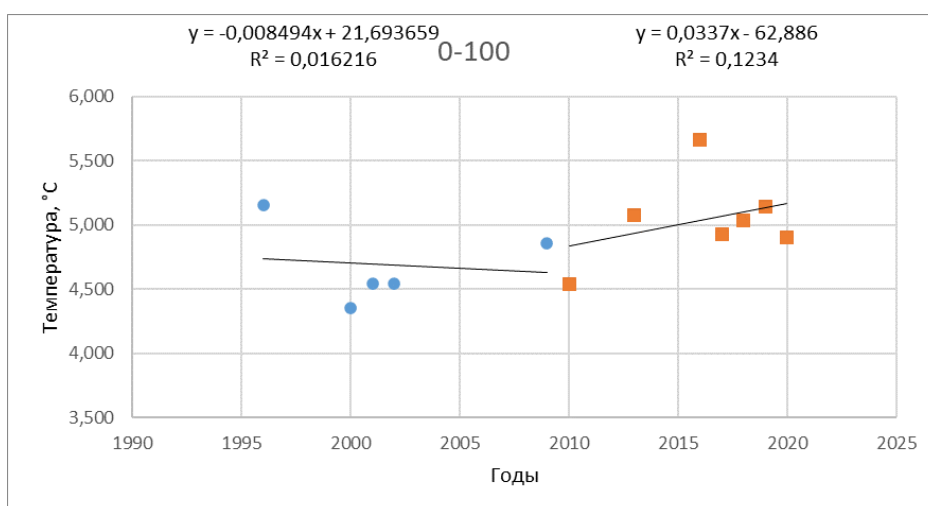
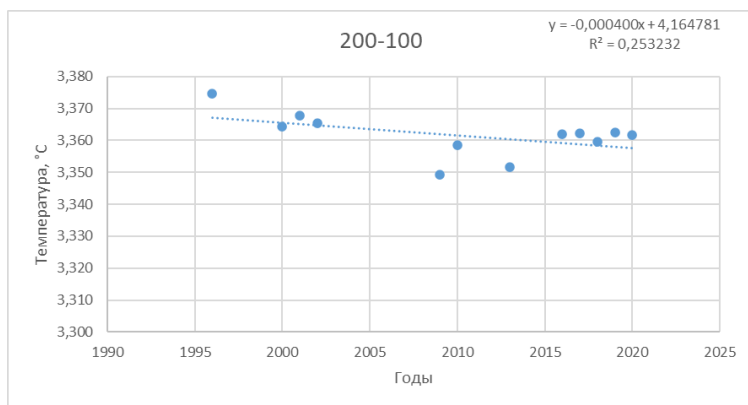
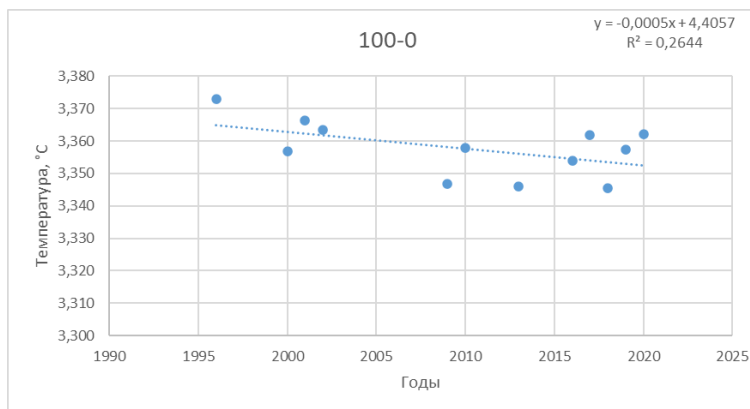


Рисунок 3.14 Тренды температуры воды в слое 0-100 м с разделением в 2010 году. Южный Байкал

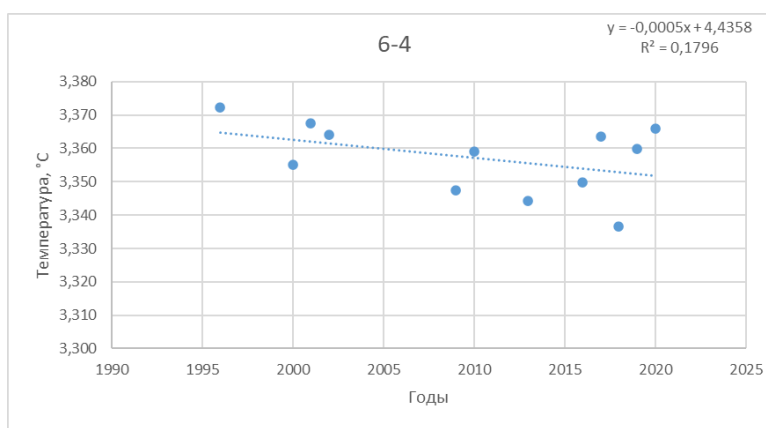
В глубинных слоях присутствует отрицательная тенденция, однако крайне слабая, следовательно ряды практически стационарны (рис.3.15).



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3.15 Тренды температуры воды в придонном слое (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Южный Байкал

В разделенных слоях ситуация повторяется 3 раза (рис.3.16). Сперва идет резкий отрицательный тренд (значимый в слоях 200-100 м и 100-0 м от дна, $Tr = -0.019$ °C/10 лет в обоих случаях), а затем после 2010 года плавно растущая тенденция.

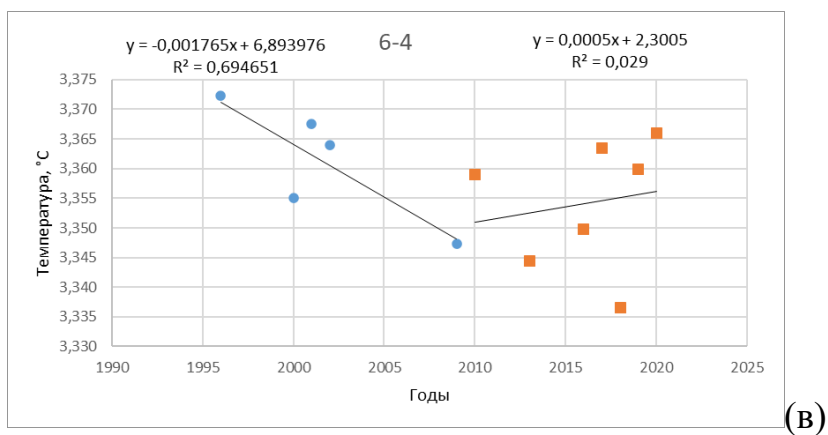
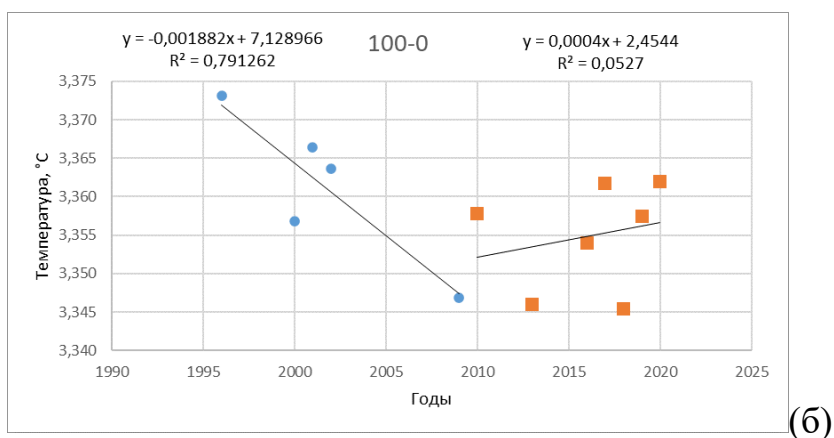
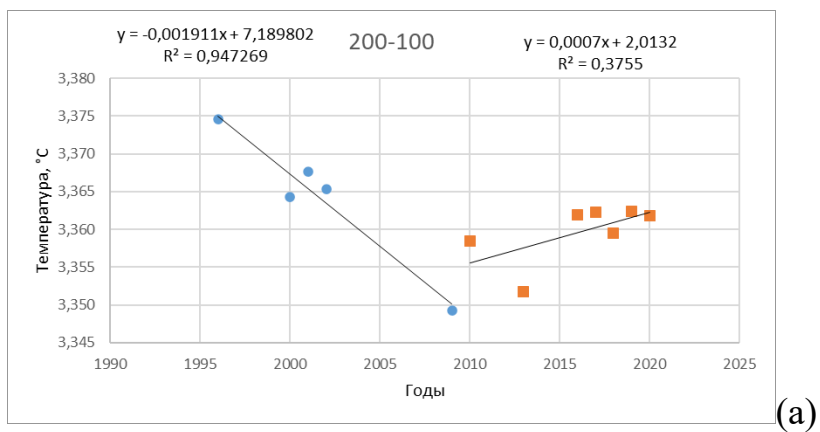


Рисунок 3.16 Тренды температуры воды в придонном слое, с разделением в 2010 году (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Южный Байкал

Последний этап данной главы – проведение анализа трендов южной части за весь период (таблицы 3.7-3.8, рис. 3.17-3.20)

После осреднения данных за весь период тенденции практически исчезли (таблица 3.7). Только в слое 600-1200 м наблюдается значимый отрицательный тренд $T_r = -0.003$ °C/10 лет. В остальных слоях ряды значений температуры воды стационарны.

Таблица 3.7 Тренды температуры воды (°C/10 лет) за весь период (жирным шрифтом выделены значимые). Южный Байкал

Слой	Июль	Сентябрь	Октябрь	Весь период
0-100	0,168	-0,164	0,212	-0,021
100-200	-0,003	0,006	-0,004	0,004
200-400	-0,007	0,012	0,006	0,007
400-600	-0,006	0,000	0,004	-0,001
600-1200	-0,004	-0,002	-0,002	-0,003
200-100	-0,005	-0,004	-0,004	-0,004
100-0	-0,004	-0,003	-0,004	-0,004
6-4	-0,003	-0,002	-0,004	-0,004

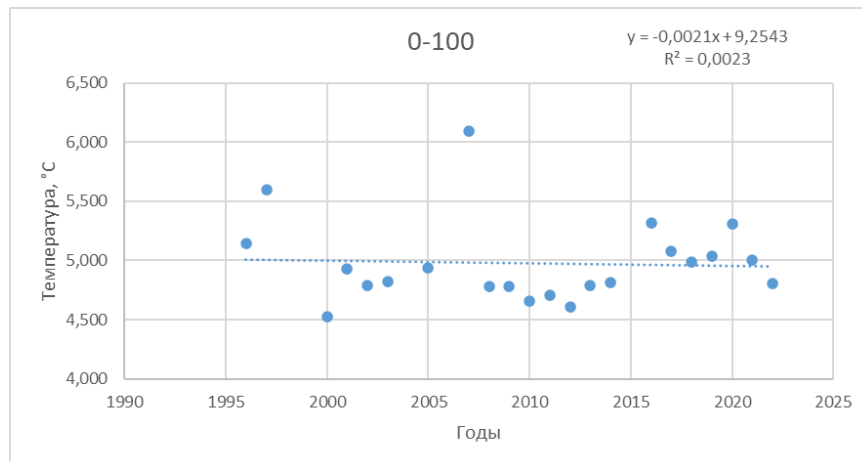
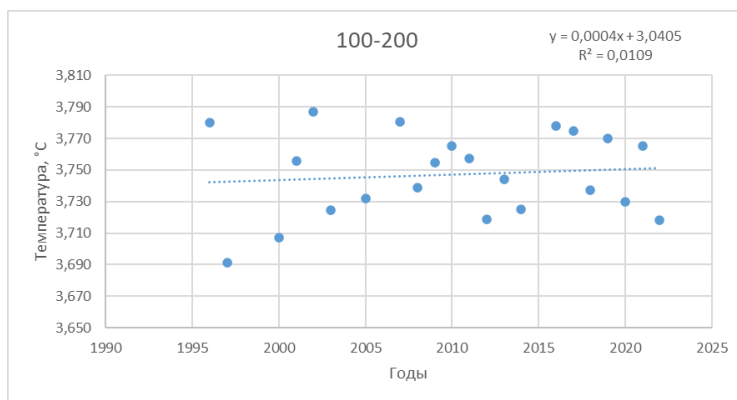
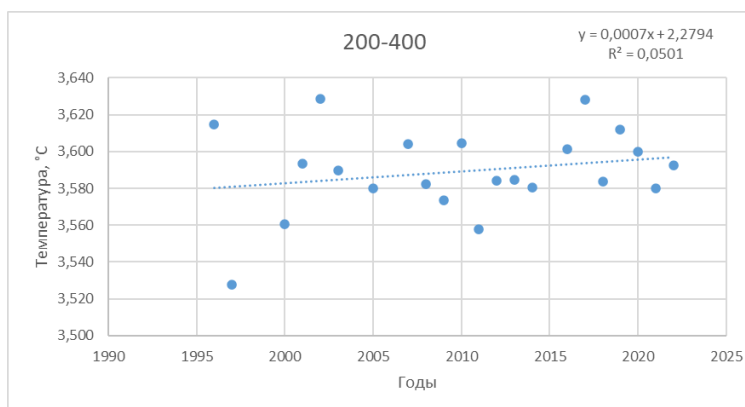


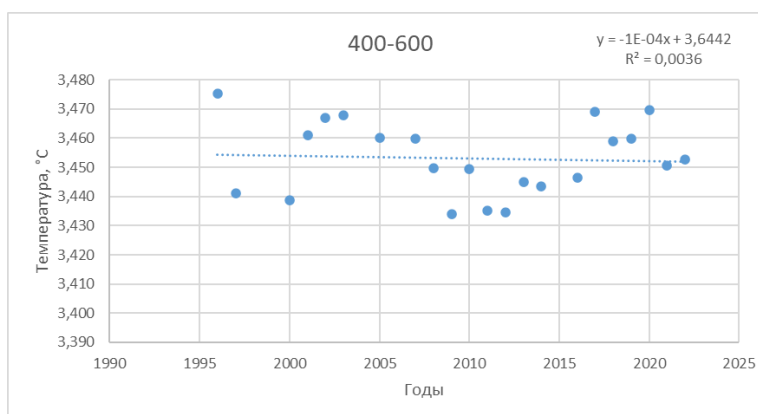
Рисунок 3.17 Тренды температуры воды. Слой – 0-100 м,. Южный Байкал



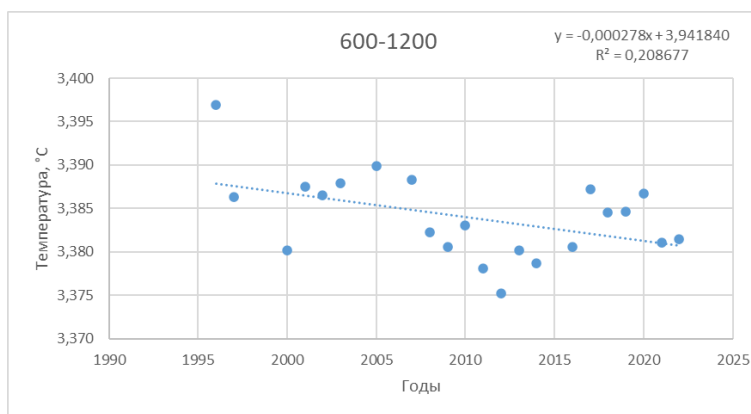
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3.18 Тренды температуры воды (а– б- 100-200 м, б - 200-400 м, в – 400-600 м, г – 600-1200 м). Южный Байкал

Таблица 3.8 Тренды температуры воды (°C/10 лет) в октябре до 2010 года и после (жирным шрифтом выделены значимые). Южный Байкал

До 2010				
Слой	Июль	Сентябрь	Октябрь	Весь период
0-100	-0,082	0,179	-0,085	-0,053
200-100	-0,016	-0,014	-0,019	-0,014
100-0	-0,034	-0,023	-0,019	-0,024
6-4	-0,043	-0,025	-0,018	-0,028

После 2010				
Слой	Июль	Сентябрь	Октябрь	Весь период
0-100	0,572	0,235	0,337	0,354
200-100	0,005	0,003	0,007	0,005
100-0	0,009	0,010	0,004	0,010
6-4	0,013	0,015	0,005	0,015

Поверхностный слой (рис.3.17,3.19) в случае анализа за весь период не представляет особого интереса. Положительный тренд до 2010 года в сентябре компенсировал отрицательные в июле и октябре, за счет чего образовалась стационарность. В связи с этим южный район Байкала и был разобран отдельно по каждому месяцу.

