

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»

На правах рукописи



Кашницкая Марина Алексеевна

**ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ БЕССТОЧНЫХ ОЗЕР В
СТЕПНОЙ ЗОНЕ ЗАБАЙКАЛЬЯ (НА ПРИМЕРЕ ТОРЕЙСКИХ ОЗЕР)**

25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Болгов Михаил Васильевич

Москва – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. Гидрология бессточных озер в Восточном Забайкалье.....	11
1.1. Физико-географическое описание бассейна Торейских озер.....	11
1.2. Состояние изученности Торейских озер	17
1.3. Гидрометеорологическое описание условий бассейна Торейских озер по данным наземных наблюдений.....	24
1.4. Климатические условия.....	37
1.5. Особенности экологического региона Торейских озер	41
ГЛАВА 2. Восстановление уровенного режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных гидрологических измерений	44
2.1. Определение морфометрических характеристик водоемов с помощью методов ДЗЗ	44
2.2. Выбор оптимального метода дешифрирования водной поверхности Торейских озер	50
2.3. Пространственно-временная изменчивость Торейских озер по спутниковым данным.....	52
2.4. Восстановление уровенного режима Торейских озер по данным ДЗЗ	56
ГЛАВА 3. Модель водного баланса Торейских озер.....	64
3.1. Описание модели водного баланса Торейских озер.....	64
3.2. Восстановление уровенного режима Торейских озер за продолжительный период по данным наземных измерений	70
3.3. Анализ адекватности модели водного баланса Торейских озер на примере сокращения притока на заданную величину	76

ГЛАВА 4. Гидрологический режим Торейских озер в естественных и нарушенных условиях	81
4.1. Моделирование составляющих уравнения водного баланса Торейских озер.....	81
4.2. Антропогенная нагрузка на водные ресурсы бассейна Торейских озер.	88
4.3 Результаты водохозяйственных расчетов.....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
Список использованной литературы.....	104
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	119
Приложение 1	120
Приложение 2	122
Приложение 3	123
Приложение 4	125
Приложение 5	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Торейские озера – это система из двух соединенных протокой бессточных водоемов Барун-Торей и Зун-Торей, расположенная в южной части Забайкалья на границе с Монгольской Народной Республикой ($49^{\circ}48'–50^{\circ}18'$ с.ш., $115^{\circ}20'–116^{\circ}00'$ в.д., рисунок 1.1.2). Они имеют непостоянный гидрологический режим, обусловленный циклическими изменениями климата. Вследствие большой изменчивости уровня воды в озерах значительно меняется состояние экологического региона Торейских озер. Исследуемые озера являются основой государственного природного биосферного заповедника «Даурский», через который проходит Восточно-Азиатско-Австралийский путь миграции десятков видов перелётных птиц. С 2017 года Торейские озера и близлежащая российско-монгольская территория являются объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО – «Ландшафты Даурии». Кроме этого, озера имеют статус водно-болотных угодий международного значения в соответствии с Рамсарской конвенцией.

В июле 2020 г. в бассейне Торейских озер, на монгольской части реки Ульдза, являющейся основным притоком Торейских озер, началось строительство водохранилища в рамках программы «Синий конь» (рисунок 1). Программа предусматривает перераспределение стока наиболее полноводных северо-монгольских рек, трансграничных с Россией, на засушливый юг и юго-восток Монголии (регион Гоби). Строительство данного сооружения может вызвать существенное изменение водного баланса Торейских озер. Поэтому проблема оценки и прогноза гидрологического режима Торейских озер, в том числе с учетом антропогенного воздействия, является крайне актуальной.

Настоящее исследование посвящено изучению состояния водных ресурсов и водохозяйственного комплекса бассейна Торейских озер, а также анализу возможного изменения уровня режима Торейских озер с учетом

изъятий воды для обеспечения деятельности гидротехнического сооружения, возводимого на трансграничной реке Ульдза.

Цель работы – оценить изменения гидрологического режима Торейских озер, в том числе с учетом влияния антропогенных воздействий на основе вероятностного прогноза с использованием измеренных, восстановленных и смоделированных данных.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие научные задачи:

1. Изучить состояние водных ресурсов и водохозяйственного комплекса бассейна Торейских озер;
2. Восстановить многолетний уровенный режим Торейских озер на основе данных дистанционного зондирования Земли;
3. Восстановить характеристики водного баланса Торейских озер за максимально возможный период по данным инструментальных наблюдений;
4. Разработать модель водного баланса Торейских озер с использованием измеренных и восстановленных данных составляющих водного баланса;
5. Оценить пространственно-временное изменение морфометрических характеристик Торейских озер за многолетний период на основе созданной модели водного баланса;
6. Смоделировать параметры водного баланса и уровень Торейских озер за период большой продолжительности, позволяющий сделать статистически достоверный вероятностный прогноз;
7. Охарактеризовать водохозяйственный комплекс в бассейне реки Ульдза и проанализировать его влияние на исследуемые озера;
8. Дать вероятностный прогноз гидрологического режима Торейских озёр в виде кривой обеспеченности, в том числе с учетом влияния строящегося водохранилища отдельно для многоводной и маловодной фаз цикла водности.

Объектом исследования являются Торейские озера, расположенные в степной зоне Забайкальского края на границе Российской Федерации и Монгольской Народной Республикой.

Предмет исследования – современное состояние и динамика гидрологического режима Торейских озер в естественных и нарушенных условиях.

Степень изученности проблемы. Работы по изучению Торейских озер велись многими исследователями (Баженов Ю.А., Баженова О.И., Базарова Б.Б., Буторин А.А., Им С.Т., Кирилюк В.Е., Кирилюк О.К., Корнутова Е.И., Кузнецов Н.Т., Курганович К.А., Носкова Е.В., Обязов В.А., Симонов Ю.Г., Ткачук Т.Е., Уфимцев Г.Ф., Чечель А.П., Шамсутдинов В.Х. и др.). Однако большинство исследований посвящены изучению экологических и климатических закономерностей внутри Даурского региона. При этом изучением гидрологических особенностей Торейских озер занимались в меньшей степени, наибольший вклад сделан Обязовым В.А.

Наземные систематические гидрологические наблюдения за озером Барун-Торей проводились с 1965 года, но в 1980 году мониторинг был прекращен в связи с отступлением береговой линии озера. На территории Торейских озер и прилегающей к ним зоне в 1987 году был создан государственный природный заповедник «Даурский», целью которого явилось сохранение природных комплексов Даурии и мирового биоразнообразия. Для аналогичной цели, но для территории, разделенной государственными границами, на базе заповедника «Даурский» в 1994 году создан российско-монгольско-китайский заповедник «Даурия». В рамках научно-исследовательских работ российского заповедника до настоящего времени ведется мониторинг состояния экосистем, а особое внимание направлено на изучение биологии редких охраняемых и особо уязвимых видов организмов. В комплексе с биологическими исследованиями Обязовым В.А. проведена большая работа по изучению изменения климата в данном регионе и выявлению закономерностей его влияния на экологические

процессы, в том числе на гидрологию рек и озер. Однако, не проводились исследования по созданию модели водного баланса Торейских озер и долговременному прогнозированию их уровня режима, которые позволили бы обеспечить комплексный и надежный анализ процессов, происходящих в экологическом регионе озер с учетом климатических или антропогенных изменений в бассейне исследуемых водоемов.

Материалы и методы исследования. В исследовании использованы материалы государственной наблюдательной сети Росгидромета, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), материалы исследований научных организаций и другие источники информации, находящиеся в открытом доступе. Применялись методы статистического анализа данных, математического моделирования, гидрологических расчетов, включая водобалансовый метод, а также методы обработки и дешифрирования спутниковой информации.

Научная новизна исследования. С использованием данных ДЗЗ впервые получен непрерывный ряд надежной информации об уровне режима Торейских озер в условиях отсутствия инструментальных измерений. Впервые разработана модель водного баланса Торейских озер, которая позволила эффективно оценить количественные характеристики составляющих водного баланса и их изменение под влиянием антропогенных и климатических воздействий. Впервые дан вероятностный прогноз гидрологического режима Торейских озер, в том числе с учетом влияния строительства гидротехнического сооружения на реке Ульдза, а также для разных фаз гидрологического цикла.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенная модель водного баланса Торейских озер с использованием измеренных, восстановленных и смоделированных рядов составляющих водного баланса позволяет дать оценку возможного изменения гидрологического режима исследуемых водоемов в условиях антропогенных воздействий. Практическая значимость заключается в возможности применения

результатов диссертационного исследования для комплексного анализа состояния сохранности объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО «Ландшафты Даурии», проводимого в рамках научно-исследовательской работы Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «Научные исследования в области влияния регулирования стока реки Ульдза (МНР) на биологическое разнообразие трансграничного Даурского экорегиона в границах Российской Федерации (бассейн реки Ульдза и Торейские озера в границах Российской Федерации, расположенные на территории Ононского, Борзинского и Нерчинско-Заводского районов Забайкальского края) и подготовка научно-обоснованных предложений по сохранению биологического разнообразия экорегиона».

Результаты исследования в области применения методов ДЗЗ и моделирования гидрологического режима озер могут быть применены для оценки состояния и вероятностного прогноза уровней бессточных озер в условиях недостаточности данных наземных наблюдений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод восстановления уровня Торейских озер по данным ДЗЗ и полученный с его помощью непрерывный пространственно-временной ряд надежной информации об уровненом режиме Торейских озер в условиях отсутствия инструментальных наблюдений.
2. Модель водного баланса, основанная на комплексировании данных наземных наблюдений и спутниковой информации, позволяющая адекватно производить расчет уровней с учетом влияний, обусловленных антропогенной нагрузкой или климатическими изменениями.
3. Вероятностный прогноз гидрологического режима Торейских озер в естественных и нарушенных условиях.
4. Результаты анализа возможного влияния хозяйственной деятельности в результате функционирования планируемого гидротехнического сооружения на реке Ульдза на уровень режим Торейских озер.

Достоверность результатов исследования. Достоверность полученных результатов и сделанных выводов обоснована их сравнением с независимыми данными и исследованиями других авторов. Результаты моделирования проверены на достоверном фактическом материале, их соответствие оценивается как отличное. Обоснованность основных результатов подтверждается публикациями в рецензируемых периодических изданиях, обсуждением на конференциях и семинарах.

Апробация исследования. Основные результаты исследования обсуждались на конференциях международного и всероссийского уровней: «Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана», сентябрь 2021 г., «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», ноябрь 2021 г., «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ноябрь 2021 г.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертационной работы опубликовано 3 работы в рецензируемых изданиях рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 2 из них – в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science. Выдано свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности (№ 2022612170 от 28.02.2022) на разработанную в диссертации программу «Water balance model of the Torey lakes». Кроме того, опубликованы 3 научные статьи в сборниках научных трудов конференций (входят в РИНЦ).

Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертационном исследовании. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии в соавторстве с научным руководителем.

Диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия» в части пунктов 3, 4, 11.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Исследование

изложено на 126 страницах, включая 10 таблиц, 50 рисунков и список литературы, состоящий из 120 источников.

Благодарность. Автор выражает благодарность за научное руководство, помощь на всех этапах работы, ценные советы и консультации – Болгову Михаилу Васильевичу. Автор благодарит за оказанную поддержку коллектив НИЦ «Планета», в особенности Асмуса В.В., Иванову Н.П., Тренину И.С. Также автор благодарит коллективы ИПРЭК СО РАН и ЗабГУ, с которыми начинала профессиональную научную деятельность, в том числе обучаясь в аспирантуре, а именно: Кургановича К.А., Обязова В.А., Смахтина В.К., Носкову Е.В., Вахнину И.Л.