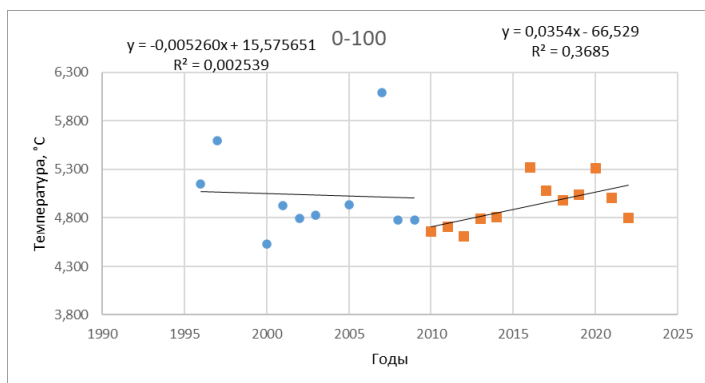


Рисунок 3.19 Тренды температуры воды в слое 0-100 м с разделением в 2010 году. Южный Байкал

Что касается глубинных слоев (рис.3.20, 3.21), во всех случаях наблюдается отрицательный тренд, но только в слое 200-100 м от дна он значим, $Tr = - 0.004 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$.

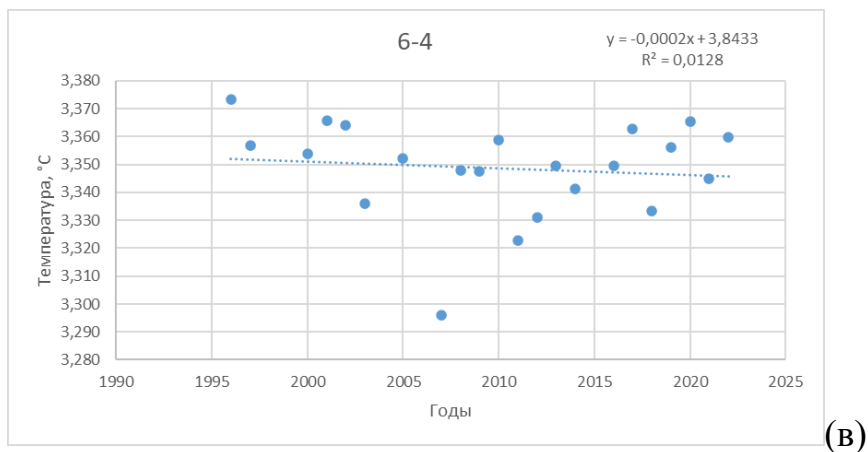
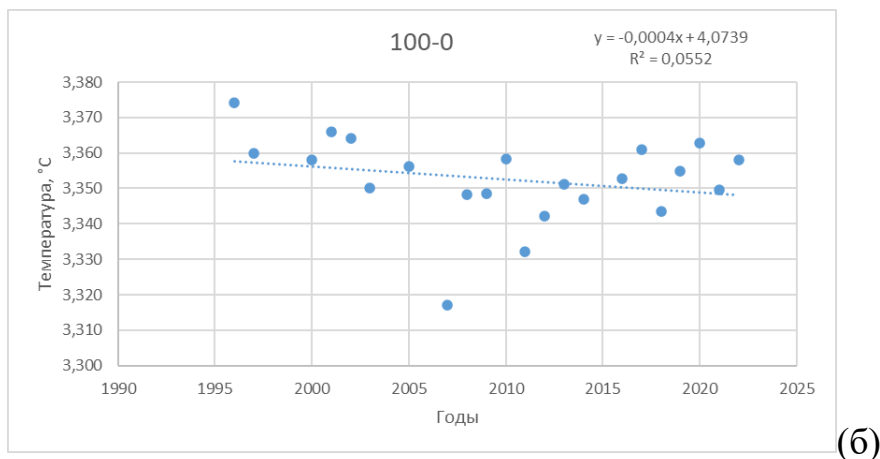
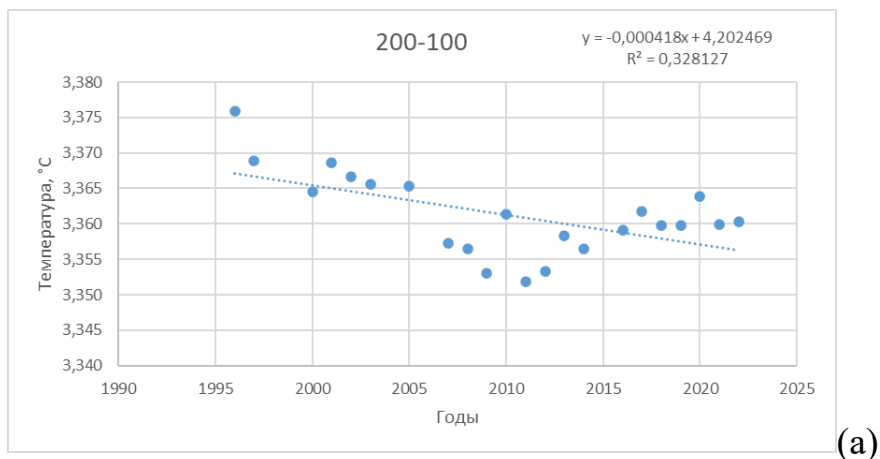


Рисунок 3.20 Тренд температуры воды в придонном слое (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Южный Байкал

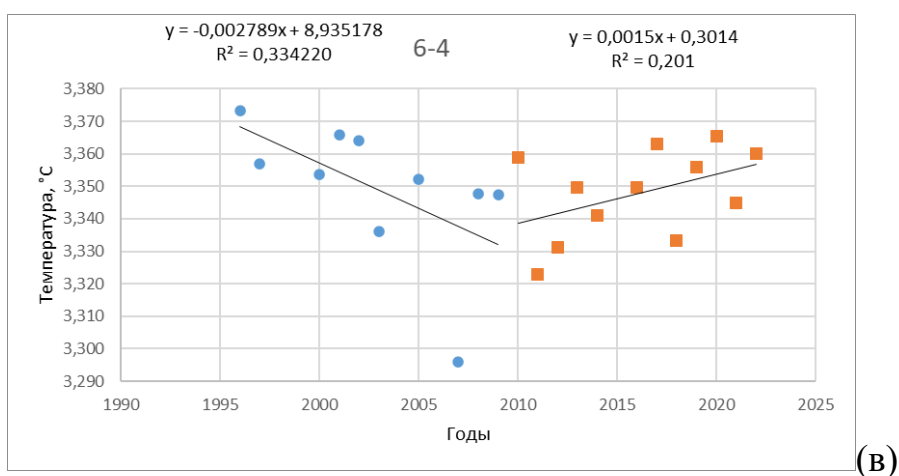
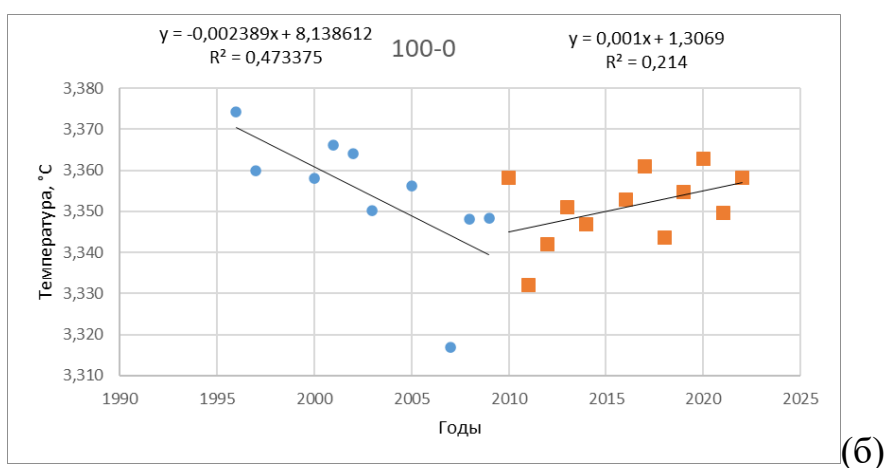
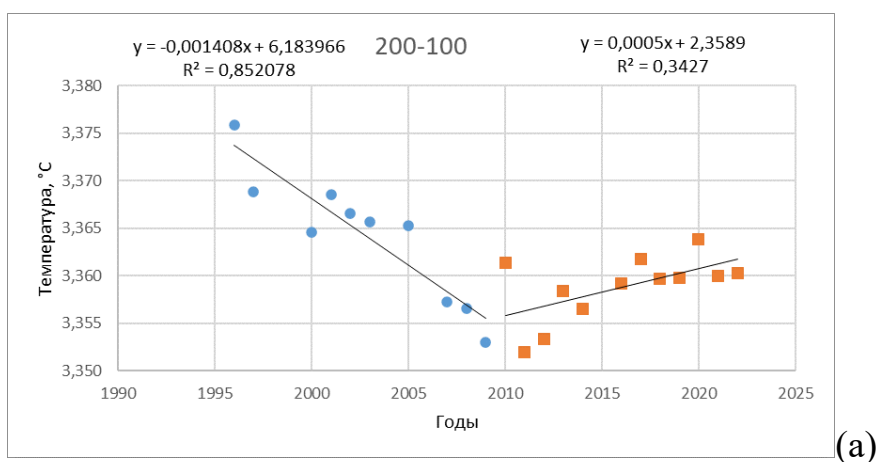


Рисунок 3.21 Тренд температуры воды в придонном слое, с разделением в 2010 году (а – 0-100 м, б- 100-200 м, в – 200-400 м, г – 400-600 м, д – 600-1200 м). Южный Байкал

После разделения, за весь период, так как во всех 3 месяцах было схожая ситуация, здесь она также видна. До 2010 года значимые в слоях 200-100 м и 100-

0 м отрицательные тренды, равные $-0,014$ °C/10 лет и $-0,024$ °C/10 лет соответственно. После 2010 года появился значимый положительный тренд $Tr = 0.005$ °C/10 лет, хотя в предыдущих случаях такого не наблюдалось.

Для анализа вертикальной структуры вод в котловинах озера Байкал были построены разрезы для Южной котловины, состоящие из данных осредненных за 3 месяца. Для анализа были выбраны год начала исследования – 1996 год, 2010 год, и последний – 2022 год.

На каждом из рисунков (рис. 3.21-3.23), изображена карта станций, где проводились измерения, разрез температуры воды от поверхности до дна и разрез от поверхности до начала слоя относительно однородных температур. Тонкими белыми полосами отмечены станции.

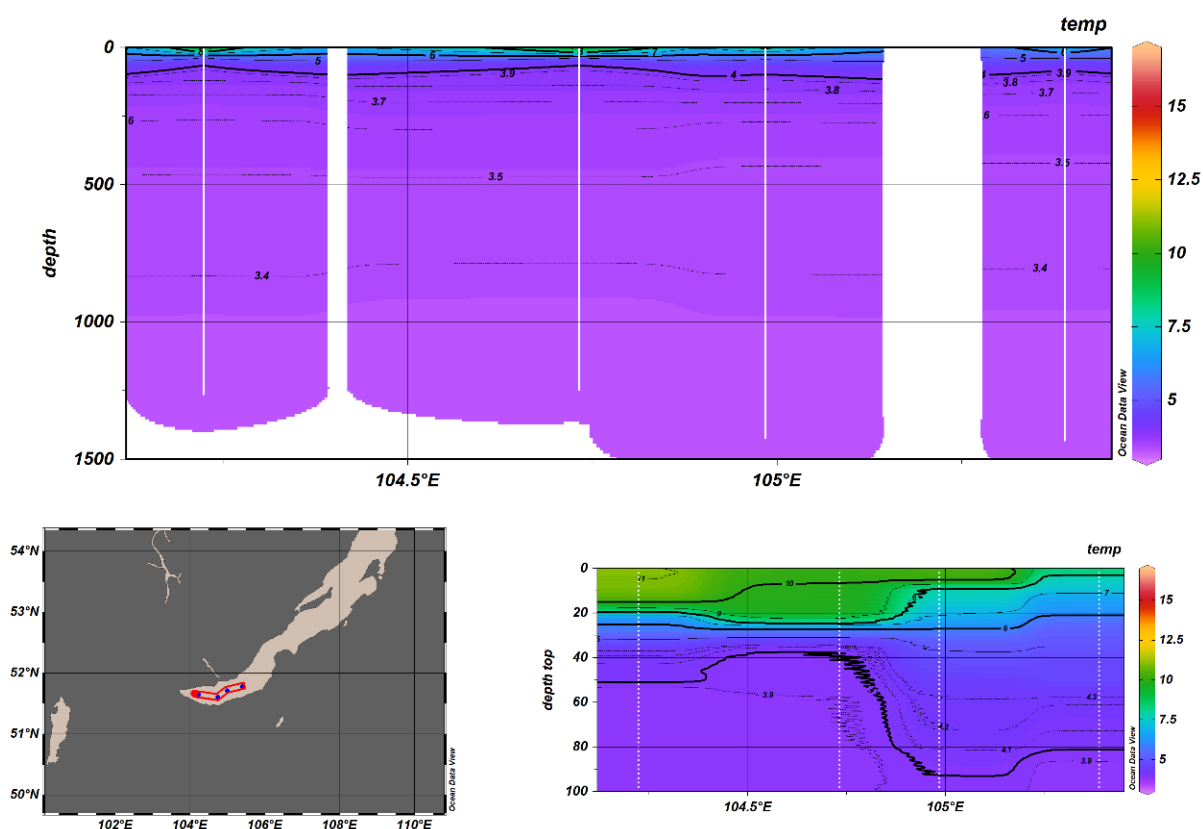


Рисунок 3.21 Разрезы температуры воды в Южной котловине Байкала за 1996 год

Анализ вертикальной структуры температуры воды в Южной котловине озера Байкал за 1996, 2010 и 2022 годы показывает значительные изменения на протяжении исследуемого периода. В 1996 году температура поверхностного слоя (0-100 м) была относительно низкой и стабильной по всей глубине. Средний и придонный слои, достигающие глубины до 1600 м, характеризовались постепенным снижением температуры без значительных аномалий (рис.3.21).

К 2010 году в поверхностном слое наблюдалось некоторое повышение температуры воды по сравнению с 1996 годом. Глубинные слои демонстрировали аномалию, связанную с холодной придонной интрузией 2007 года, которая привела к снижению температуры. Тем не менее, общий тренд указывал на начало увеличения температур в придонных слоях после 2010 года.

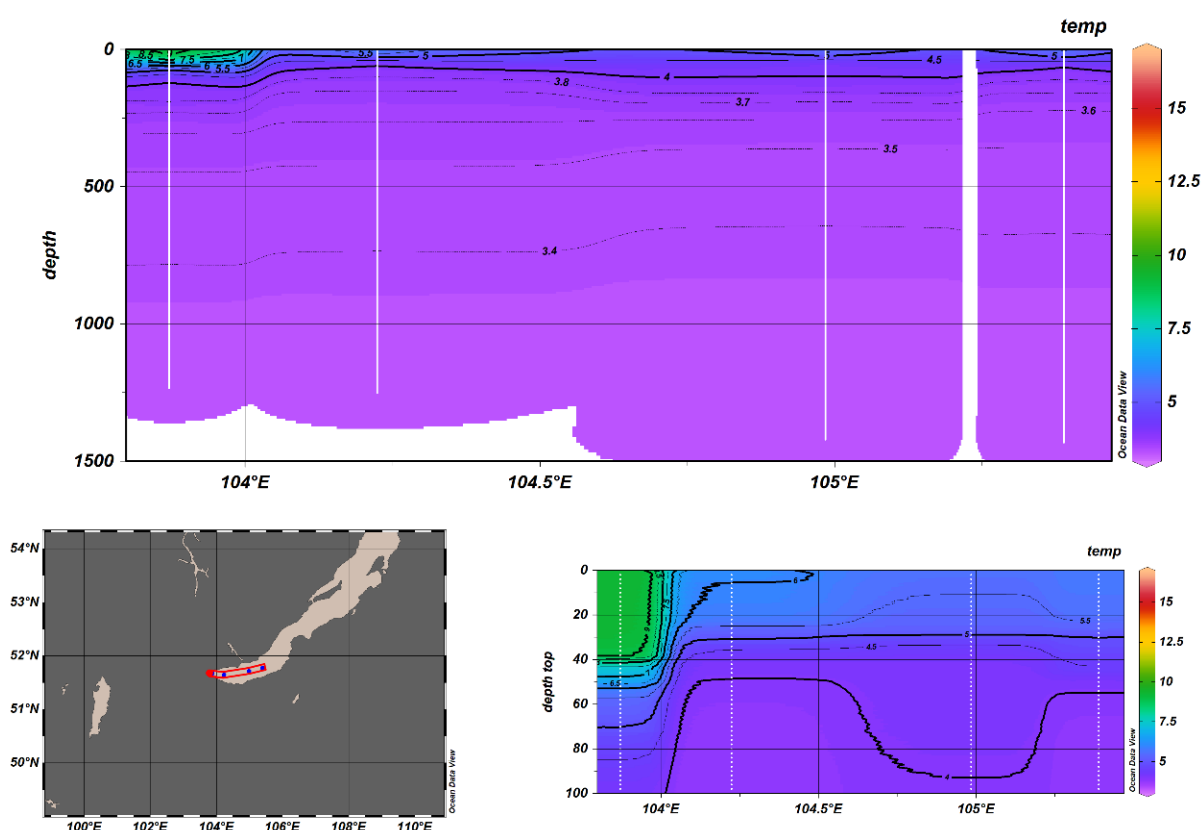


Рисунок 3.22 Разрезы температуры воды в Южной котловине Байкала за 2010 год

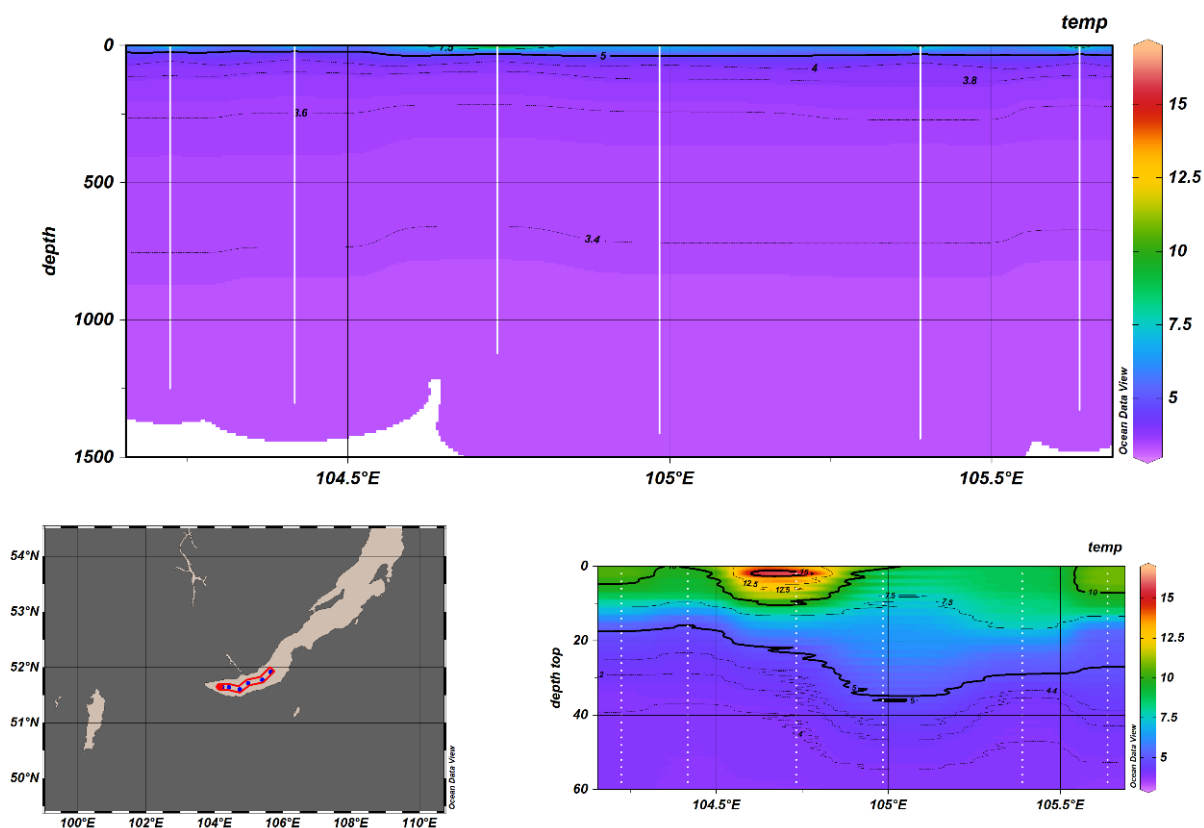


Рисунок 3.23 Разрезы температуры воды в Южной котловине Байкала за 2022 год

К 2022 году (рис.3.23) в поверхностном слое произошло значительное повышение температуры. В средних слоях (200-400 м) температура также увеличилась, хотя и не так существенно, как в поверхностном слое. В придонных слоях (600-1600 м) продолжился тренд повышения температуры, начавшийся после 2010 года.

Эти изменения свидетельствуют о значительном влиянии климатических и гидрологических процессов на температурный режим воды в Южной котловине Байкала. Повышение температуры поверхностного слоя может быть связано с изменением атмосферных условий, таких как увеличение солнечной радиации и уменьшение ледового покрова зимой. В то же время, изменения в глубоких слоях могут указывать на долгосрочные климатические тенденции и внутренние динамические процессы озера.

3.3. Анализ температуры воды в Среднем Байкале

Далее была рассмотрена ситуация в районе Среднего Байкала (таблицы 3.9-3.10, рис. 3.24 -3.31).

Половина рассматриваемых рядов стационарны, тренды не значимы, а тенденции температуры воды едва заметны. Выделяются три слоя со значимыми трендами: 0-100 м, где виден рост температуры с годами, $T_r = 0,159$ °C/10 лет; 200-400 м – наблюдается небольшое изменение – всего $-0,004$ °C/10 лет; 400-600 м, где хорошо виден значимый отрицательный тренд, равный $-0,009$ °C/10 лет. Так же в слоях от 0 до 400 м присутствует аномально низкая температура в 2010 году.

Таблица 3.9 Тренды температуры воды (°C/10 лет) (жирным шрифтом выделены значимые). Средний Байкал

Слой	Июль	Сентябрь	Октябрь	Весь период
0-100	0,210	0,067	0,168	0,159
100-200	-0,008	0,004	0,016	0,002
200-400	-0,013	-0,002	0,005	-0,004
400-600	-0,009	-0,008	-0,006	-0,009
600-1200	0,000	0,003	0,004	0,001
200-100	0,007	0,003	0,009	0,006
100-0	0,004	0,006	0,010	0,005
6--4	0,001	0,006	0,011	0,005

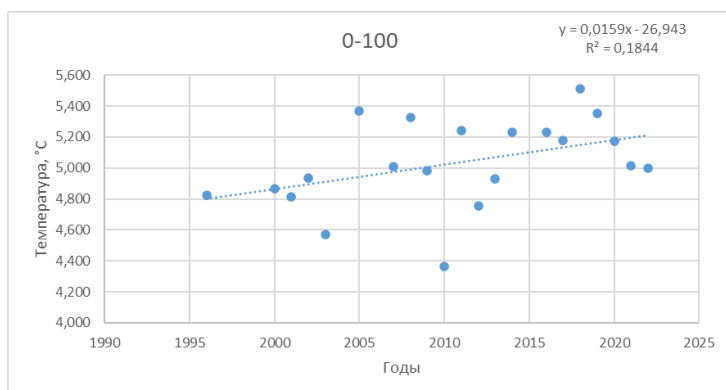


Рисунок 3.24 Тренд температуры воды в слое 0-100 м. Средний Байкал

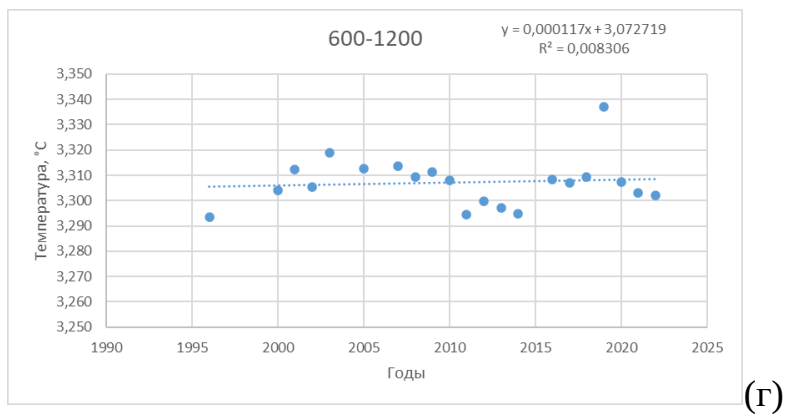
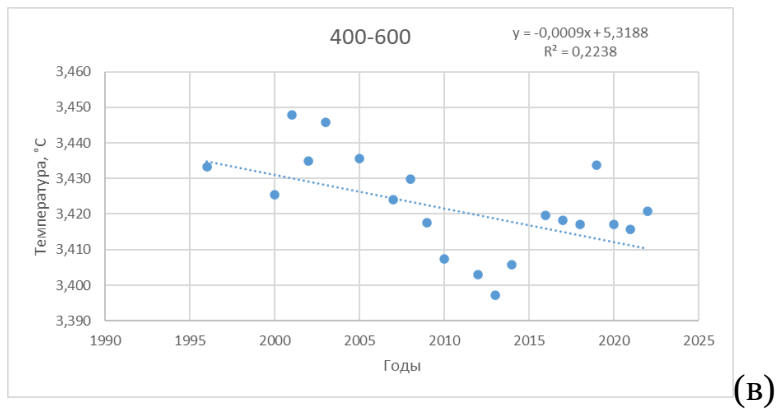
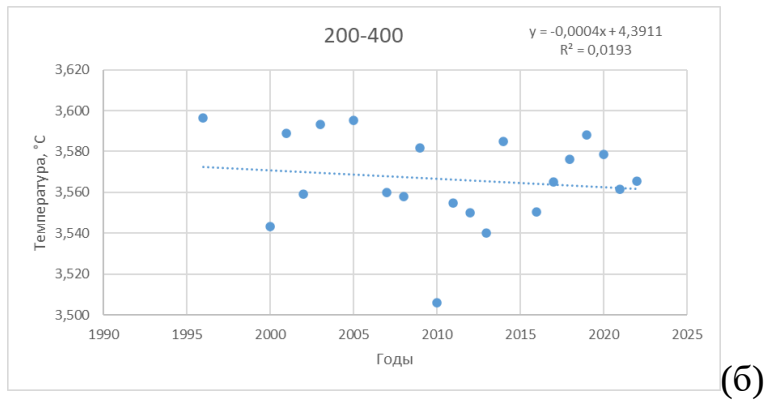
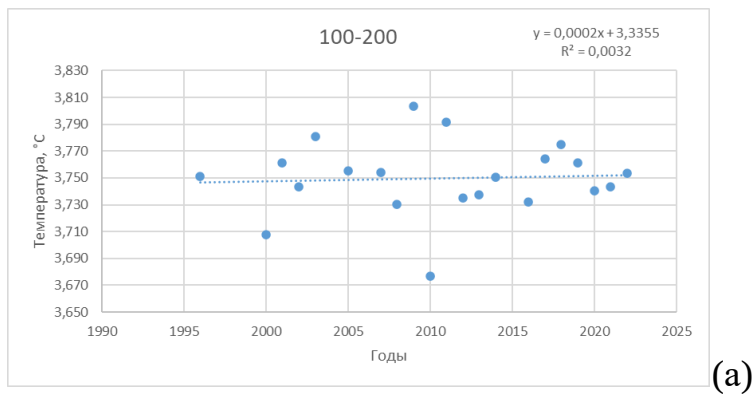


Рисунок 3.25 Тренд температуры воды (, а- 100-200 м, б – 200-400 м, в – 400-600 м, г – 600-1200 м). Средний Байкал

Поверхностный слой в Среднем Байкале как до разделения, так и после имеет положительный незначимый тренд. На дистанции в 20 лет колебания температуры не заметны (таблица 3.10).