ГЛАВА 1. Гидрология бессточных озер в Восточном Забайкалье

1.1. Физико-географическое описание бассейна Торейских озер

Система Торейских озер, образованная бессточными озерами Барун-Торей и Зун-Торей, расположена в юго-восточной части Забайкалья на границе с Монгольской Народной Республикой (МНР). Данные озера относятся к Ульдза-Торейскому бессточному бассейну площадью около 31 тыс. км² (Баженова, 2013). В морфоструктурном отношении является частью Ульдза-Торейской высокой равнины, характеризующейся преобладанием сухостепных и луговых ландшафтов. Ульдза-Торейская высокая равнина относится к впадинам гобийского типа (по Флоренсову, 1968) (рисунок 1.1.1). Она простирается от хребтов Эрмана, Хангилайский и Уронай на севере и западе, а на северо-востоке, востоке и юго-востоке ограничена системой хребтов, расположенных от р. Шилка до р. Аргунь, на юге продолжается на территории МНР и КНР. В геолого-геоморфологическом отношении является северной частью еще более крупной морфологической структуры — Далайнорского межгорного понижения (Далайнорской котловины) гобийского типа. Вся Далайнорская котловина лежит на территории трех государств: Российской Федерации (РФ), Монгольской Народной Республики (МНР) и Китайской Народной Республики (КНР).

Ульдза-Торейская высокая равнина была сформирована на месте мезозойских складчатых структур в результате процессов выравнивания рельефа, начавшихся в поздне меловое время и продолжающихся фактически до настоящего времени. Неоген-четвертичная активизация тектонических движений, охватившая абсолютно большую часть Забайкальского края, в пределах Ульдза-Торейской высокой равнины проявилась слабо. Именно поэтому данная морфоструктура рассматривается как обширная сохранившаяся древняя поверхность выравнивания, представляющая собой сочетание аккумулятивных (во впадинах) и денудационных (в поднятиях) участков. На межвпадинных пространствах (поднятиях) нередко развиты

коры выветривания. Основная часть Ульдза-Торейской высокой равнины расположена на высоте 600-700 м абс., и местами осложняется холмами, грядами, сопками с относительными превышениями от 10 до 200-250 м. Характер сочленения Ульдза-Торейской высокой равнины с окружающими ее хребтами преимущественно плавный. Основные ландшафты — степи, луговые равнины, солончаки, озера (Кулаков, 2000).

Ульдза-Торейская высокая равнина представляет собой неглубокую межгорную впадину депрессионного характера (Шамсутдинов, 1991). Рельеф выражен низкими равнинами. В системе природного районирования Торейская котловина является северо-восточной оконечностью Центрально-Азиатской пустынно-степной области (Центрально-Азиатская страна высоких равнин, котловин, гор) и входит в Монгольскую степную провинцию высоких равнин и гор, в подпровинцию сухостепных высоких цокольных равнин и плоских котловин.

Котловина Торейских озер ассиметрична и является тектоно-денудационной впадиной, пониженной в восточной части, что обусловило большую глубину озера Зун-Торей (Воскресенский, Постоленко, Симонов, 1965). Она представляет собой степную низменность с большим количеством озер. Центральное место котловины занимают Торейские озера – самые крупные в Забайкальском крае. Кроме Торейских озер на данной территории, насчитывается до 1500 водоемов в многоводные климатические периоды. В большинстве случаев это мелководные, небольшие, с округлыми очертаниями береговой линии водоемы. Данные водоемы, вместе с Торейскими озерами, имеют богатую кормовую базу для водоплавающих и околоводных птиц. Благодаря небольшой глубине вода в озерах быстро прогревается, что способствует размножению в ней микроорганизмов, служащих пищей для птиц. Также вследствие небольшой глубины данные озера весной оттаивают быстрее и поэтому значительно раньше других водоемов в Сибирском регионе становятся пригодными для обитания птиц. Таким образом, миллионы перелетных птиц Восточной Азии прокладывают

маршрут от зимовок до мест гнездования через Торейскую котловину. Данная озерная сеть значительно дополняет Торейские озера, обеспечивая прекрасные условия для обитания большого количества птиц.

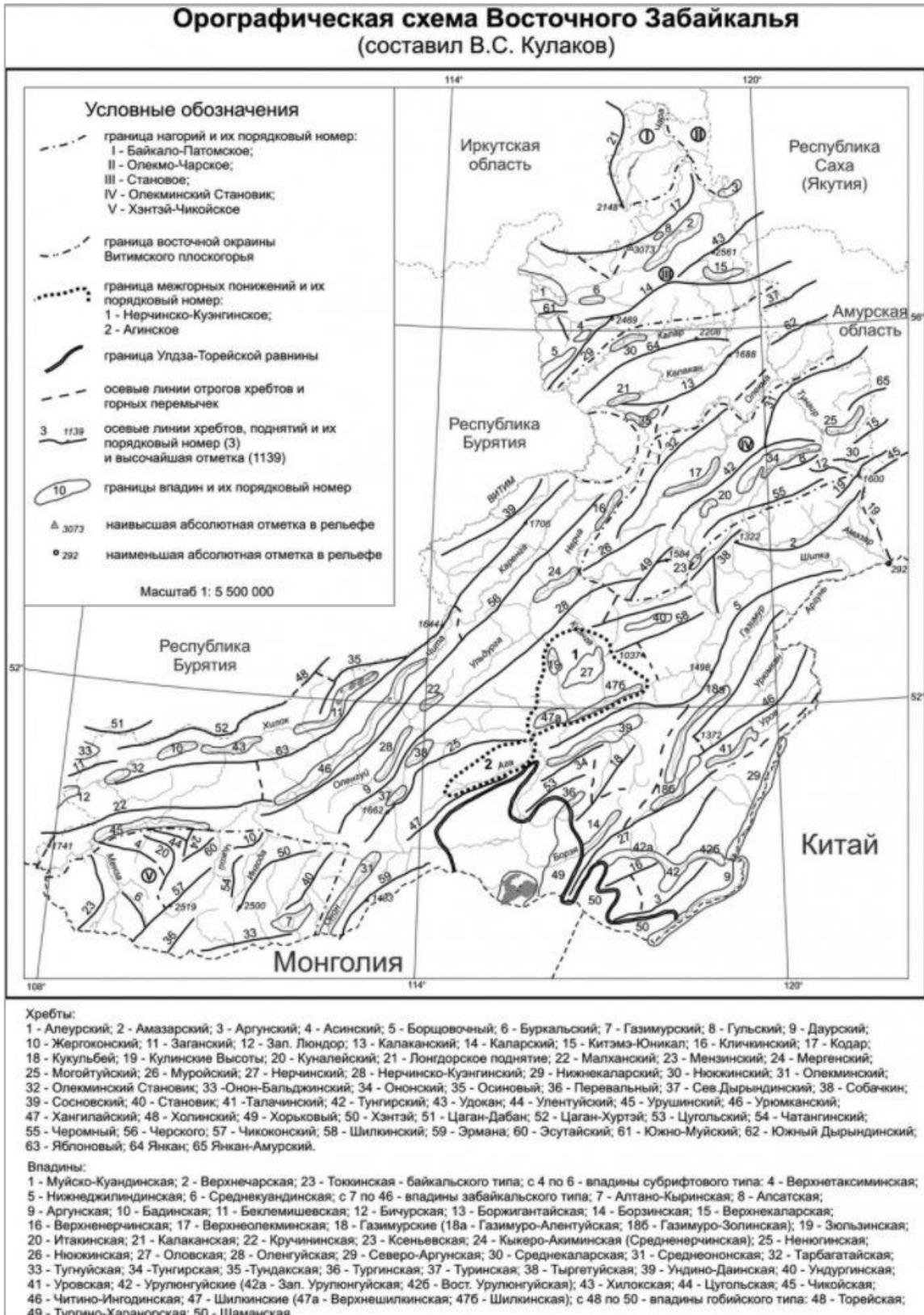


Рисунок 1.1.1. Орографическая схема Восточного Забайкалья (Кулаков, 2000)

Благодаря выгодному географическому положению Торейские озера составляют основу государственного природного биосферного заповедника «Даурский», через который проходит один из важнейших путей миграции большого числа видов перелётных птиц, а также входят в состав российско-монгольского объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО – «Ландшафты Даурии» (Буторин, 2017). Торейские озера являются водно-болотным угодьем, имеющим международное значение в соответствии с Рамсарской конвенцией, и признаны ключевой орнитологической территорией Азии (Torey Lakes...,2021). Через Торейские озера проходит сужение крупнейшего Восточноазиатско-Австралийского миграционного пути водоплавающих, околоводных и воробьиных птиц. По данным Министерства природных ресурсов РФ (Предварительная заявка, 2005) общая численность птиц, мигрирующих через Торейскую котловину, составляет по около 3 миллионов особей весной и не менее 6 миллионов особей осенью. Расположение заповедника на одном из материковых путей пролета, а также разнообразие условий обитания определяют как богатство орнитофауны (на территории отмечено 317 видов пернатых, из них 150 гнездящихся, 123 пролетных и зимующих, 44 залетных вида), так и уникальную численность, и видовой состав редких видов птиц. В Даурском заповеднике встречается 6 глобально уязвимых видов птиц, 3 вида – близки к глобально уязвимым, 20 включены в Красную книгу Международного союза охраны природы (МСОП), а 37 – в Красную книгу России. Для мировых популяций целого ряда видов, в том числе, находящихся под угрозой исчезновения, например реликтовой чайки (*Larus relictus*), многих видов журавлей, дрофы (*Otis tarda dybowskii*), сухоноса (*Cygnopsis cygnoides*) и др., Торейские озера и прилежащие озерно-степные участки территории имеют жизненное значение. Помимо птиц, на охраняемой территории сохранился либо восстановился весь естественный спектр видов флоры и фауны, характерный для данной природно-климатической зоны. Так в заповеднике представлен весь комплекс характерных для Даурской степи видов млекопитающих (48 видов).

Даурский заповедник – единственное в России место зимовки и размножения дзерена. Начиная с зимы 1999-2000 гг. в пределах заповедника ежегодно зимует от 1,2 до 4,1 тысяч особей из крупной мигрирующей популяции, большую часть года обитающей в МНР. В отдельные периоды численность дзеренов в заповеднике достигает 10–12 тысяч.

Озеро **Барун-Торей** бессточное, имеет неправильную форму, вытянутую с севера на юг. Глубина озера Барун-Торей относительно небольшая – около 4 м, длина 50,5 км, средняя ширина 11,1 км, площадь водной поверхности достигает 600 км². Береговая линия водоема сильно изрезана. Наибольшие глубины характерны для центральной части водоема. Берега озера сильно заболочены. В годы повышенного увлажнения озеро разливается, а в засушливые годы почти полностью высыхает (Кузнецов, 1963). В озеро впадают реки Ималка и Ульдза со среднегодовыми расходами 0,43 и 5,46 м³/с, соответственно. Река Ульдза впадает с юга, при впадении формируя обширную дельту. Река Ималка впадает с западной стороны, в отдельные годы пересыхает. На восточном берегу озеро Барун-Торей соединяется протокой с озером Зун-Торей, не имеющим притоков. Поступление воды из озера Барун-Торей в Зун-Торей начинается при уровне воды в Барун-Торее 596,1 м БС.

Озеро **Зун-Торей** имеет округлые очертания, слабую изрезанность береговой линии. Склоны берегов преимущественно пологие. Дно озера илистое (Кузнецов, 1963). Максимальная глубина озера Зун-Торей составляет около 7 м, длина озера – 22,6 км, средняя ширина 13 км при площади водной поверхности – 300 км².

Основным источником питания Торейских озер является трансграничная река Ульдза (Улдз). Она берет начало в восточных отрогах хребта Хэнтэй и протекает преимущественно по степным равнинам северо-восточной части МНР, впадает в озеро Барун-Торей, образуя обширную дельту, на территории Российской Федерации в Забайкальском крае. Длина реки составляет 425 км, из них 409 км расположены в МНР. В Российской

Федерации находится лишь устьевая часть реки длиной 16 км. Площадь водосбора — 26 900 км², 95 % из которых приходится на МНР. Водные ресурсы бассейна р. Ульдза имеют определяющее значение в сохранении Торейских озер и природы всего Даурского степного экологического региона в целом (рисунок 1.1.2).



Рисунок 1.1.2. Схема расположения озер и трансграничного водосбора

Важной и уникальной особенностью Торейских озер и прилегающей к ним территории является чередование многоводных и маловодных климатических периодов (Обязов, 1996). Они обуславливают колебания уровня воды в озерах и водности рек, что в последствие ведет к значительным трансформациям в экосистеме всего региона. В засушливые маловодные периоды высыхают не только небольшие водоемы на рассматриваемой территории, но и Торейские озера. По данным спутникового мониторинга за период 1989-2020 гг. максимальное значение уровня в Барун-Торее было в 1999 г., а в Зун-Торее в 1998 г. Затем на озерах

отмечалось уменьшение площади водного зеркала, которое происходит до настоящего времени. Отметим, что по спутниковым данным в период 2009-2020 гг. регулярно отмечалось практически полное высыхание котловины озера Барун-Торей, а с 2017 – озера Зун-Торей. Относительно стабильное наполнение озера Барун-Торей началось в сентябре 2020 г.

В соответствии с гидрологическими периодами водности на территории Даурского региона происходит полная смена биоценозов: изменяется растительный покров, видовой состав и численность птиц, а также млекопитающих. Природные феномены подобного рода являются уникальными природными лабораториями и дают ценную научную информацию об изменении среды обитания и механизмах адаптации биоты к новым условиям.

1.2. Состояние изученности Торейских озер

Ученые до настоящего времени не имеют однозначного объяснения происхождения и эволюции котловины Торейских озер (Корнутова, 1968; Малаева, Симонов, 1969; Симонов, 1969; Уфимцев, 1968; Шамсутдинов, 1983). По мнению многих ученых на месте современных Торейских озер находился более обширный водоем. В период эоплейстоцена уровень воды этого водоема превышал уровень современных Торейских озер на 60-65 м и имел больше притоков, вероятно, в него впадали реки Онон и Борзя (Корнутова, 1968, Симонов, 1969, Шамсутдинов, 1971).

По данным В.Х. Шамсутдинова, Е.И. Корнутовой и Ю.Г. Симонова в Торейской котловине отмечаются озерные террасы, высота которых составляет примерно 38-45-, 25-32-, 12-15- и 4-6- метров (Шамсутдинов, 1971, Корнутова, 1968, Симонов, 1969). В работе (Малаева, Симонов, 1969) отмечено, что в озерных отложениях на низких отметках спорно-кольцевые спектры близкие к современным. Данная информация свидетельствует о тенденции уменьшения котловины Торейских озер в многовековой истории. При этом, на основе знаний о формах и отложениях, фиксирующих отметки

стояния уровня, можно предположить, что процесс понижения уровня воды в Торейских озерах носил скачкообразный характер. По мнению авторов (Кузнецов, Мурзаев, 1963) изменение уровня озер происходило под влиянием климата. Однако, объяснить значительные масштабы уменьшения водоемов и их поэтапный характер удалось тектоническими процессами (Симонов, 1969, Шамсутдинов, 1971). Поскольку Торейские озера является донной частью обширной котловины гобийского типа, они претерпевают вертикальные подвижки на протяжении всей своей истории. Для данного района характерны погружение и воздымание отдельных блоков фундамента, которые могут приводить к изменению рельефа и перестройке гидрологической сети (Симонов, 1969, Уфимцев, 1968, Уфимцев, 1970).

В период голоцена в Торейской котловине В.Х. Шамсутдиновым было выявлено 18-20 горизонтов погребенных почв, совпадающих с количеством береговых валов. Данный факт позволил автору сделать вывод, «что ритмичные изменения климатических условий находились в определенной связи с ритмично проявившимися тектоническими процессами» (Шамсутдинов В.Х., 1971).

В настоящее время уровень воды в озерах Барун-Торей и Зун-Торей изменяется в пределах 4 и 7 м соответственно. При этом сумарная площадь их водной поверхности в многоводную фазу составляет около 900 км².

Продолжительных систематических наблюдений за гидрологическим режимом Торейских озер не проводилось. Поэтому сведения о них отрывочны и разрозненны, в общем случае представляют собой свидетельства путешественников, очевидцев и исследователей, посещавших данный район. В связи с этим, говоря о динамике уровня режима Торейских озер, мы имеем в виду его реконструкцию на основе немногочисленных сведений, содержащихся в картографических или литературных источниках.

Первое картографическое изображение Торейских озер представлено на Генеральной карте Российской империи, составленной в 1733-1734 гг.

И.К. Кириловым (Мурзаев, 1952; Атлас, 1964) (рисунок 1.2.1.). Источником для создания карты послужили материалы первой инструментальной съемки территории государства, начатой в 1715 г., в Забайкальском крае геодезическая съемка проводилась в 1727 г. (Магидович, 1984). На данной карте Торейские озера изображены одним обширным водоемом, что дает основание предположить о наполненности озер в эти годы. Предположение подтверждается результатами Сибирской экспедиции Д.Г. Мессершмидта. На территории Забайкальского края экспедиция находилась с 6 марта 1724 по 29 марта 1725 г. (Новлянская, 1970). Маршрут экспедиции проходил южнее Торейских озер не более, чем в 50 км, через р. Ульдза. Для экспедиции река представляла собой непреодолимое препятствие, что свидетельствует о периоде повышенной водности региона.

Позднее, в 1772 году, Торейские озера посещал П. С. Паллас. Однако, он эти озера увидел совершенно высохшими, также были безводны русла впадающих рек – Ималки и Ульдзы (Паллас, 1788). В 1856 году через Торейские озера проходил маршрут экспедиции под руководством Г.И. Радде. В материалах экспедиции отмечено, что исследуемые озера были наполнены (Радде, 1858).

В конце 19 века было наполнено лишь озеро Барун-Торей, о чем свидетельствуют результаты экспедиции Г. Н. Потанина, совершенной в 1899 году (Потанин, 1948). В работах (Дмитриева, Напрасников, Сизиков, 1976; Кренделев, 1986) говорится о наполненности озер в 1872 и 1897 годах.

В 20 веке наблюдения за Торейскими озерами проводились с большей периодичностью. Так, в 1911 г. в работе (Прасолов, 1927) Л.И. Прасоловым отмечено обмеление Барун-Торей и высыхание Зун-Торей. Похожее состояние озер описано в 1925 г. Б.К. Штегманом в работе (Кренделев, 1986). При этом Е.И. Корнутовой было зафиксировано заполнение озер в середине 1930-х (Корнутова, 1968). Но уже к 1942 г. Торейские озера высохли, их состояние В.А. Фриш в работе (Фриш, 1972) охарактеризовал как «солончаки». В 1953 г. В.Н. Некипеловым был отмечен фрагмент заполнения

Барун-Торей (Некипелов, 1957), но в 1956-1957 гг. Е.И. Корнутова вновь отметила понижение уровня озер. Следующее наполнение озер описано также Е.И. Корнутовой в 1958 г. (Корнутова, 1968), а в 1960 г. уровень Барун-Торей составлял 596 м по данным исследований, проведенных под руководством Ю.Г. Симонова и Г.В. Цыцарина (Лукашов, Смоктунович, 2018).

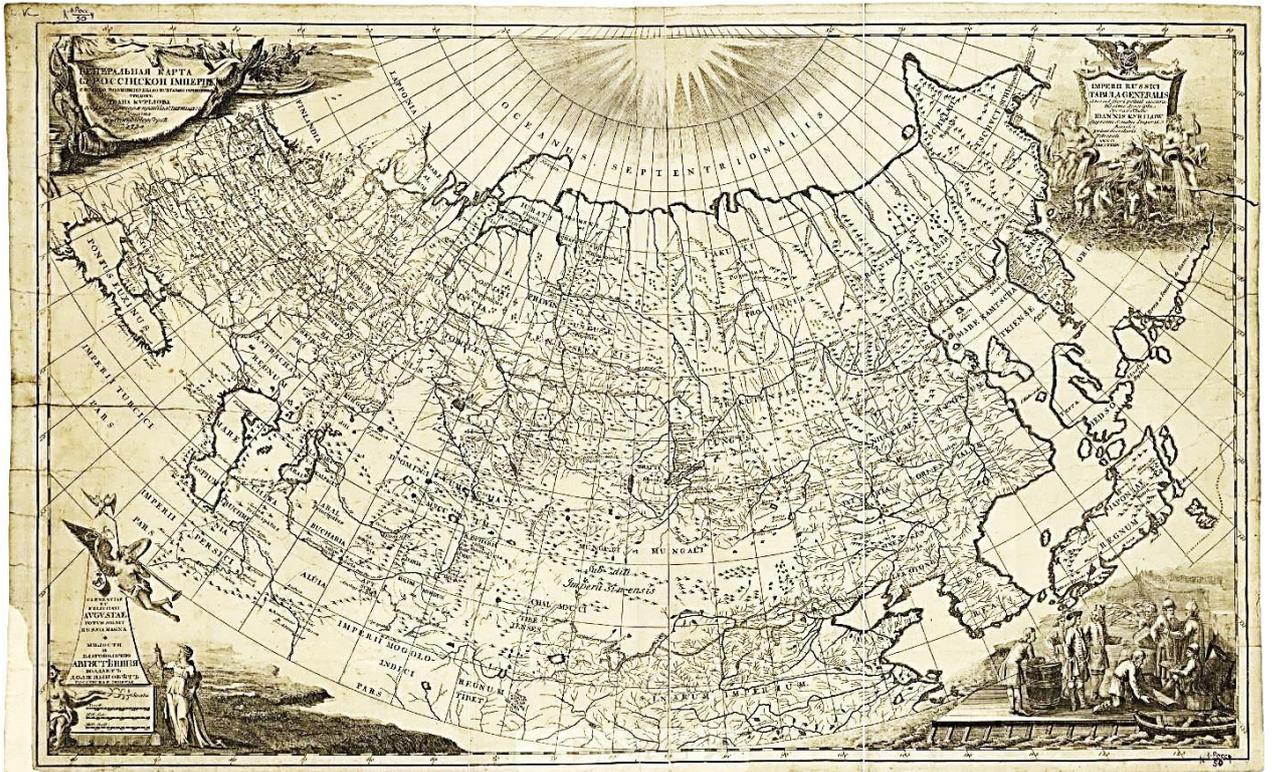


Рисунок 1.2.1. Генеральная карта Российской Империи, 1733-1734 гг.
(Генеральная карта о Российской Империи..., 1734)

Более подробная информация о Торейских озерах появилась в 1964 г., когда была открыта гидрологическая станция на озере Барун-Торей–с. Кулусутай. Она располагалась в северной части озера, в 1 км южнее с. Кулусутай. Непрерывные инструментальные наблюдения на озере Барун-Торей проводились до 1978 г., в 1979 г. осуществлялись лишь эпизодические наблюдения, а в 1980 г. – прекращены в связи с пересыханием обширной прибрежной зоны озера. За период инструментальных наблюдений зафиксировано понижение уровня воды озера Барун Торей на 2,5 м.

В дальнейшем, в 1996 г. В.А. Обязов на основе данных инструментальных измерений гидрологической станции оз. Барун-Торей-с.

Кулусутай с помощью уравнения водного баланса выявил изменения уровня оз. Барун-Торей до 1990 г. (Обязов, 1996), а в 2012 г. – до 2009 г. (Обязов, 2012).