Таблица 3.10 Тренды температуры воды (°C/10 лет) в октябре до 2010 года и после (жирным шрифтом выделены значимые). Средний Байкал

До 2010				
Слой	Июль	Сентябрь	Октябрь	Весь период
0-100	0,403	0,111	0,464	0,317
200-100	0,021	0,005	0,024	0,015
100-0	0,018	0,015	0,014	0,016
6-4	0,011	0,020	0,008	0,014

После 2010				
Слой	Июль	Сентябрь	Октябрь	Весь период
0-100	0,528	0,323	-0,16	0,344
200-100	0,014	0,005	0,019	0,016
100-0	0,024	0,017	0,037	0,028
6-4	0,030	0,026	0,058	0,038

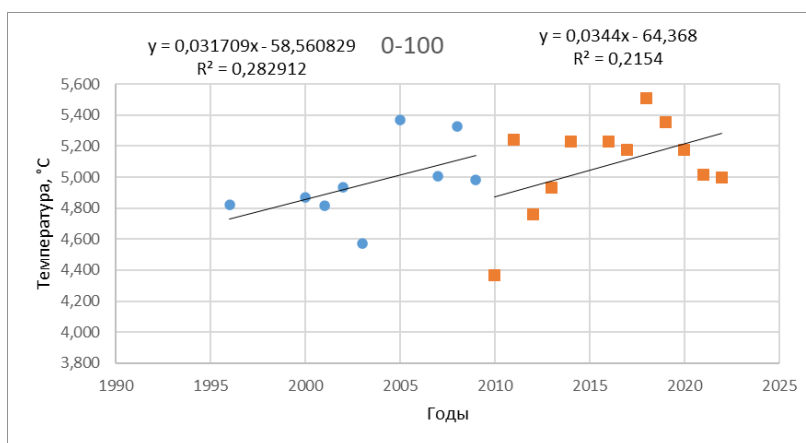


Рисунок 3.26 Тренды температуры воды в слое 0-100 м с разделением в 2010 году. Средний Байкал

Глубинные слои (рис. 3.27) в Среднем Байкале не представляют особого интереса, т.к. они полностью стационарны. Можно лишь отметить в слоях от 100 метров от дна небольшой спад температуры с 2009 по 2013 годы и аномально высокую температуру в 2019 году.

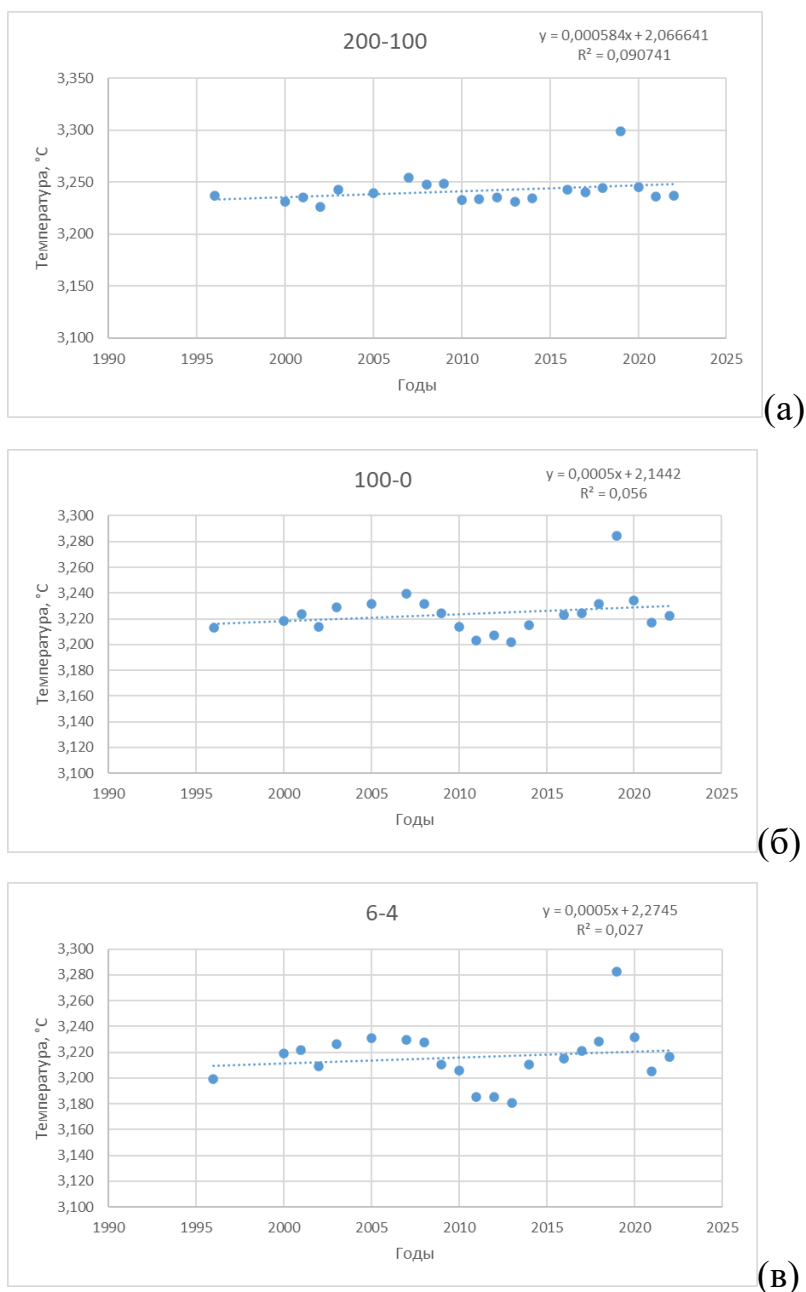


Рисунок 3.27 Тренд температуры воды в придонном слое (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Средний Байкал

Глубинные слои Среднего Байкала (рис. 3.28) так же, как и поверхностный не имеют переломного момента в 2010 году и показывают растущую тенденцию температуры до разделения и после. Можно отметить только, что значимые тренды наблюдались в слоях 200-100 ($Tr = 0,015\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) и 100-0 м ($Tr = 0,016\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) от дна до разделения, и в слое 6-4 м ($Tr = 0,038\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) от дна после.

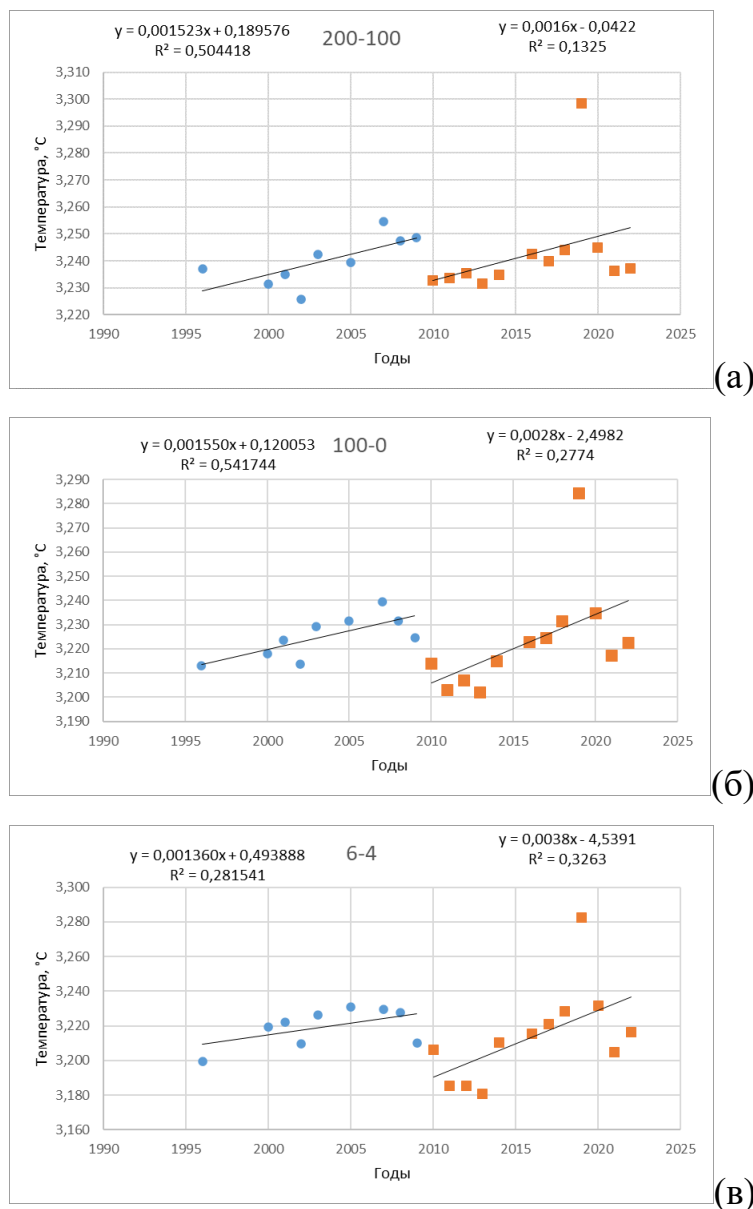


Рисунок 3.28 Тренд температуры воды в придонном слое, с разделением в 2010 году (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Средний Байкал

В Средней котловине озера Байкал (рис. 3.29) температурные изменения также демонстрируют интересные закономерности. В 1996 году температуры во всех слоях были стабильны без значительных отклонений. Придонные слои (до 1600 м) характеризовались плавным снижением температуры с глубиной. Поверхностный слой относительно стабилен, но на самой западной станции был обнаружен достаточно широкий 15 метровый слой температуры до 10°C.

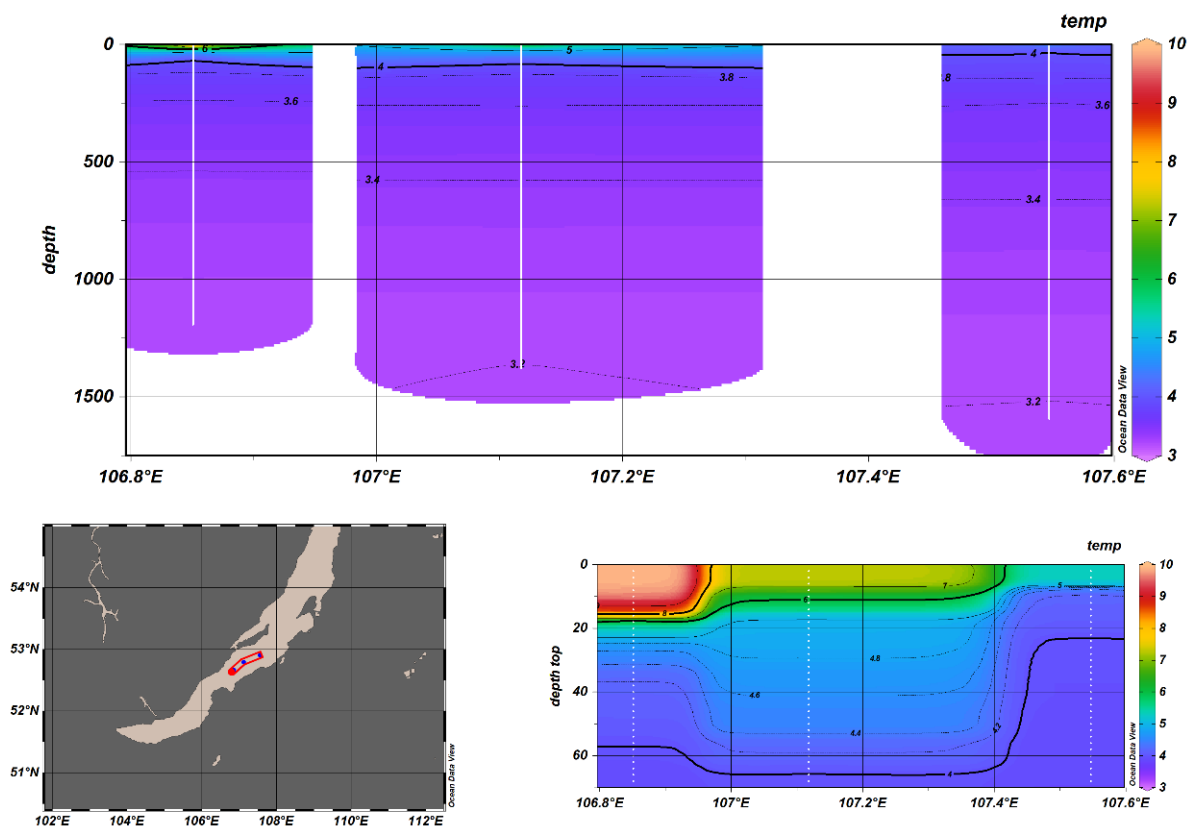


Рисунок 3.29 Разрезы температуры воды в Средней котловине Байкала за 1996 год

В 2010 году (рис.3.30) в поверхностном слое (0-100 м) наблюдался небольшой спад температуры. Однако на глубине в 1600 м на самой восточной станции была зафиксирована аномалия низкой температуры (3,2°C), вероятно, связанная с придонной интрузией. В остальных же слоях температура достаточно стабильна, без резких скачков.