В конце 20 века появилась возможность исследовать водные объекты методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Стали доступны долговременные (до настоящего времени) однородные архивы данных ДЗЗ, в частности, данные космических аппаратов серии Landsat. Это позволило проводить достоверный непрерывный мониторинг состояния озер в условиях отсутствия наземных измерений (Измайлова, Корнеенкова, 2020).

Впервые данные спутников наблюдения Земли для исследования озер степной зоны Забайкалья, в том числе Торейских озер, применил К.А. Курганович (Курганович, Носкова, 2015). Авторами были рассмотрены существующие методы автоматизированного выделения водной поверхности и выявлен наиболее подходящий метод для условий данной территории. Дальнейшие исследования в данном направлении проводились уже автором настоящей диссертации (Соснина, Курганович, 2015; Голятина, Вахнина, Курганович, 2018; Голятина, 2018; Голятина, Вахнина, Носкова, 2019). Также автором диссертации с соавторами Е.В. Носковой и И.Л. Вахниной выполнялись исследования для выявления закономерностей изменения озер, расположенных в степной зоне Забайкалья, от колебаний климата (Vakhnina, Golyatina, Noskova, 2019; Вахнина, Носкова, Голятина, 2020).

Параллельно с автором данной работы было проведено исследование озер степной зоны Забайкалья под руководством С.Т. Има и В.И. Харука. В работе (Им и др., 2015) изучалась динамика количества, площади и уровня водной поверхности озер лесостепной зоны Забайкалья. Использовались спутниковые данные для оценки площади и количества озер с 1976 по 2013 гг., гравиметрии (GRACE) с 2003 по 2014 гг. для общей оценки водной массы и альтиметрии (Envisat) для оценки уровней озера Барун-Торей с 2003 по 2010 гг. По выводам авторов, параметры озер имеют значимую связь с количеством атмосферных осадков, температурой воздуха и индексом

сухости. Были сопоставлены данные о количестве озер и их площади с гумидным и аридным периодами. Однако, в данной работе (Им и др., 2015) авторы были сосредоточены на большом масштабе изменений и не проводили детальный анализ динамики изменения площадей и количества озер.

В 2021 году автором диссертации был проведен анализ многолетней динамики суммарной площади водной поверхности озер степной зоны Восточного Забайкалья за период с 1989 по 2020 гг. (Кашницкая, 2021а). Выявлены годы с максимальными и минимальными значениями суммарной площади водной поверхности озер исследуемого региона. Для детального анализа динамики площадей водной поверхности озер рассмотрено 23 наиболее изученных озера на исследуемой территории. В результате кластеризации площадей водной поверхности этих озер методом *k*-средних получены три группы озер. Установлено по теоретическому описанию и географическому расположению водоемов, что исследуемые озера классифицированы в зависимости от условий происхождения – водоемы тектонического, старичного и эрозионно-тектонического типов. По результатам анализа установлено, что озера старичного типа и эрозионно-тектонического происхождения наиболее точно отражают уровень увлажненности региона. Водоемы озерного пояса также могут отражать уровень увлажненности региона, но реагируют на изменения увлажнения с некоторым запаздыванием.

Изучением влияния изменений климата на растительный и животный мир в рассматриваемом регионе посвящены работы Баженова Ю.А., Кирилюка В.Е., Кирилюк О.К., Ткачук Т.Е., Базаровой Б.Б., Ташлыковой Н.А., Афониной Е.Ю. и др. (Bazhenov, 2019; Кирилюк., Ткачук, Кирилюк, 2012, Кирилюк., Ткачук, 2012; Bazarova, Tashlykova, Afonina, 2019).

Обобщая изложенный выше материал, можно отметить, что за период 18 и 19 веков о Торейских озерах имеется лишь качественная информация, свидетельствующая о периодическом наполнении и высыхании Торейских

озер. В 20 веке более частые наблюдения за Торейскими озерами позволили некоторым исследователям реконструировать колебания уровня озер. Так, в работах (Чечель, 1991; Обязов, 1996) авторами независимо друг от друга были составлены графики изменения уровня озера Барун-Торей за период 1900-1990 гг. В работе (Чечель, 1991) описано 2 периода наполненности озера, с максимальными значениями уровня примерно в 1940 и 1965 гг., при этом, в 1900 и 1990 гг. отмечены повышенные значения уровня озера. В работе (Обязов, 1996) описано 5 периодов наполненности озера. При этом максимальные значения уровня озера отмечались в 1912 г., 1925 г., 1935 г., 1955 г., 1965 г., а 1900 и 1990 гг. также как и в работе (Чечель, 1991) отображены с повышенными отметками уровня озера. Максимальная наполненность отмечена в 1965 г. (~598 м) и 1990 г. (~597 м).

Таким образом, качественная информация описательного характера о Торейских озерах приводит исследователей к искажениям в представлениях о состоянии озер, в том числе об их гидрологическом режиме. Период инструментальных наблюдений длиной в 16 лет не позволил в полной мере изучить закономерности уровня озера Торейских озер. Поэтому в настоящее время в качестве достоверной и объективной многолетней информации для изучения водных объектов предлагается использовать данные дистанционного зондирования Земли. Получение подробной и независимой информации о гидрологическом режиме Торейских озер за длительный временной период является важной задачей. Поскольку лишь в результате ее анализа становится возможным достоверно оценить современное состояние озер и выявить закономерности, которые сформировали это состояние, при этом выявить тенденции гидрологического режима, необходимые для его предвидения, в том числе с целью планирования рационального использования водных ресурсов и их охраны.

1.3. Гидрометеорологическое описание условий бассейна Торейских озер по данным наземных наблюдений

Исследования водного баланса водоемов являются одним из основных разделов гидрологии, дают наиболее полное представление о процессах, происходящих в их бассейне, в том числе о состоянии водного объекта в текущий момент времени, а также позволяют решать важные теоретические и практические проблемы (Соколов, Чапмен, 1976). Результаты водобалансовых вычислений становятся основой количественной оценки водных ресурсов и их изменений под влиянием климатических и антропогенных воздействий. Изучение структуры водного баланса водоемов особенно важно для гидрологического обоснования проектов по рациональному использованию и управлению водными ресурсами.

Основой изучения водного баланса является применение закона сохранения вещества. Данный закон заключается в том, что для любого объема в течение любого периода времени разность между общим приходом и расходом воды равна изменению ее запаса в данном объеме.

Уравнение водного баланса природного объекта показывает соотношение прихода, расхода и изменений запасов воды для данного водоема. В общем случае приходную часть уравнения водного баланса любого объекта составляют атмосферные осадки P , выпадающие в виде дождя и снега, поверхностный Q_{SI} и подземный Q_{UI} приток воды извне в пределы бассейна или водоема. В расходную часть входит испарение E с поверхности объекта, поверхностный Q_{SO} и подземный Q_{UO} сток, уходящий за пределы объекта. Превышение приходной части над расходной вызывает увеличение общих запасов воды ΔH в объекте, обратное соотношение прихода и расхода приводит к уменьшению этих запасов. Все компоненты водного баланса определяются с некоторыми погрешностями измерений и расчетов. Поэтому в уравнение водного баланса, помимо его компонентов, всегда вводится член невязки η . Следовательно, водный баланс для любого

объекта и за любой интервал времени в общем виде представлен следующим уравнением:

$$P + Q_{SI} + Q_{ul} - E - Q_{SO} - Q_{UO} - \Delta H - \eta = 0 \quad 1.3.1$$

В настоящем исследовании рассматривается уравнение водного баланса для бессточных озер, которое имеет вид:

$$P + Q_{SI} - E - \eta = \Delta H \quad 1.3.2$$

Таким образом, для решения уравнения водного баланса Торейских озер необходимо рассмотреть следующие гидрометеорологические характеристики: осадки в виде дождя и снега, приток рек Ульдза и Ималка и испарение с водной поверхности озер.

Однако предварительно рассмотрим *уровенный режим Торейских озер*. Уровенный режим Торейских озер характеризуется большой изменчивостью, что обусловлено циклическими изменениями климата в исследуемом регионе. Известно, что озера и нижнее течение реки Ульдза расположены в зоне «рассеивания» стока (Болгов, 1985), в которой потери воды на фильтрацию из русел и испарение существенно превышают местный сток. Поэтому, по сравнению с соседними водосборами, маловодные периоды в притоке к озеру носят более выраженный, затяжной характер, что также отражается на водном балансе самого озера, увеличивая потери на фильтрацию при росте уровня воды.

Данные наблюдений за период 1965-1980 гг. на озере Барун-Торей, позволили В.А. Обязову рассчитать водный баланс за этот период, а в дальнейшем, с коллективом авторов, используя данные эпизодических измерений, выполнить расчет изменения уровня воды в озере Барун-Торей до 2009 г. (рисунок 1.3.1.) (Обязов, 2012, Ландшафты Даурии, 2014). Таким образом, по расчетам В.А. Обязова за период 1965-2009 гг. озеро Барун-Торей в 1965 г. имело максимальное наполнение. В последующие годы происходило снижение уровня, достигшее минимума в 1982 г. Затем началось наполнение озерной котловины до 1998 г., после наступила фаза

снижения уровня воды, которая продолжалась до конца первого десятилетия XXI века. На озере спад уровня воды завершился практически полным высыханием котловины озера.

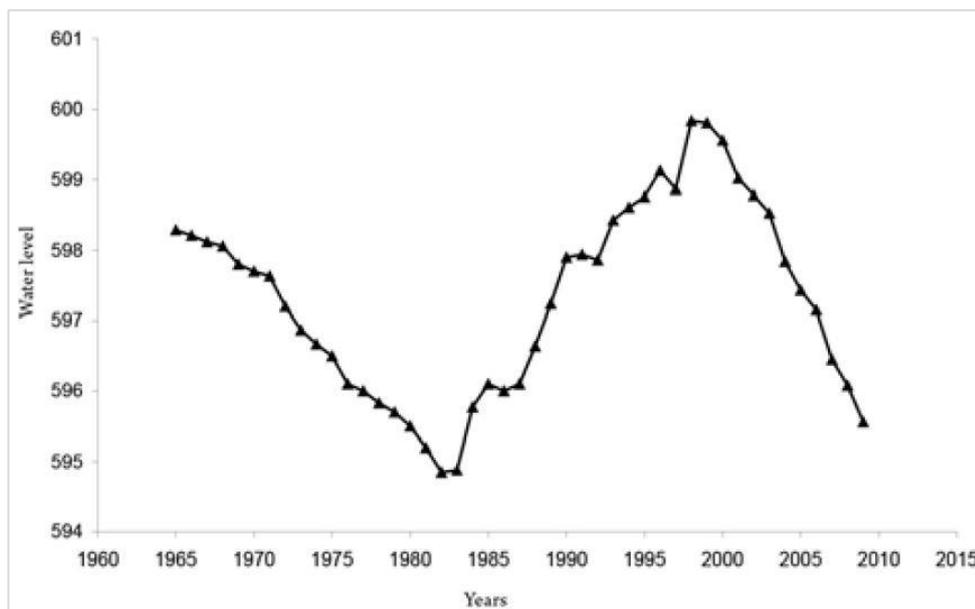


Рисунок 1.3.1. Изменение уровня оз. Барун-Торей (Ландшафты Даурии, 2014)

Приток. Для характеристики притока рек в Торейские озера использованы материалы наблюдательной сети Росгидромета на гидрологических постах р. Ульдза – с. Соловьевск и р. Ималка – свх. Красная Ималка.

Трансграничная река Ульдза (Улдз) является основным источником питания Торейских озер. Как уже сообщалось ранее, она берет начало в восточных отрогах хребта Хэнтэй и протекает преимущественно по степным равнинам северо-восточной части МНР, впадает в озеро Барун-Торей, образуя обширную дельту, на территории Российской Федерации в Забайкальском крае. Средний годовой сток в устье $0,28 \text{ км}^3$. Ледовый покров устанавливается в 3-й декаде октября, разрушается во 2–3-й декаде апреля. Продолжительность ледостава 155–190 дней. В зимний период река перемерзает.

Река Ималка берет начало на хребте Эрмана в МНР. Длина реки составляет 156 км, из которых 96 км протекают по территории МНР. Верховье и устье данной реки находятся в Российской Федерации. Площадь

водосбора – 1480 км², из которых 43 % приходится на территорию Забайкальского края. Средний годовой сток в устье 0,018 км³. Река периодически пересыхает и ежегодно перемерзает.

Водный режим рек Ульдза и Ималка характеризуются неравномерным распределением стока внутри года (рисунок 1.3.2). Это обусловлено особенностями питания, в котором преобладает дождевое. В зимний период в связи с промерзанием рек до дна сток отсутствует. Его возобновление происходит в начале апреля. Со второй декады апреля до середины мая проходит весеннее половодье. В связи с тем, что высота снежного покрова в этом районе не велика и значительная его часть испаряется к моменту вскрытия рек, весеннее половодье обычно уступает по объему летним паводкам. В многоводные и средней водности годы межень часто отмечается с середины мая до конца июня. В летний период наблюдаются дождевые паводки. Они отличаются как по количеству пиков, так и по величине расхода воды. Осенняя межень начинается в ноябре, затем реки промерзают, сток рек прекращается.

Исследуемые реки отличается неравномерностью стока в течение года. На долю весеннего периода приходится около 5 % стока в многоводный и маловодный годы, а в годы средней водности – 25 %. На долю летне-осеннего периода приходится большая часть стока – около 85-95 % в многоводные и маловодные годы, в годы средней водности – 70 %. На долю зимнего стока приходится около 10 % в многоводные годы, в годы средней водности – 5 %, в маловодные годы – менее 1 %. Наиболее высокие паводки формируются обычно в период с июля по сентябрь.

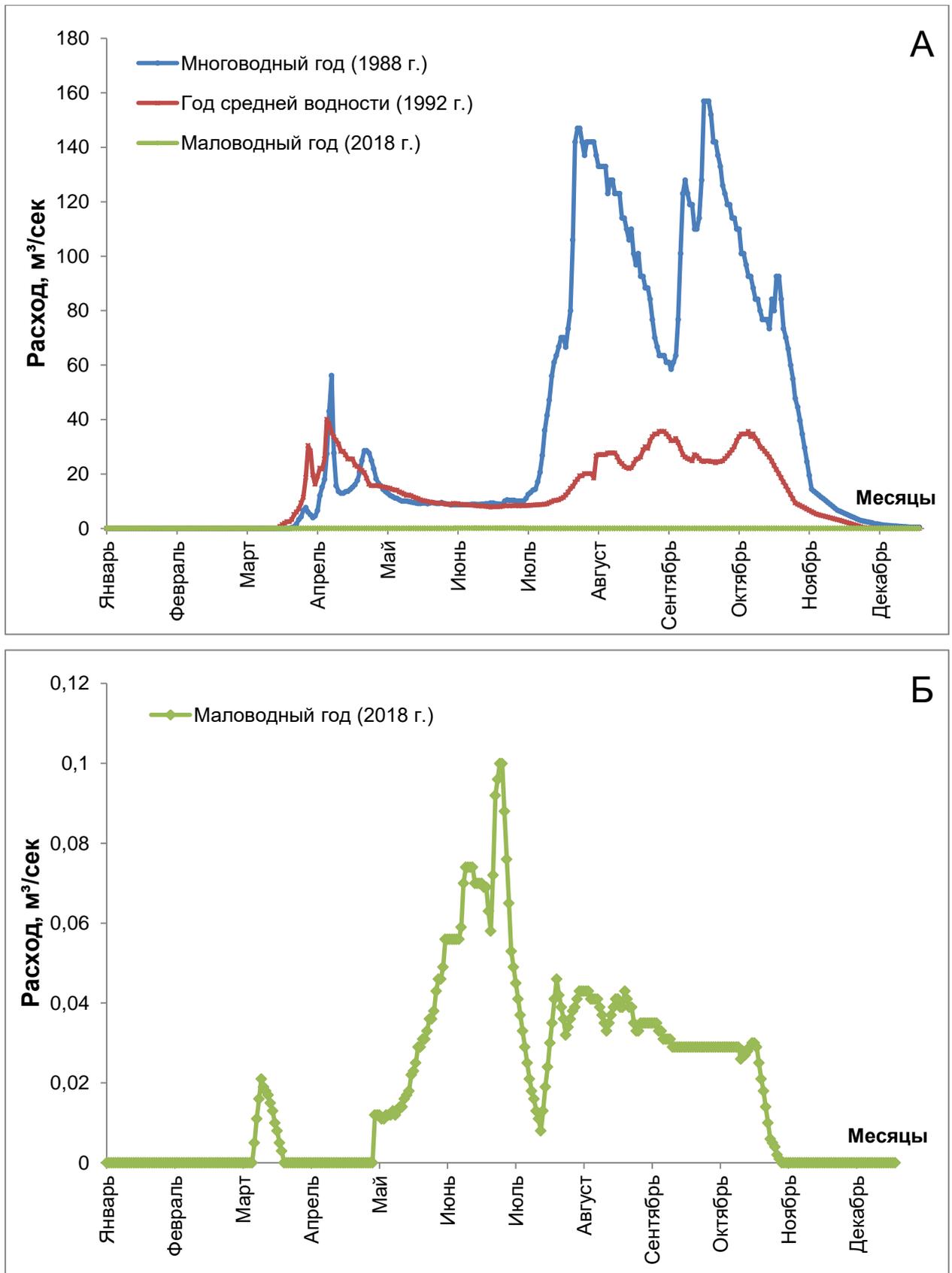


Рисунок 1.3.2. Изменения стока р. Ульдза – с. Соловьевск: А) в многоводный, средней водности и маловодный годы; Б) в маловодный год

Весеннее половодье. Сток половодья составляет 2-5 % в маловодные и многоводные годы, в годы средней водности – около 20 %. Среднемноголетнее начало весеннего половодья приходится на первую декаду апреля. Конец половодья приходится на середину мая.

Летне-осенняя межень с разной продолжительностью может наблюдаться в любое время с мая по октябрь. В годы с повышенной и средней водностью к межени относятся непродолжительные прерывистые периоды с пониженным стоком, наблюдающиеся между отдельными паводками. Низкая межень может быть продолжительной (до 90 дней и больше) в течение всего летне-осеннего сезона, что особенно заметно в маловодные годы. При отсутствии осенних паводков летне-осенняя межень плавно переходит в зимнюю.

Основная часть стока рек Ульдза и Ималка в многоводные годы (80-90 %) приходится на вторую половину лета – сентябрь. Наибольший сток отмечается, как правило, в августе-сентябре и в среднем за многолетний период составляет 40 % от годового объема.

С октября сток постепенно снижается. Перед наступлением ледяных образований и после их появления уровни воды достигают самых низких значений, затем реки перемерзают. Зимняя межень является наиболее длительной фазой водного режима рек.

Многолетние изменения стока характеризуются чередованием многоводных и маловодных периодов, или цикличностью. На реках Ульдза и Ималка период с 1983 по 1998 гг. характеризуется многоводной фазой цикла водности. С 1965 по 1982 гг., а также с 1999 по 2018 гг. отмечается маловодный период. Изменение средних многолетних расходов воды показано на рисунке 1.3.3. На рисунке 1.3.4 представлена разностная интегральная кривая реки Ульдза, которая свидетельствует о том, что первое десятилетие XXI века характеризовалось пониженным стоком.

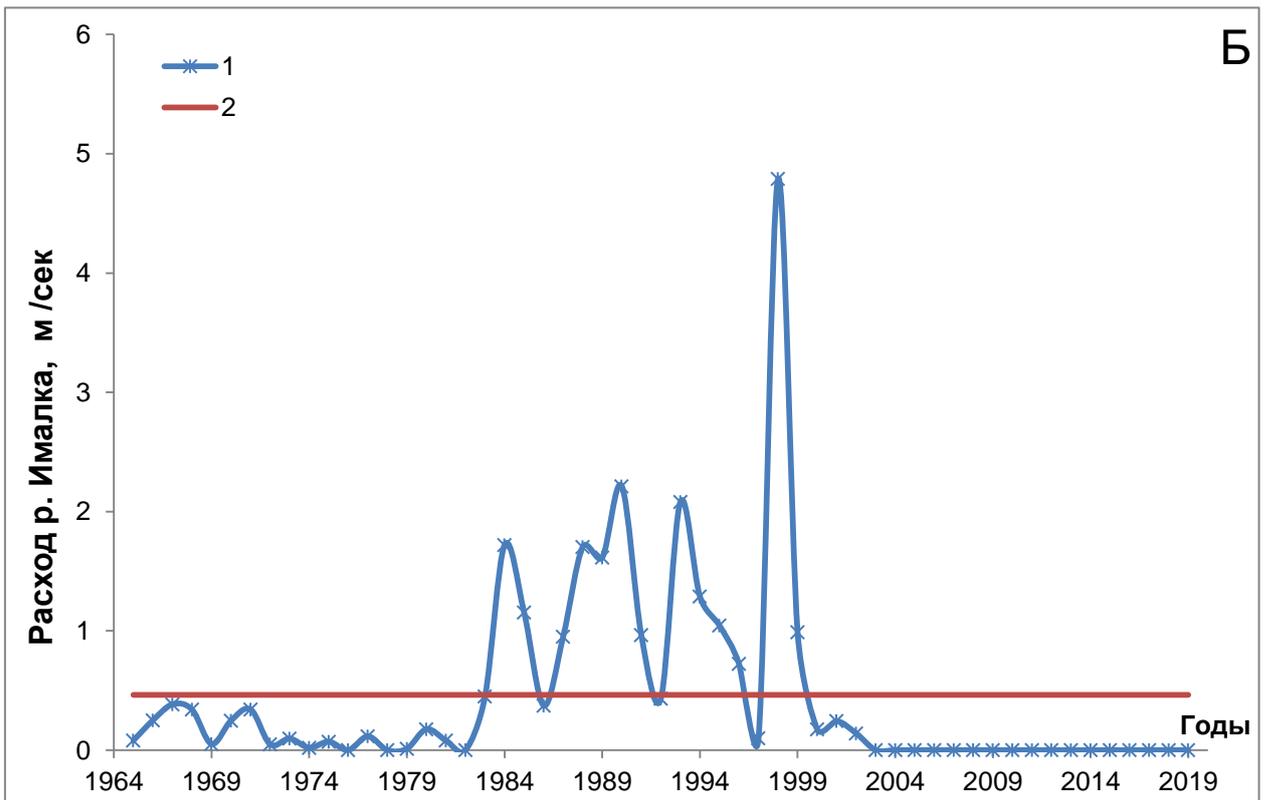
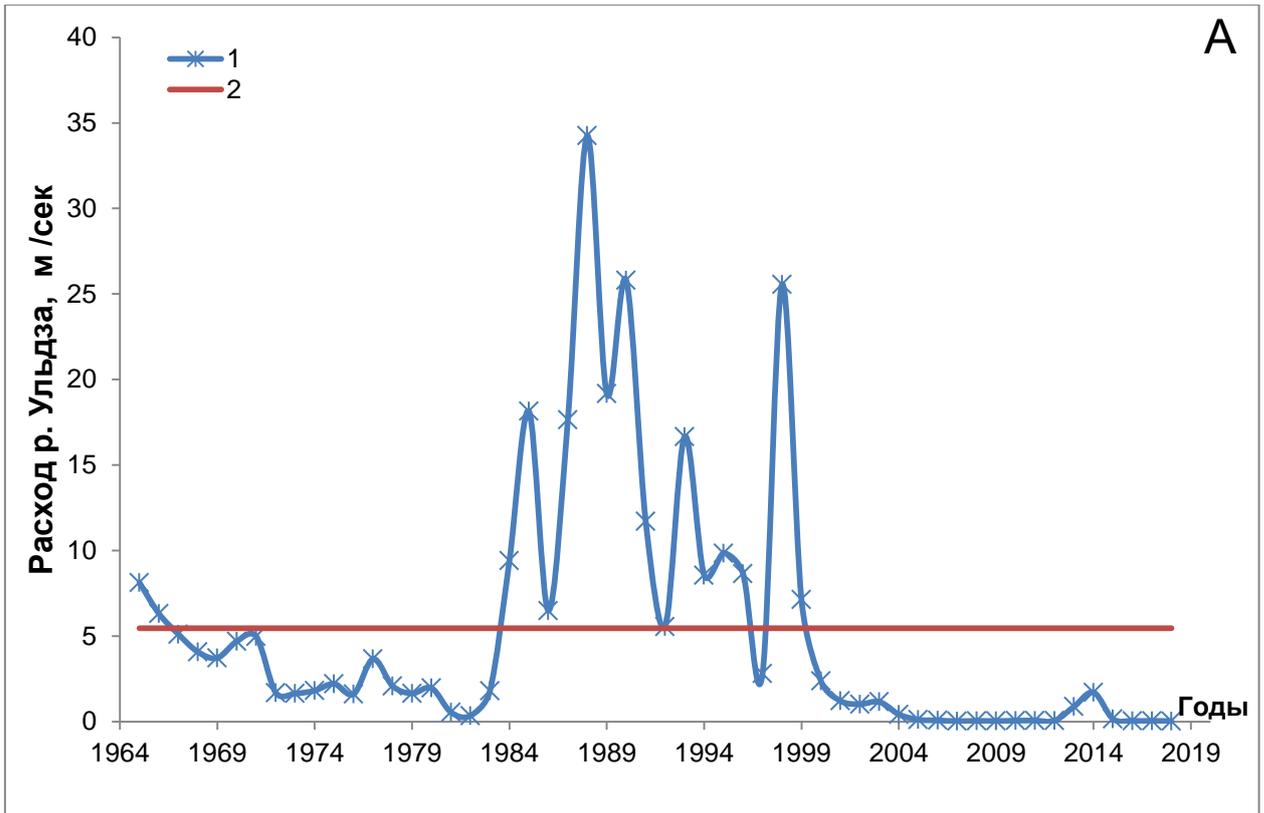