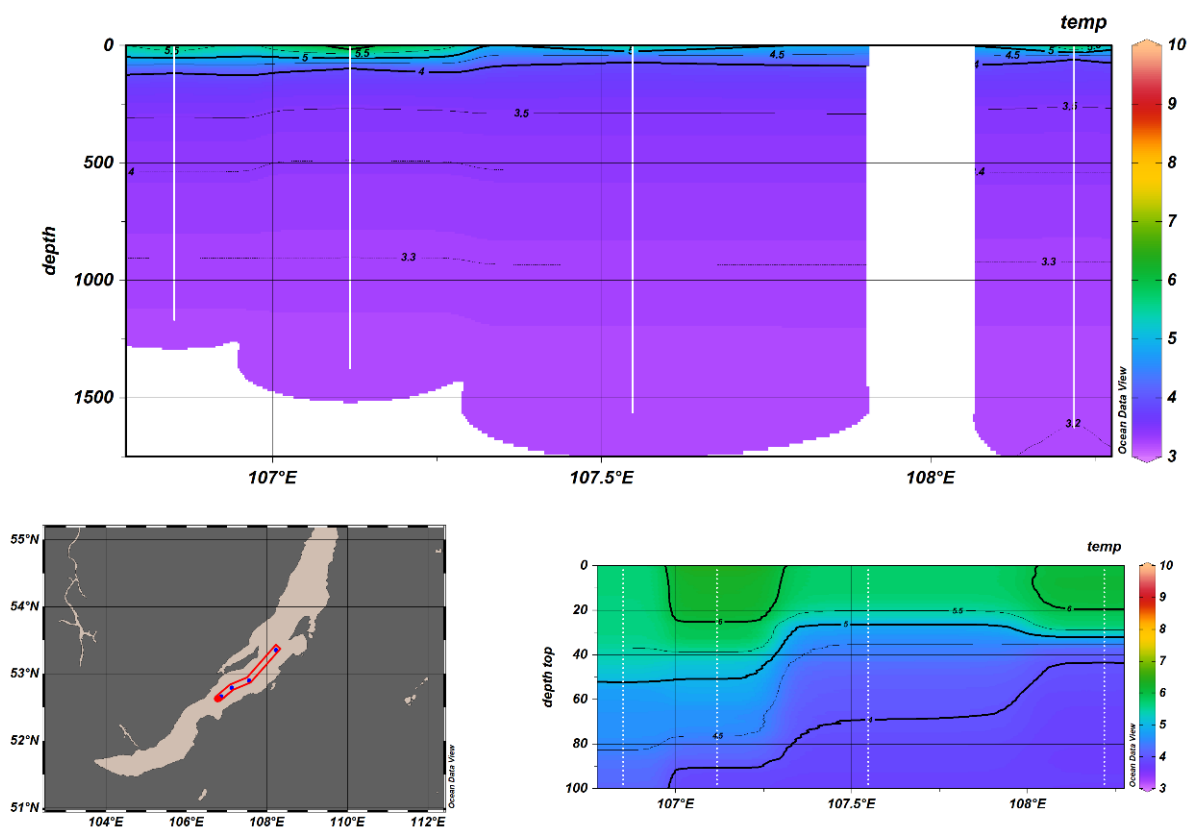


Рисунок 3.30 Разрезы температуры воды в Средней котловине Байкала за 2010 год

К 2022 году (рис.3.31) тенденция к увеличению температуры в поверхностном слое продолжилась. В слоях до 600 м до дна наблюдается повышение температуры, что соответствует общему тренду потепления. В придонных слоях достаточно стабильные значения, холодные интрузии не обнаружены.

Эти данные указывают на значительные сезонные и межгодовые колебания температуры в Средней котловине. Изменение температуры поверхностного слоя может быть связано с глобальными климатическими изменениями и изменениями в ледовом режиме. Аномалии температуры в глубоких слоях могут быть обусловлены внутренними циркуляционными процессами, влияющими на термический режим озера.

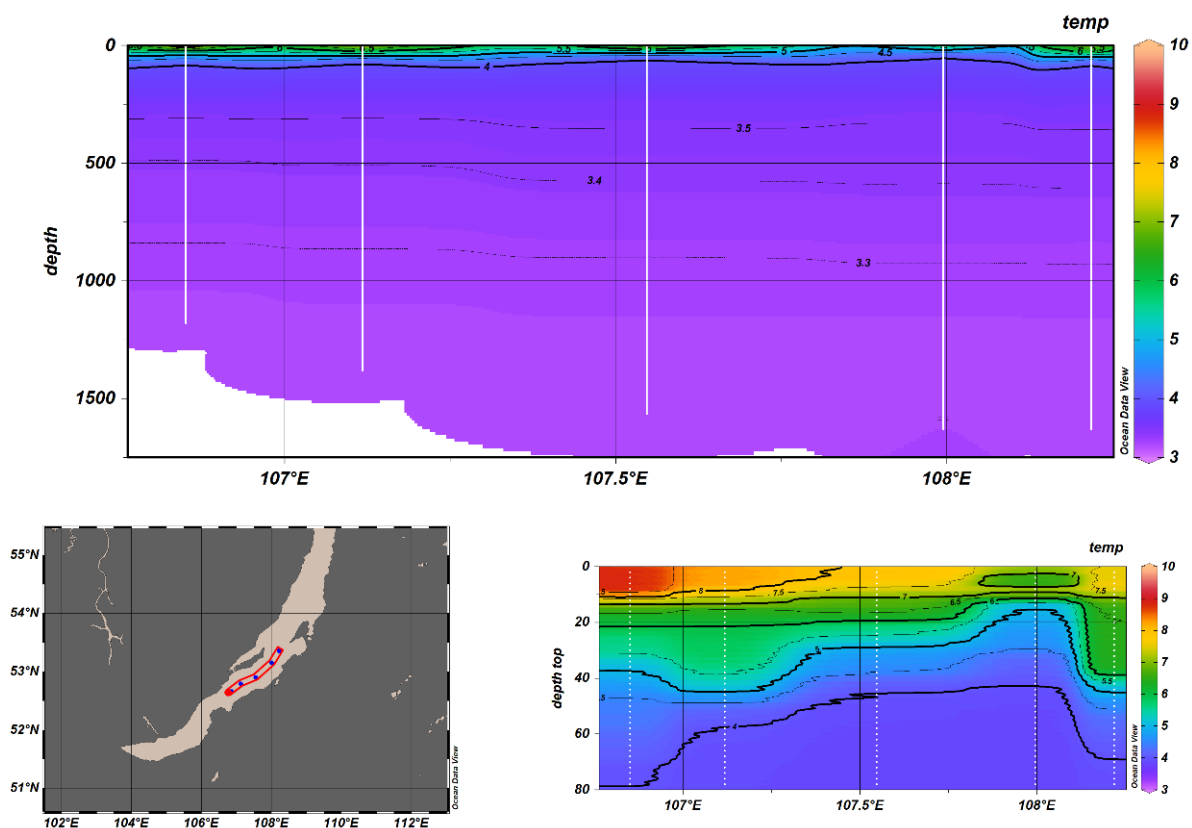


Рисунок 3.31 Разрезы температуры воды в Средней котловине Байкала за 2022 год

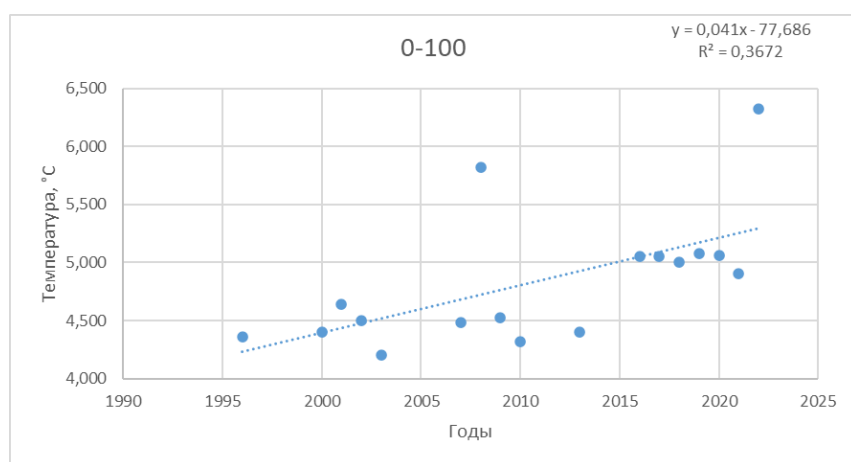
3.4. Анализ температуры воды в Северном Байкале

Северный Байкал является наиболее малоизученным, поэтому вызывает наибольший интерес к происходящим в нем процессам и изменениям температуры.

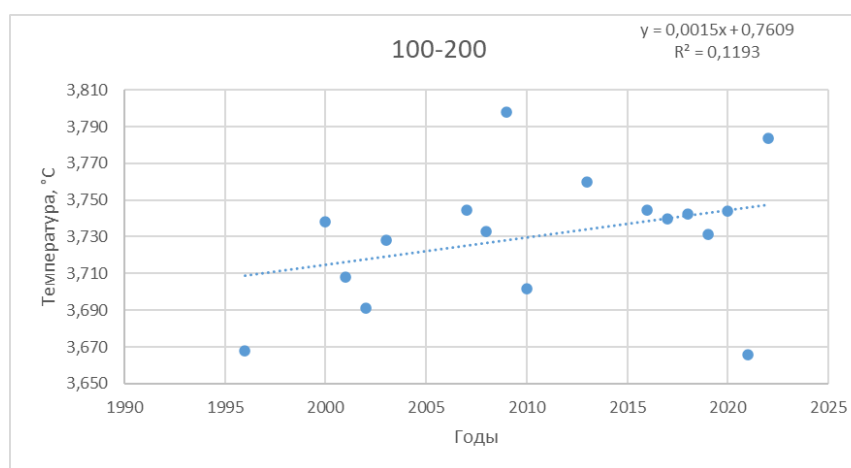
Несмотря на то, что только два тренда в 5 исследуемых слоях (таблица 3.11) значимы, на всех графиках (рис.3.32 -3.35 достаточно хорошо прослеживается тенденция возрастания температуры. Можно спокойно сказать, что Северный Байкал за изучаемые 20 лет только нагревался. Величина трендов при этом составила немалые $0,41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ в поверхностном слое, и $0,007\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ в слое 400-600 м.

Таблица 3.11 Тренды температуры воды (°C/10 лет) (жирным шрифтом выделены значимые). Северный Байкал

Слой	Июль	Сентябрь	Октябрь	Весь период
0-100	0,473	0,141	0,049	0,410
100-200	0,032	-0,002	0,025	0,015
200-400	0,010	0,003	-0,013	0,003
400-600	0,008	0,008	-0,022	0,007
600-1200	0,008	0,009	-0,040	0,008
200-100	0,009	0,008	-0,054	0,008
100-0	0,008	0,009	-0,060	0,009
6--4	0,008	0,011	-0,061	0,010



(а)



(б)

Рисунок 3.32 Тренды температуры воды (а – 0-100 м, б- 100-200 м). Северный Байкал

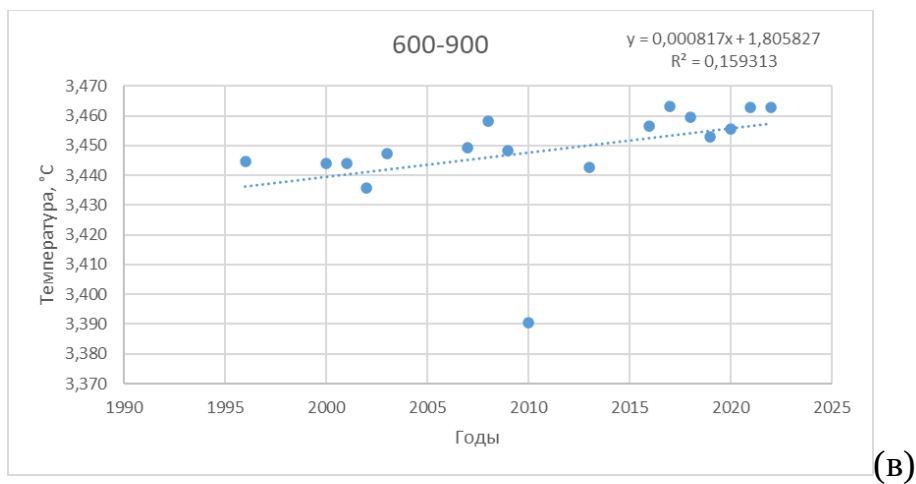
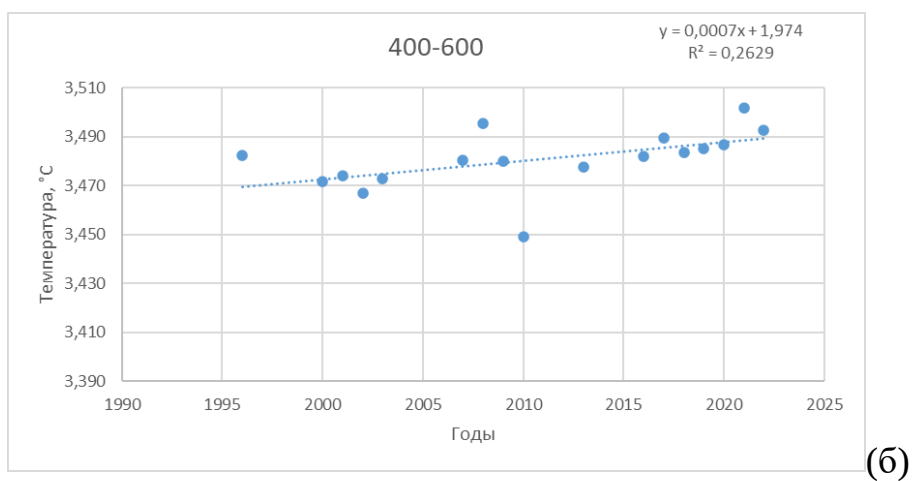
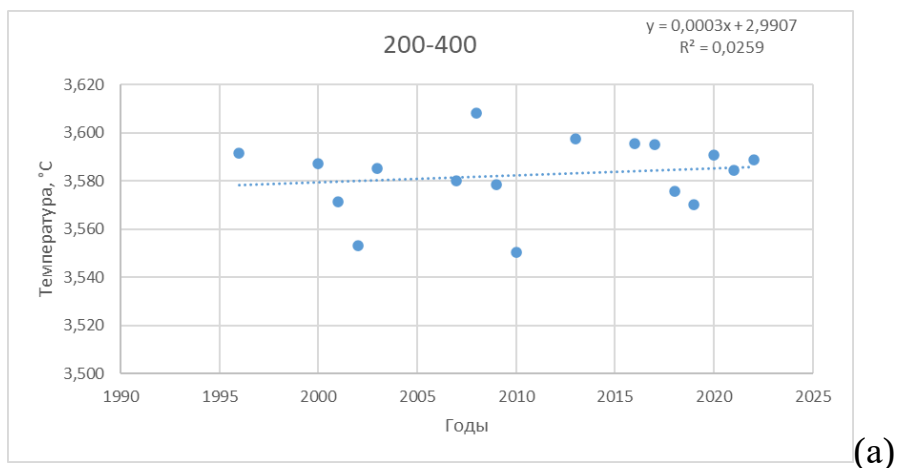


Рисунок 3.33 Тренды температуры воды (а 200-400 м, б – 400-600 м, в – 600-1200 м). Северный Байкал

Наблюдаются (рис. 3.33) аномально высокие температуры в слое 0-100 м в 2008 и 2022 годах, превышающие температуры соседних лет практически на 1,5 °C.

При разделении слоя 0-100 м на периоды, оба тренда (таблица 3.12, рис. 3.34 получились положительными, но значим только второй – 0,133 °C/10 лет.