Рисунок 1.3.3. Многолетние изменения среднего годового стока рек Ульдза – с. Соловьевск (А), Ималка – с. Красная Ималка (Б); 1 – исходный ряд; 2 – средний многолетний расход воды

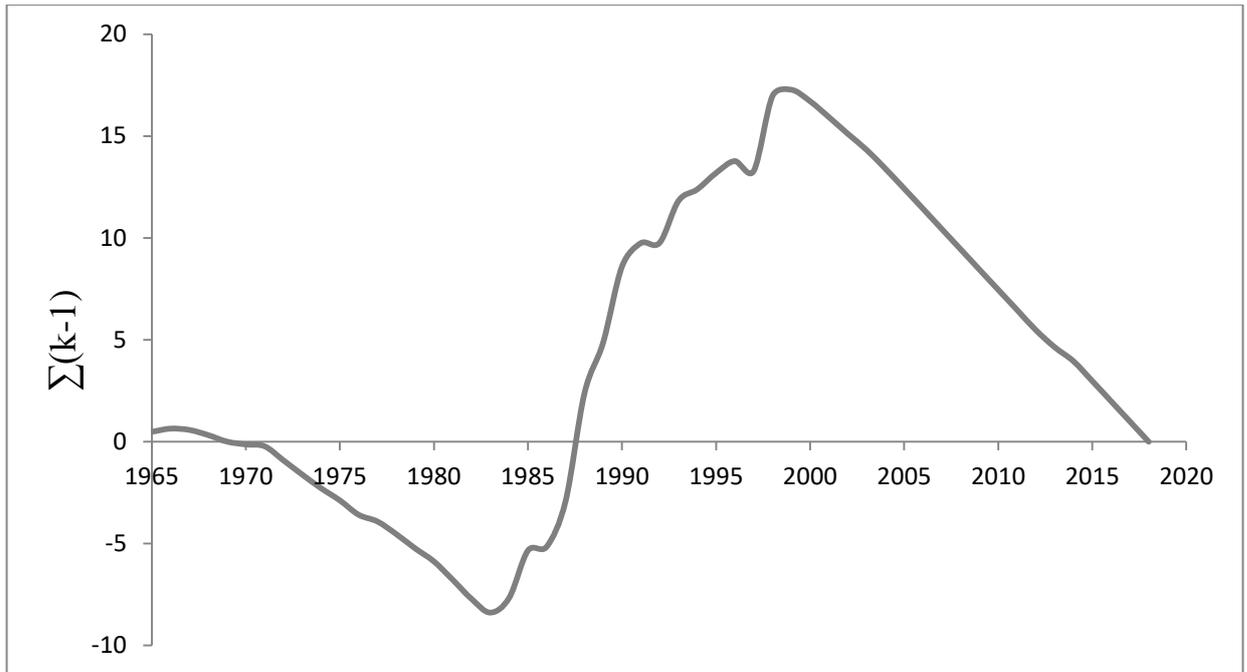


Рисунок 1.3.4. Разностная интегральная кривая средних годовых значений стока р. Ульдза – с. Соловьёвск

Испарение. В уравнении водного баланса бессточных озер испарение является основной расходной частью. Наземных наблюдений за испарением с поверхности Торейских озер не проводилось. Поэтому величина испарения с данного водоема в настоящем исследовании рассчитана с использованием данных ближайшей к исследуемым водоемам метеорологической станции с. Соловьёвск сети Росгидромета по формуле, рекомендованной ГГИ (Указания, 1969):

$$E_0 = 0,14n(e_0 - e_{200})(1 + 0,72u_{200}), \quad 1.3.3$$

где e_0 – среднее значение максимальной упругости водяного пара, вычисляемое по температуре поверхности воды в водоеме, в мб;

e_{200} – среднее значение упругости водяного пара (абсолютной влажности воздуха) над водоемом на высоте 200 см, в мб;

u_{200} – среднее значение скорости ветра над водоемом на высоте 200 см, в м/с;

n – число суток в расчетном интервале времени, а в начале и конце безледоставного периода - соответствует числу суток от даты вскрытия до

конца месяца и от начала последнего месяца безледоставного периода до даты замерзания водоема.

Величины максимальных упругости водяного пара, абсолютной влажности воздуха и скорости ветра рассчитывались по среднемесячным значениям метеорологической станции Соловьевск вследствие отсутствия этих данных.

Средняя скорость ветра над водоемом на высоте 200 см u_{200} определялась по формуле:

$$u_{200} = K_1 K_2 K_3 u_{\phi}, \quad 1.3.4$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий степень защищенности метеорологической станции на суше и принимаемый по таблице;

K_2 – коэффициент, учитывающий характер рельефа в пункте наблюдений и принимаемый по таблице;

K_3 – коэффициент, учитывающий среднюю длину разгона воздушного потока над водоемом $L_{ср}$ при различной его защищенности и принимаемый по таблице;

u_{ϕ} – скорость ветра на высоте флюгера за расчетный интервал времени, м/с.

Для определения средней длины разгона воздушного потока использовалось ПО ArcGIS. На оцифрованном плане Торейских озер были построены две системы прямоугольных сеток из параллельных профилей, ориентированных в первом случае с севера на юг и с запада на восток, а во втором случае – с северо-запада на юго-запад и с северо-востока на юго-запад. Расстояние между профилями выбиралось таким образом, чтобы они пересекали участки водоема с характерными для него сужениями и расширениями. Средняя длина разгона для данного направления профиля L_i вычислялась как среднее арифметическое из длин всех профилей этого направления. Для всей акватории водоема средняя длина разгона определялась по формуле:

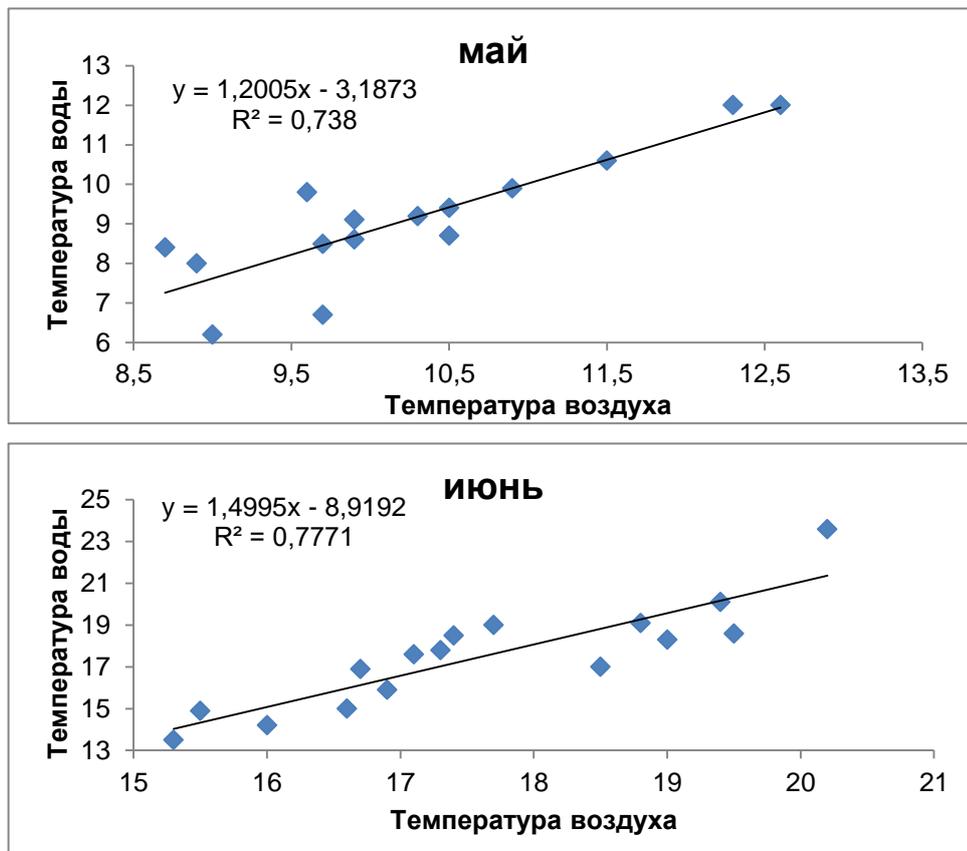
$$L_{ср} = 1/100(L_{с-ю}(N_{с} + N_{ю}) + L_{з-в}(N_{з} + N_{в})) + \quad 1.3.5$$

$$+L_{C3-ЮВ}(N_{C3} + N_{ЮВ}) + L_{СВ-ЮЗ}(N_{СВ} + N_{ЮЗ}),$$

где $L_{C-Ю}$, $L_{З-В}$, $L_{C3-ЮВ}$, $L_{СВ-ЮЗ}$ – средняя длина разгона воздушного потока по соответствующим направлениям профилей, км;

$(N_C + N_{Ю})$, $(N_З + N_В)$, $(N_{C3} + N_{ЮВ})$, $(N_{СВ} + N_{ЮЗ})$ – сумма повторяемостей направлений ветра для двух взаимно противоположных румбов, %.

Максимальная упругость водяного пара определялась по температуре поверхности воды озера Барун-Торей по таблице, приведенной в Указаниях по расчету испарения с поверхности водоемов (приложение 3) (Указания, 1969). В годы, когда наблюдения за температурой воды озера не проводились, она определялась по температуре воздуха, измеренной на станции Соловьевск. Для этого были составлены графики связи зависимости температуры воды от температуры воздуха (рисунок 1.3.4), по ним выявлены высокие значения коэффициента корреляции.



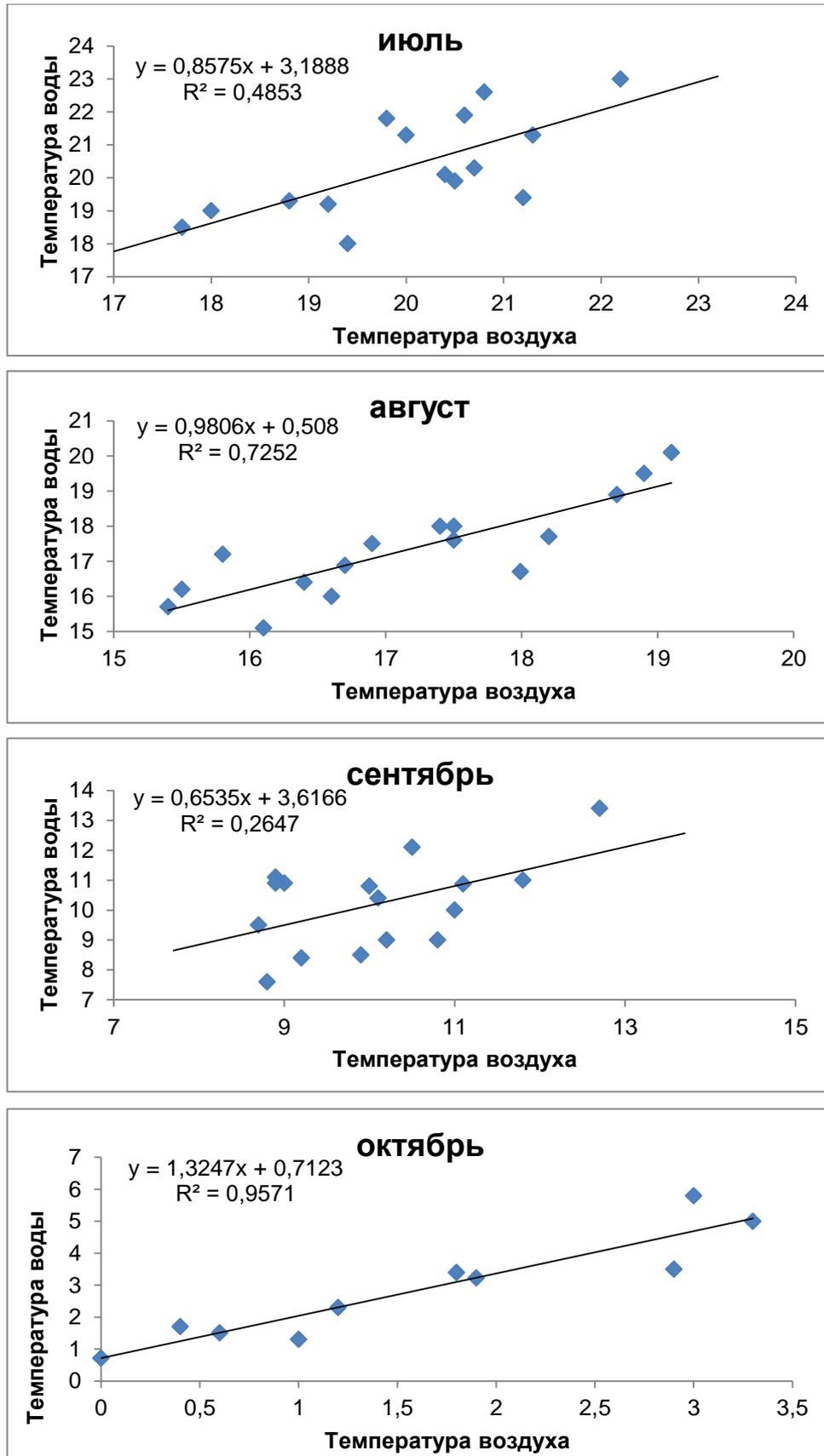


Рисунок 1.3.4. Графики связи температуры воды в озере Барун-Торей и температуры воздуха на ст. Соловьёвск

Среднее значение упругости водяного пара над водоемом на высоте 200 см рассчитано по формуле:

$$e_{200} = e'_{200} + (0,8e_0 - e'_{200})M, \quad 1.3.6$$

где e'_{200} - средняя за расчетный интервал времени влажность воздуха, измеренная на континентальной метеостанции, мб;

e_0 - максимальная упругость пара за этот же интервал времени, определенная по температуре поверхности воды в водоеме, мб;

M - коэффициент трансформации, учитывающий среднее изменение влажности и температуры воздуха в зависимости от размера водоема.

Коэффициент трансформации определен в зависимости от средней длины разгона воздушного потока над водоемом L_{cp} и разности между температурой воды в водоеме и температурой воздуха на метеостанции для одной из трех градаций значений разности $(t_0 - t'_{200})$ (по таблице 4, с. 13, Указания, 1969).

Для определения испарения в зимний период за продолжительный период времени (месяц и более), рекомендуется применять формулу П.П. Кузьмина (Постников, 2016):

$$E = 0,37 nd, \quad 1.3.7$$

где n - число суток с установившимся снежным покровом;

d - дефицит влажности воздуха.

Применив приведенные выше формулы, были получены среднегодовые значения испарения с поверхности водного зеркала Торейских озер (рисунок 1.3.5).

Осадки. В качестве исходных данных об осадках, выпадающих на поверхность Торейских озер, применены материалы метеорологической станции с. Соловьевск наблюдательной сети Росгидромета за период 1965-2019 гг.

За период 1965-2019 гг. среднемноголетнее значение сумм осадков составляет 290,1 мм (рисунок 1.3.6). На теплый период года (май-сентябрь) в среднем приходится около 254,5 мм атмосферных осадков, что составляет

около 87% (от 69 до 96%) от их годовой суммы. Наибольшее количество осадков отмечено в 1998 г. и составило 465,1 мм. Наименьшее значение сумм осадков наблюдалось в 1986 г. и составило 145,1 мм.

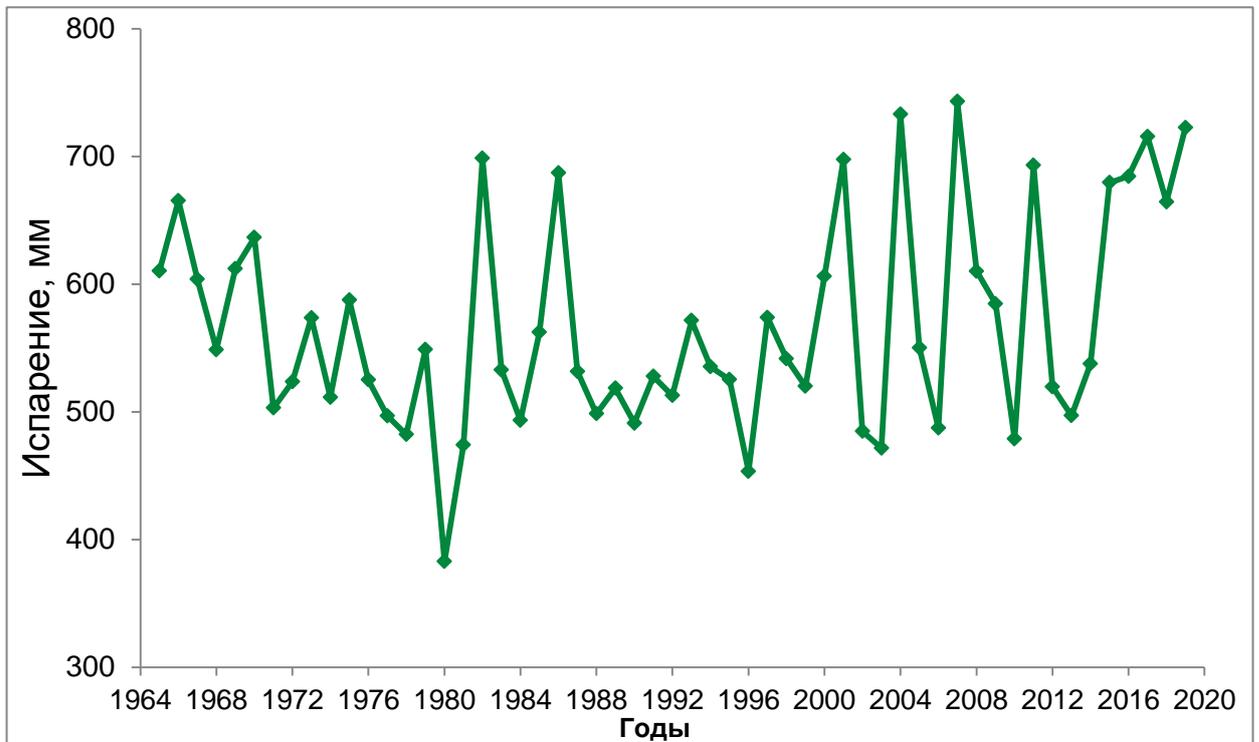


Рисунок 1.3.5. Испарение с поверхности Торейских озер за период 1965-2019 гг.

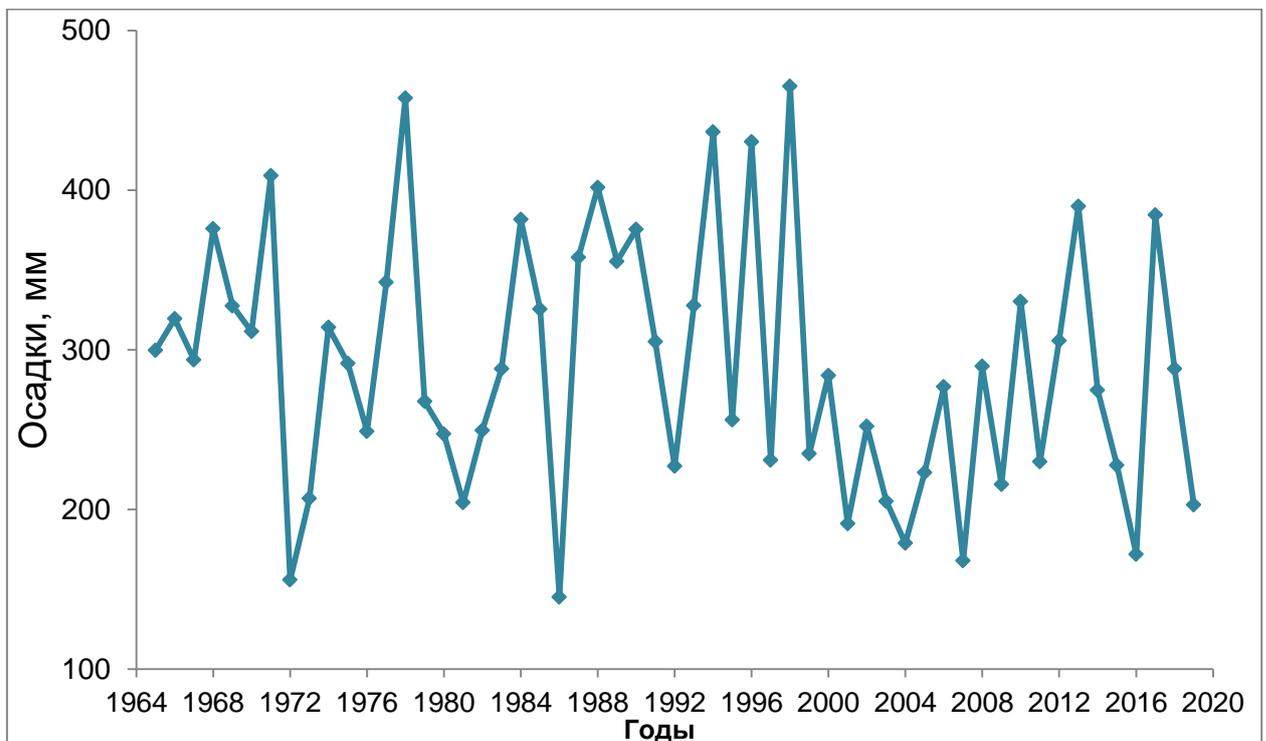


Рисунок 1.3.6. Осадки на поверхность Торейских озер за период 1965-2019 гг.