Таблица 3.12 Тренды температуры воды в октябре до 2010 года и после (жирным шрифтом выделены значимые). Северный Байкал

До 2010				
Слой	Июль	Сентябрь	Октябрь	Весь период
0-100	0,566	0,202	0,395	0,530
200-100	0,010	0,009	-0,042	0,010
100-0	0,003	0,006	-0,050	0,010
6-4	-0,002	-0,002	-0,049	0,001

После 2010				
Слой	Июль	Сентябрь	Октябрь	Весь период
0-100	0,131	0,588	0,466	1,133
200-100	0,023	0,017	0,137	0,060
100-0	0,033	0,027	0,164	0,068
6-4	0,042	0,036	0,194	0,074

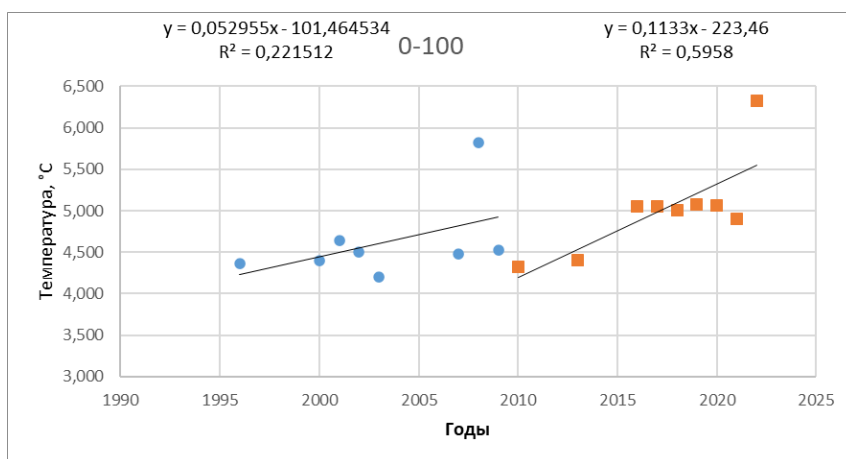


Рисунок 3.34 Тренды температуры воды в слое 0-100 м с разделением в 2010 году. Северный Байкал

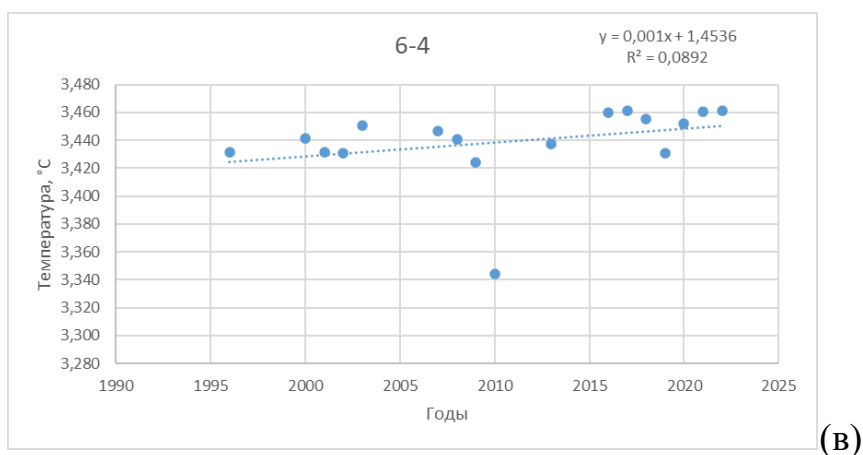
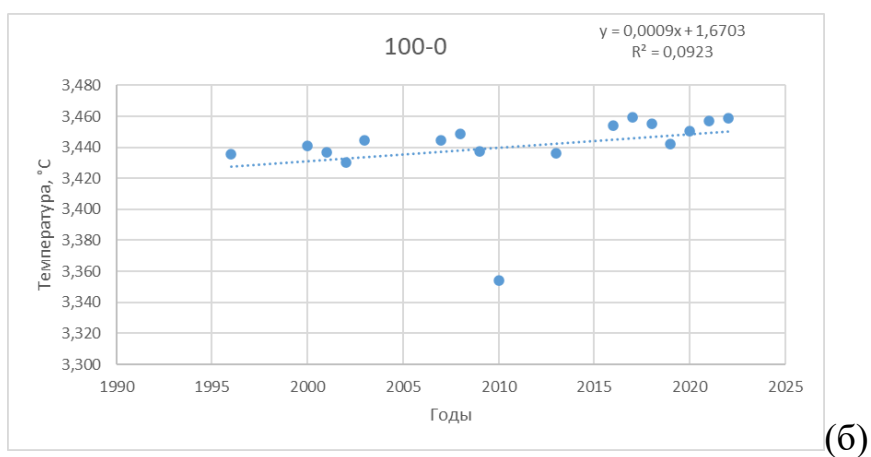
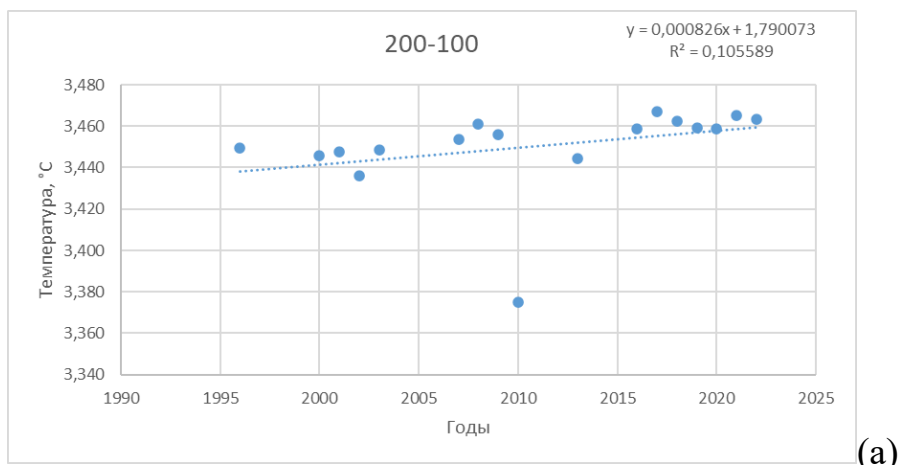


Рисунок 3.35 Тренд температуры воды в придонном слое (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Северный Байкал

В глубинных слоях Северного Байкала уже не такой заметный рост температуры. Тренды незначимы, а ряды близки к стационарности. Во всех 3 случаях наблюдается аномалия низкой температуры в 2010 году, что вероятно

также как и в Южном Байкале в 2007 году, причиной является придонная холодная интрузия.

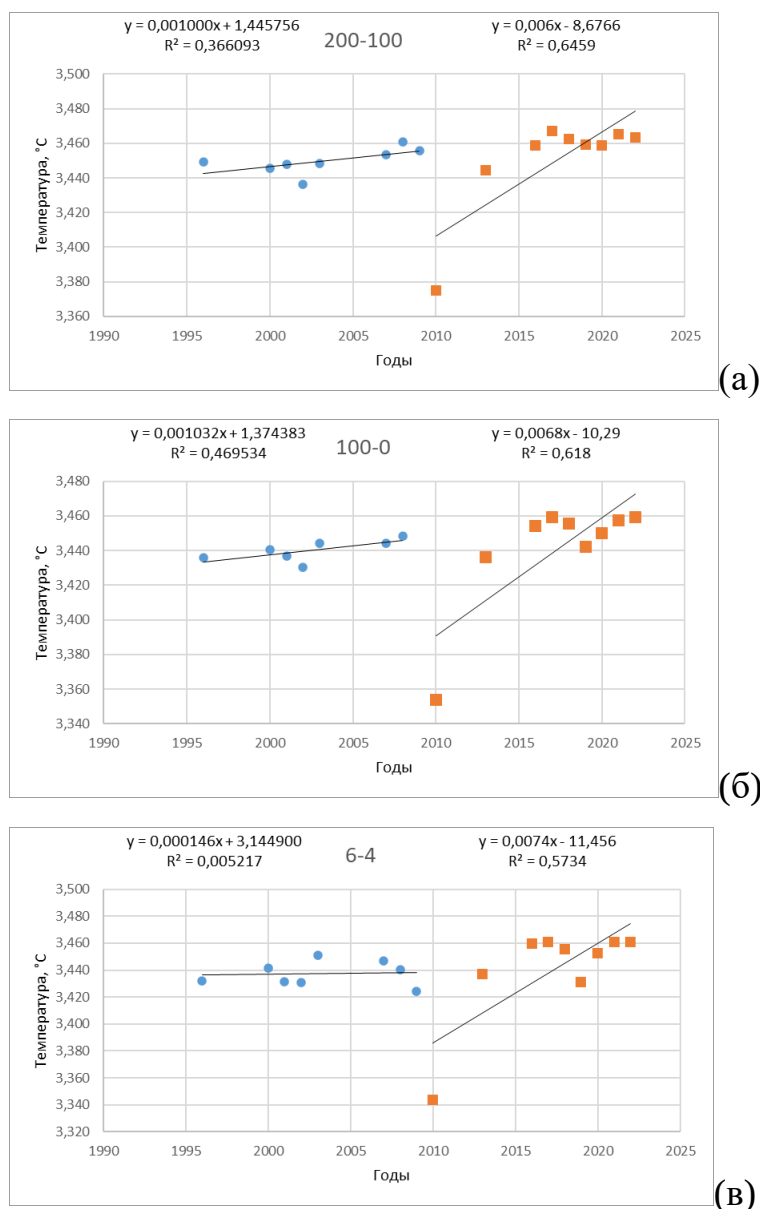


Рисунок 3.35 Тренд температуры воды в придонном слое, с разделением в 2010 году (а – 200-100 м от дна, б – 100-0 м от дна, в – 6-4 м от дна). Северный Байкал

При разделении глубинных слоев (рис.3.36-3.38) сложилась интересная ситуация. Если до 2010 года ряды близки к стационарности и незначимы, то после абсолютно каждый тренд за все рассмотренные месяцы во всех слоях значимы, и имеют резко выраженный рост. Вероятно, это вызвано аномалией

2010 года, описанной ранее, но на графиках все равно видны значения температуры воды, выше, чем в предыдущей декаде.

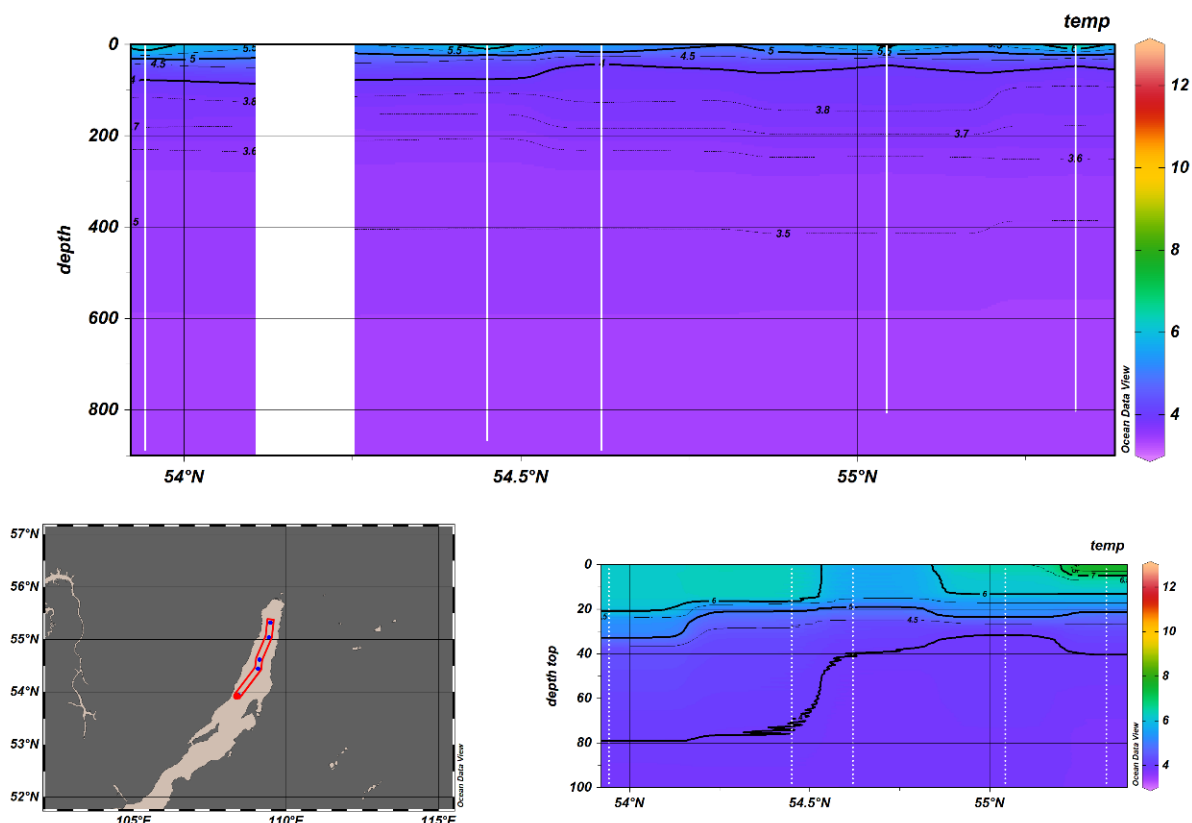


Рисунок 3.36 Разрезы температуры воды в Северной котловине Байкала за 1996 год

Исходя из недостатка натуральных данных о температуре воды в Северном Байкале, по причине меньшего количества экспедиций в этом районе, разрезы получились с искажениями. Далее представлен анализ, который удалось провести на основе построенных изображений.

Северная котловина Байкала является наиболее малоизученной, но представляет особый интерес из-за значительных изменений температуры, наблюдаемых в последние годы. В 1996 году температура во всех слоях была относительно стабильной ниже 200 метров. На самой южной станции теплый слой сильно глубже – температура в 4°C достигается на 80 метрах, по сравнению

с 30-40 метрами на остальных станциях. Слои от 400 м и до дна характеризуются стабильной и однородной температурой.

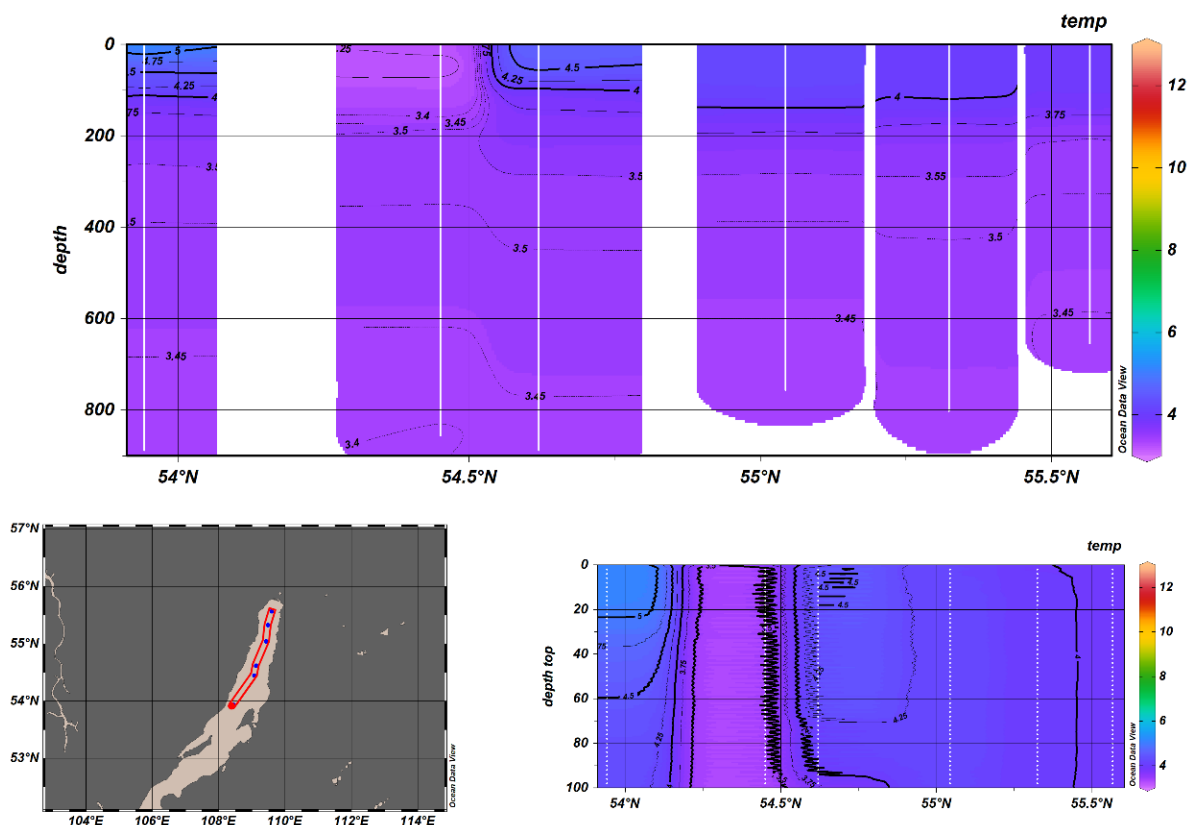


Рисунок 3.37 Разрезы температуры воды в Северной котловине Байкала за 2010 год

К 2010 году в поверхностном слое наблюдалось значительное снижение температуры. В средних слоях (около 400 м) изменения были незначительными, однако можно заметить повышение температуры в центре северной котловины на $0,05^{\circ}\text{C}$. В придонных слоях (600-1000 м) отмечалось значительное понижение температуры.

На 2 станции с юга наблюдалась аномалия низкой температуры ($3,4^{\circ}\text{C}$), снова связанная с придонной интрузией. Что касается крайне низкой температуры на поверхности в этой зоне, причиной вероятно является апвеллинг.

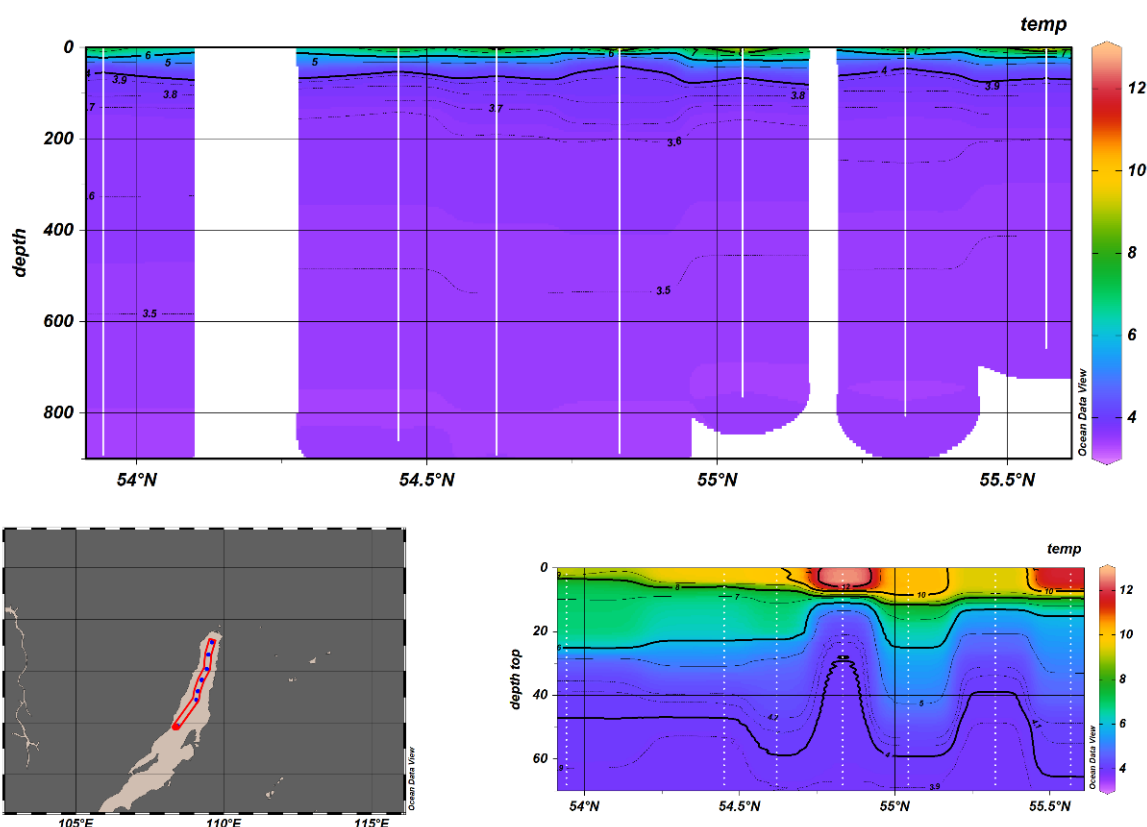


Рисунок 3.38 Разрезы температуры воды в Северной котловине Байкала за 2022 год

В 2022 году в поверхностном слое произошло резкое повышение температуры, значительно превышающее показатели 1996 и 2010 годов. В средних слоях (200-400 м) также заметно повышение температуры. Температура в $3,5^{\circ}$ достигает практически 600 м. В придонных слоях ситуация стабильна, без аномалий.

Эти изменения указывают на значительное влияние глобальных климатических изменений на температурный режим воды в Северной котловине Байкала. Резкое повышение температуры в поверхностном слое может быть связано с уменьшением ледового покрова и увеличением солнечной радиации. Повышение температуры в придонных слоях свидетельствует о долгосрочных климатических тенденциях и возможных изменениях в гидрологических процессах озера.

3.5. Сравнительный анализ температуры воды

Исходя из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- За 3 месяца в Южном Байкале наблюдались различные тенденции в поверхностном слое, которые различались в разные месяцы (таблица 3.13), но компенсировали друг друга и в общем периоде соответствовали стационарным условиям. В июле 2007 года наблюдалась придонная холодная интрузия, которая в последствии отразилась и на всем периоде исследований. В глубинных слоях присутствует переломный момент в 2010 году, в котором тенденция сменилась с похолодания на потепление. С учетом того, что подавляющее количество трендов незначимы, складывается картина достаточно стабильной температуры в водах Южного Байкала. Можно лишь отметить, что до 2010 года в слое от 200 м до дна наблюдалось снижение температуры.

- Средний Байкал отличается наибольшей стабильностью из всех трех районов, так как имеет наименьшее количество значимых трендов. Однако, например изменение $0,159\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ в поверхностном слое, намного больше нежели в Южном Байкале, где оно составляло $-0,021\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. В слоях до 400 м наблюдается аномалия низкой температуры в 2010 году, которая вероятно также вызвана придонной интрузией. А в 2019 году в слоях от 600 м и до дна была обнаружена противоположная аномалия – высокой температуры. Тенденции придонных слоев сильно отличаются от южной котловины, и имеют тенденцию повышения температуры, как до 2010 года, так и после.

- Северный Байкал можно признать самым нагревающимся регионом, исходя из того, что во всем исследуемом периоде практически отсутствуют тенденции снижения температуры, не говоря уже о значимых отрицательных трендах. Наблюдается огромное количество значимых положительных трендов, особенно в придонном слое. Нагрев поверхностного слоя превышает все предыдущие районы и составляет аж $0,41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, что довольно много. Разделение на 2 периода показало, что после 2010 года присутствует прогрев придонных слоев. Абсолютно все тренды значений температуры после 2010 года

значимы. Вероятно, это вызвано аномалией низкой температуры в 2007 году, но все же значения выросли по сравнению с предыдущим десятилетием.

Таблица 3.13 Тренды температуры воды за весь исследуемый период (жирным шрифтом выделены значимые). Озеро Байкал

Слой	Южная котловина	Средняя котловина	Северная котловина
0-100	-0,021	0,159	0,410
100-200	0,004	0,002	0,015
200-400	0,007	-0,004	0,003
400-600	-0,001	-0,009	0,007
600-1200	-0,003	0,001	0,008
200-100	-0,004	0,006	0,008
100-0	-0,004	0,005	0,009
6-4	-0,004	0,005	0,010

Слой	Южная котловина		Средняя котловина		Северная котловина	
	До 2010	После 2010	До 2010	После 2010	До 2010	После 2010
0-100	-0,053	0,354	0,317	0,344	0,530	0,133
200-100	-0,014	0,005	0,015	0,016	0,010	0,060
100-0	-0,024	0,010	0,016	0,028	0,010	0,068
6-4	-0,028	0,015	0,014	0,038	0,001	0,074

Что касается ярко выраженных тенденций изменения температуры в придонных слоях, результаты данной работы совпадают с предшествующей [10]. Хорошо заметны межгодовые колебания температуры глубинных слоев с продолжительностью около 10 лет. Это хорошо прослеживается на графике (рис. 3.39).

Анализ вертикальной структуры температуры воды в озере Байкал за 1996, 2010 и 2022 годы выявил значительные пространственно-временные вариации, отражающие как сезонные, так и долгосрочные изменения климата и гидрологических условий. В течение этого периода наблюдалось устойчивое повышение температуры в поверхностном слое (0-100 м) во всех котловинах

озера. Эти изменения, вероятно, связаны с глобальными климатическими сдвигами, такими как увеличение солнечной радиации и сокращение ледового покрова, что приводит к нагреванию верхних слоев воды.

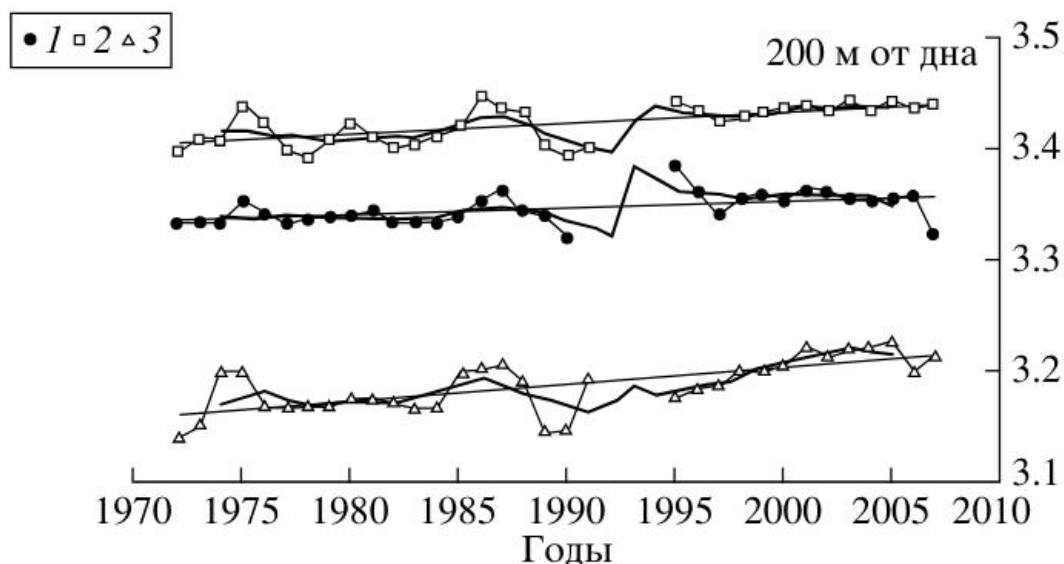


Рисунок 3.39 Средняя в июне-сентябре температура придонных слоев в Южном (1), Среднем (2) и Северном (3) Байкала за 1972-2007 годы.

В средних и глубоких слоях (до 1600 м) также зафиксированы значительные температурные аномалии. В некоторых случаях наблюдались холодные придонные интрузии, в то время как в другие периоды температура в глубоких слоях повышалась. Это указывает на сложные внутренние динамические процессы, происходящие в водной толще Байкала, включая вертикальные перемешивания и влияние климатических факторов. В частности, аномалии низкой температуры в средних слоях могли быть вызваны холодными придонными водами, в то время как повышение температуры в придонных слоях свидетельствует о долгосрочных тенденциях к потеплению.

Во всех котловинах Байкала (Южной, Средней и Северной) наблюдается общий тренд к повышению температуры, особенно заметный в последние годы. Это подчеркивает влияние глобальных климатических изменений на

термический режим озера. Изменения в температуре поверхностных и придонных слоев тесно связаны с внешними климатическими факторами, такими как количество атмосферных осадков, снежный покров и интенсивность его таяния.

Эти выводы свидетельствуют о значительном влиянии климатических и гидрологических процессов на температурный режим Байкала. Повышение температуры поверхностного слоя и изменения в глубоких слоях отражают не только сезонные колебания, но и долгосрочные климатические тенденции. Это подчеркивает необходимость продолжения мониторинга и исследования температурных изменений в озере для понимания их воздействия на экосистему.

3.6 Анализ взаимосвязи температур воды и воздуха

Последним этапом исследования тенденций и изменений в температуре воды озера Байкал было сопоставление значений и выявление взаимосвязи значений воздуха и воды рассматриваемого объекта.

Были построены совмещенные графики температур для 3 котловин, в слоях 0-100 м и 600-1200 м. (рис. 3.40- 3.42)

Для поверхностных слоев тяжело выделить какие-либо зависимости, так как, значения температуры воды ведут себя весьма обособленно от температуры воздуха. Однако можно проследить закономерность – в годы с аномальной температурой воздуха, поверхностный слой тоже нагревается или охлаждается. Это хорошо прослеживается в 1996, 1997, 2000, 2008 годах в районе южной котловины (рис. 3.430).

В средней котловине (рис 3.41) значения чуть более хаотичны. В некоторых случаях значения характеристик совпадают, а в некоторых находятся в противофазе, что свидетельствует об ослабленной связи в этом регионе.

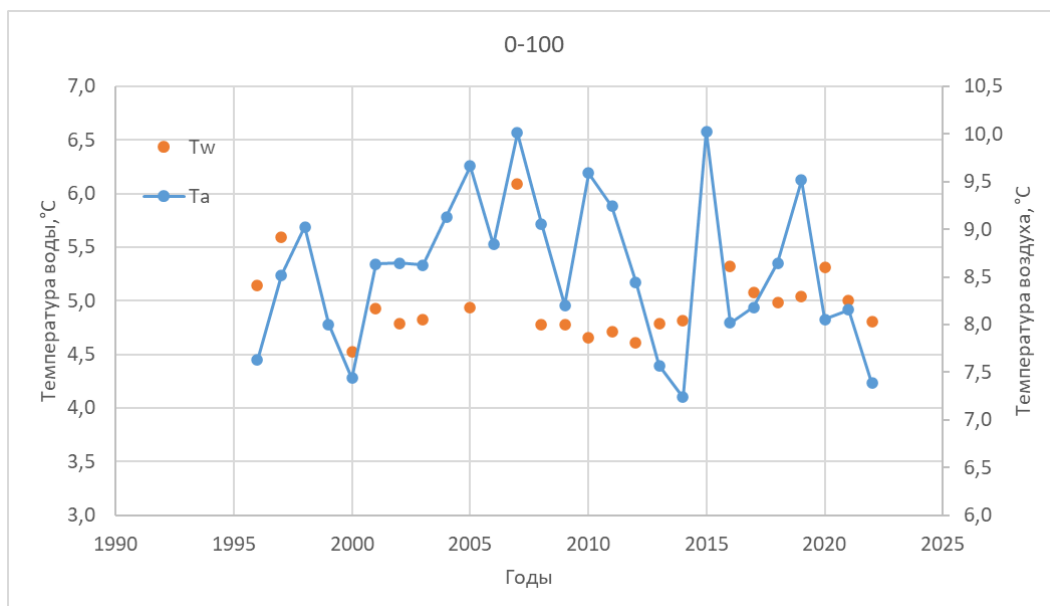


Рисунок 3.40 Совмещенный график температуры воды и воздуха южной котловины по осредненным за весь сезон данным в период с 1996 по 2022 годы в слое 0-100 м

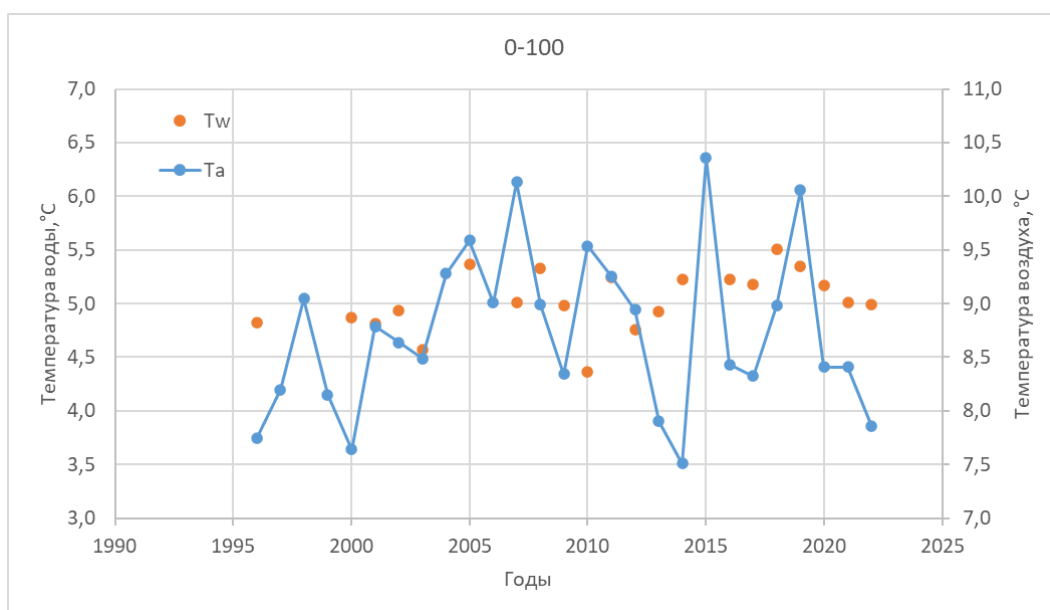


Рисунок 3.41 Совмещенный график температуры воды и воздуха средней котловины по осредненным за весь сезон данным в период с 1996 по 2022 годы в слое 0-100 м

На воды северной котловины (рис. 3.42 атмосфера оказывает большее влияние, нежели на предыдущие. Сильные аномалии температуры воздуха не сильно влияют на поверхностный слой, но тенденции роста и снижения температур достаточно хорошо совпадают.

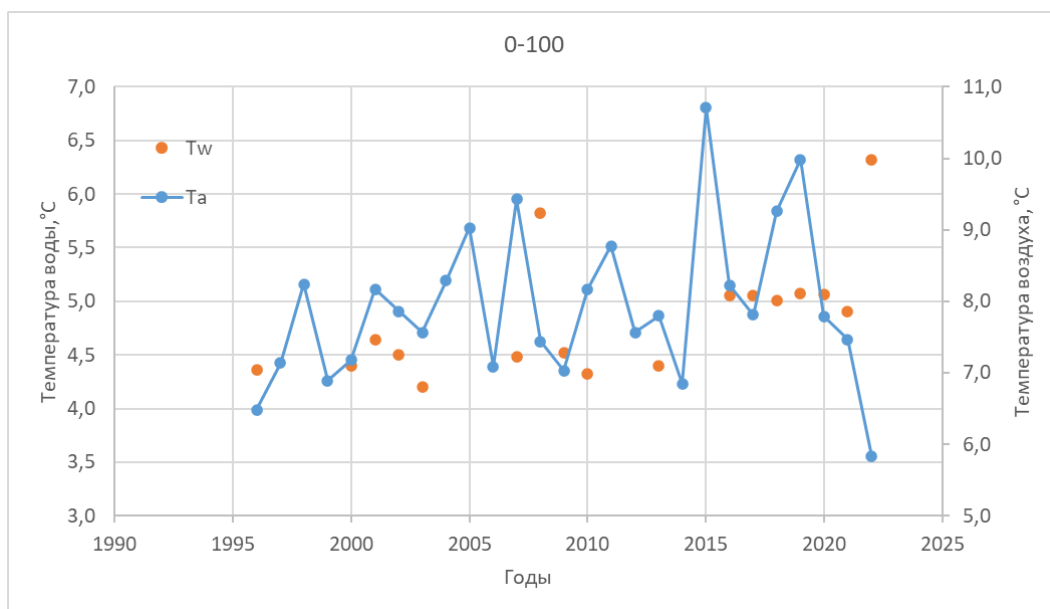


Рисунок 3.42 Совмещенный график температуры воды и воздуха северной котловины по осредненным за весь сезон данным в период с 1996 по 2022 годы в слое 0-100 м

Как описывалось в ранее упомянутой статье М.Н. Шимараева [10], воды верхних слоев Байкала адекватно реагируют на воздействия атмосферных процессов.

Заключение

Исследования температурной изменчивости озера Байкал, проведенные с 1972 по 2007 годы, показали значительные тренды в глубоких слоях. В начальном периоде тренды были незначительными, однако с 1995 по 2007 годы отмечены значительные изменения, включая снижение температуры в Южном Байкале и увеличение в Центральном и Северном Байкале на глубинах ниже 600 и 700 метров соответственно. Данные также показали синхронность межгодовых колебаний температуры с периодами от 6 до 10 лет и амплитудой изменений до 0.1°C , что подчеркивает сложность термических процессов в озере Байкал.

В ходе исследования были собраны и систематизированы массивы данных, полученные в ходе экспедиций лаборатории гидрофизики. Эти данные включают температурные профили, зафиксированные в трех котловинах озера Байкал в разные годы, что позволило провести детальный анализ изменений в термическом режиме озера.

Исследование вертикальной структуры температуры воды в озере Байкал, проведенное на основе данных за 1996, 2010 и 2022 годы, выявило значительные изменения в термическом режиме озера. Эти изменения отражают как сезонные колебания, так и долгосрочные тенденции, вызванные глобальными климатическими процессами.

В южной котловине озера Байкал за исследуемый период наблюдается устойчивое повышение температуры поверхностного слоя (0-100 м). В 1996 году температурный профиль был относительно стабильным, без значительных аномалий. Однако к 2010 году в поверхностных водах началось повышение температуры, что связано с увеличением солнечной радиации и уменьшением ледового покрова зимой. В Глубинных слоях (600-1600 м) в 2010 году наблюдалась аномалия, связанная с холодной придонной интрузией 2007 года, что указывает на сложные гидрологические процессы. В 2022 году тренд

повышения температуры продолжился, что свидетельствует о долгосрочных климатических изменениях.

Средняя котловина также продемонстрировала значительные изменения. В 1996 году температуры во всех слоях были стабильными, без значительных отклонений. Однако к 2010 году в поверхностном слое наблюдалось повышение температуры, а в средних слоях (до 400 м) была зафиксирована аномалия низкой температуры, вероятно поднятие глубинных вод. В 2022 году поверхностные и придонные слои демонстрировали продолжающийся тренд повышения температуры. Эти изменения указывают на значительное влияние как глобальных климатических процессов, так и внутренних циркуляционных механизмов озера на его термический режим.

Северная котловина, наиболее подверженная изменениям, также показала значительные температурные вариации. В 1996 году температура воды была относительно стабильной. Однако к 2010 году в поверхностном слое наблюдалось значительное повышение температуры, продолжившееся и в 2022 году. В придонных слоях (до 1000 м) также зафиксировано значительное повышение температуры, что указывает на долгосрочные климатические тенденции. Резкое повышение температуры в поверхностном слое связано с уменьшением ледового покрова и увеличением солнечной радиации.

Общий анализ показывает, что вертикальная структура температуры воды в Байкале претерпевает значительные изменения, отражающие как сезонные, так и межгодовые климатические сдвиги. Повышение температуры поверхностного слоя наблюдается во всех котловинах, что указывает на влияние глобального потепления. Изменения в глубоких слоях, включая холодные придонные интрузии и последующее повышение температуры, свидетельствуют о сложных внутренних процессах, таких как вертикальные перемешивания и влияние внешних климатических факторов.

Эти изменения в температурном режиме Байкала имеют значительные экологические последствия. Повышение температуры поверхностных слоев может привести к изменению биоразнообразия, влияя на различные виды водных

организмов, которые зависят от определенных температурных условий. В глубоких слоях изменения температуры могут повлиять на процессы минерализации и насыщения воды кислородом, что важно для поддержания экосистемы озера.

Выводы исследования подчеркивают необходимость продолжения мониторинга и анализа температурных изменений в Байкале. Понимание этих процессов важно сохранения уникальной экосистемы озера и обеспечения его устойчивости в будущем. Долгосрочные наблюдения и моделирование изменений помогут лучше понять механизмы, лежащие в основе наблюдаемых тенденций, и принять меры для их смягчения.

Таким образом, исследования показывают, что озеро Байкал, как и многие другие водоемы мира, испытывает значительное воздействие глобальных климатических изменений. Эти изменения требуют внимательного изучения и разработки соответствующих мер по охране и сохранению этого уникального природного объекта.

Список использованных источников

- 1) Карта Озеро Байкал [Электронный ресурс] // <https://geographyofrussia.com/>
- 2) Байкаловедение: учебник для студентов естественно-научных специальностей университетов: в 2 кн. / отв. ред. О.Т. Русинек, В.В. Тахтеев, Д.П. Гладкочуб, Т.В. Ходжер, Н.М. Буднев. — Новосибирск: Наука, 2012. — Кн. 1.
- 3) Компоненты природной среды и их природные ресурсы. Поверхностные и подземные водные объекты. Реки, 2005 [Электронный ресурс] // http://www.geol.irk.ru/baikal/baikal/rep_2005/pdf/baikal2005_p1-2-1.pdf
- 4) Природные объекты. Озеро Байкал. Уровень озера, 2007 [Электронный ресурс] // http://www.geol.irk.ru/baikal/baikal/rep_2007/pdf/baikal2007_p1-1.pdf
- 5) Байкал: атлас, 1993
- 6) Дьяков Т.Н. Пространственно-временная изменчивость температуры воды в озере Констанц и южной части озера Байкал по многолетним данным, 2018. С. 40-41.
- 7) Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». — СПб, изд. РГГМУ, 2017.
- 8) М.Н. Шимараев, А.А. Жданов, Р.Ю. Гнатовский, В.В. Блинов, В.Г.Иванов. Особенности холодных придонных интрузий на Байкале по наблюдениям в 1993-2009 гг. — Иркутск: Водные ресурсы 2011 г.
- 9) SEALOGGER CTD [Электронный ресурс] // <https://www.bodc.ac.uk/data/documents/nodb/pdf/sbe25brochureJan09.pdf>
- 10) Шимараев, М.Н., и др. Изменение температуры в глубоких водах озера Байкал в 1972-2007 гг. // Научное исследование Байкала. — 2008. — Т. 2. — С. 45-58.
- 11) Шишмарев М.Н., Гранин Н.Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321, № 2. С. 381–385.

- 12) Weiss R.F., Carmack E.C., Koropalo V.M. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // *Nature*. 1991. V. 349, № 6311. P. 665–669.
- 13) Shimaraev M.N., Granin N.G., Zhdanov A.A. Deep ventilation of Lake Baikal waters due to spring thermal bars // *Limnol. Oceanogr.* 1993. V. 38, № 5. P. 1068–1072.
- 14) Shimaraev M.N., Verbolov Y.L., Granin N.G., Sherstyankin P.P. Physical limnology of Lake Baikal: a review. Irkutsk; Okayama: Baikal Intern. Center for Ecol. Res., 1994. Print № 2. 80 p.
- 15) Шишмарев М.Н., Грачев М.А., Мишель Л. и др. Международный гидрофизический эксперимент на Байкале: процессы обновления глубинных вод в весенний период // *Докл. РАН*. 1996. Т. 336, № 6. С. 824–827.
- 16) Wüest A., Ravens T., Granin N.G. et al. Cold intrusions in Lake Baikal: direct observational evidence for deep-water renewal // *Limnol. Oceanogr.* 2005. V. 50, № 1. P. 184–196.
- 17) Schmid M., Budnev N., Granin N.G. et al. Lake Baikal deepwater renewal mystery solved // *Geophys. Res. Letters*. 2008. V. 35, № L09605. P. 1–5.
- 18) Шишмарев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1977. 149 с.
- 19) Г.Ю. Верещагин. Байкал. Научно–популярный очерк. Под редакцией Д.Н. Талиева. Москва, 1949 г.
- 20) Атлас единой глубоководной системы европейской части России [Электронный ресурс] // https://rspin.com/map_atlas/a_pages.php?an=25&pg=1&ysclid=lxc52xxxnp8980253
- 20