1.4. Климатические условия

Климатические условия бассейна Торейских озер характеризуются недостаточным атмосферным увлажнением, избытком солнечного света, островным распределением вечной мерзлоты. За последние пятьдесят лет среднегодовая температура воздуха в среднем по территории составляет $-0,8^{\circ}\text{C}$ и колеблется от $1,5^{\circ}\text{C}$ до $-2,8^{\circ}\text{C}$. Для исследуемого района свойственна холодная ясная зима, со средними температурами января $-24,1^{\circ}\text{C}$, и слабым ветром. Такая погода устанавливается под влиянием мощного Сибирского антициклона. Отличительной чертой летнего сезона является его разделение на два периода увлажнения: засушливый и влажный. Во время влажного периода выпадает более 60 % всех годовых атмосферных осадков. Среднегодовая температура июля за последние пятьдесят лет по району составляет $19,8^{\circ}\text{C}$.

Изменение климата характеризуется в первую очередь многолетними изменениями температуры воздуха. Колебания атмосферных осадков также играют значительную роль и оказывают влияние на природные процессы, в том числе на динамику водности водоемов (Обязов, 2011; Обязов, 2012).

Условия увлажненности данной территории преимущественно определяются климатическими параметрами теплого периода года, который длится с мая по сентябрь.

Подробный и современный анализ климатических изменений, происходящих на территории Юго-Восточного Забайкалья с середины XX века по настоящее время, изложен Обязовым В.А. с коллективом авторов (Обязов, Кирилук, Кирилук, 2021). Авторами отмечается, что с 1951 года на исследуемой территории по климатическим данным наблюдается потепление. Однако в последние три десятилетия отмечено замедление роста температуры воздуха. В период с 1951 по 1990 год рост средней годовой температуры составлял в среднем $0,26^{\circ}\text{C}/10$ лет, а в период с 1990 по 2019

год – $0,09^{\circ}\text{C}/10$ лет. В изменении атмосферных осадков прослеживается четко выраженная внутривековая цикличность. В анализируемом периоде авторы выделяют два таких цикла: с 1955 по 1982 год и с 1983 по 2011 год. При этом атмосферные осадки, превышающие многолетнюю норму, наблюдались с 1955 по 1963 и с 1983 по 1998. А в периоды 1964-1982 гг. и 1999-2011 гг. преобладали годы с осадками ниже нормы.

Основные тенденции в изменении климатических характеристик в степной зоне Юго-Восточного Забайкалья, в том числе в пределах котловины Торейских озер, рассматривались также Носковой Е.В. с соавторами (Носкова, Вахнина, Курганович, 2019), результаты этих трудов аналогичны выводам работы Обязова В.А. с коллективом авторов. Климатическое описание района Торейских озер по результатам этого исследования можно дополнить следующими особенностями. По отношению к территории Забайкальского края испарение на территории расположения Торейских озер достигает наибольших значений в связи с большой скоростью ветра и большой продолжительностью солнечного сияния. За период второй половины XX и начале XXI вв. наблюдается уменьшение увлажненности территории, которое произошло в результате повышения испарения, связанного с ростом температуры воздуха. Принимая во внимание сведения о том, что в последнее десятилетие наблюдается пауза в глобальном потеплении и наступила многоводная фаза цикла водности, авторы предполагают, что сложившаяся климатическая ситуация может измениться, в результате чего в ближайшее время ресурсы влаги в районе Торейских озер увеличатся.

В работе (Вахнина, Носкова, Голятина, 2020), где автор диссертации принимала непосредственное участие, были получены результаты, описывающие взаимосвязь климатических колебаний и изменений водных ресурсов на территории Российской части Даурской степи (степная зона Восточного Забайкалья). Анализ климатических параметров показал, что за период с 1957 по 2016 г. температура воздуха теплого периода, осредненная

по 4 метеостанциям, расположенным на Российской части Даурской степи (Акша, Борзя, Нижний Цасучей и Соловьевск), характеризуется достоверным положительным линейным трендом при 5 %-ном уровне значимости, который составил $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Средние значения температуры колебались в пределах от $13,2^{\circ}\text{C}$ (1987 г.) до $17,2^{\circ}\text{C}$ (2007 г.) (рисунок 1.4.1). При этом с 1999 г. характерен значительный рост температур, когда на всем протяжении (до 2016 г. включительно) отмечалось превышение климатической нормы ($14,8^{\circ}\text{C}$), рассчитанной за период 1981-2010 гг., исключение составлял лишь 2003 год, когда средняя температура воздуха теплого периода составила $14,1^{\circ}\text{C}$.

При этом суммы атмосферных осадков теплого периода с 1999 по 2016 гг. характеризуются отрицательными аномалиями (рисунок 1.4.2). В этот период осадки с мая по сентябрь не превышали климатической нормы в 281 мм, а в 2004 и 2007 гг. снижались до 151 и 165 мм соответственно. Исключение составляли 2010, 2008, 2012 и 2013 гг., когда отмечались положительные аномалии.

По разностным интегральным кривым сумм атмосферных осадков выделяются 2 полных квазитридцатилетних цикла в режиме увлажнения территории, внутри которых период 1955-1963 гг. характеризуется выпадением осадков выше нормы, затем с 1964 по 1982 гг. следует сухая фаза и с 1983 г. вновь наступает влажный период, который продолжился до 1998 г., а с 1999 г. начинается новая сухая фаза. В то же время внутри каждого цикла отмечаются аномалии, как, например, в 1992 г., когда во время влажного периода количество осадков снизилось до 168 мм.

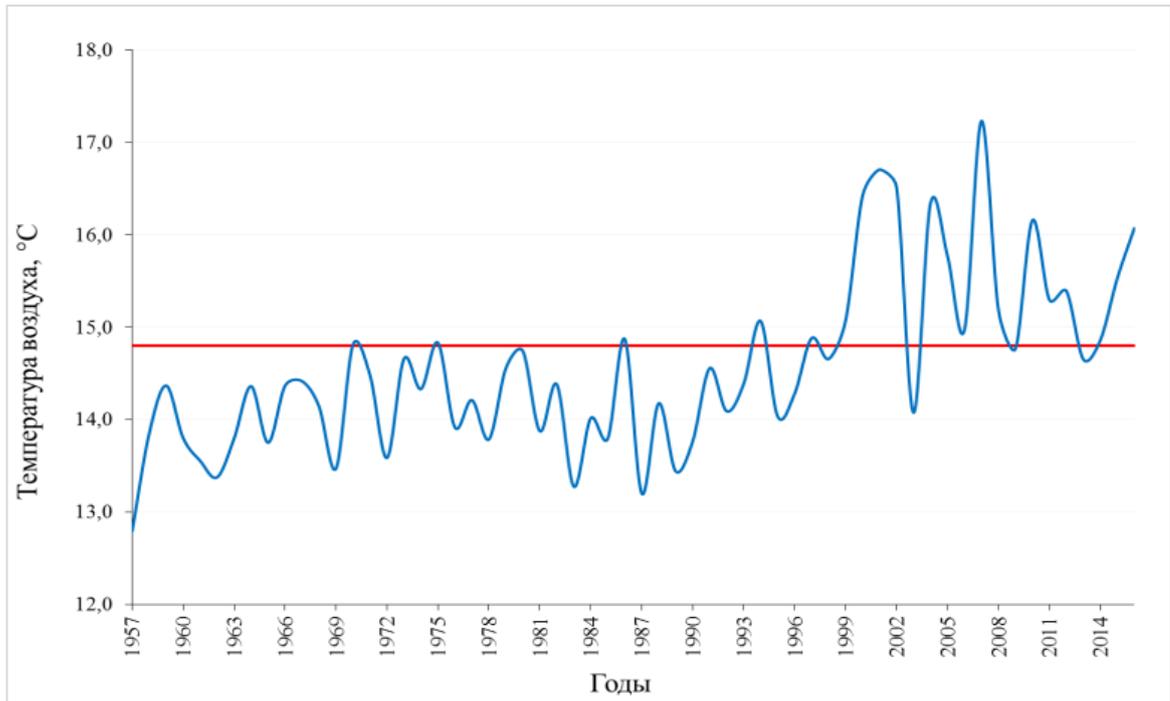


Рисунок 1.4.1. Многолетние изменения средней температуры воздуха теплого периода (май-сентябрь), осредненной по 4 метеостанциям. Красной линией показана многолетняя климатическая норма, рассчитанная за 30-летний базовый период (1981-2010 гг.)

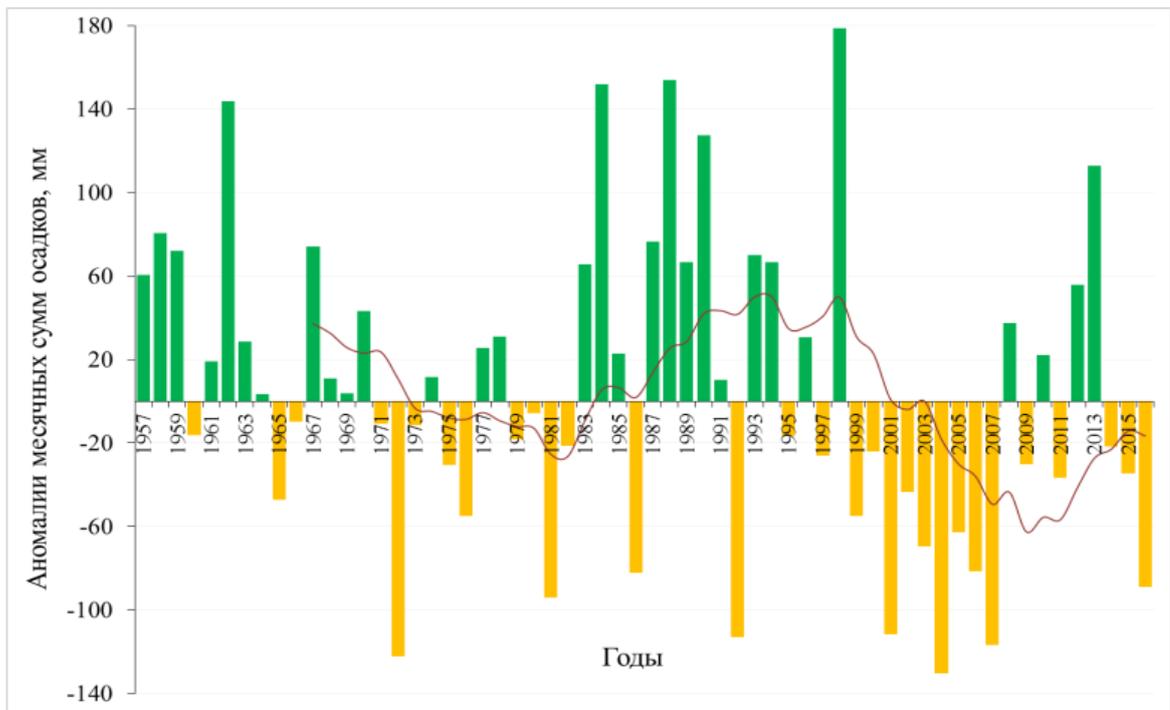


Рисунок 1.4.2. Многолетние изменения количества атмосферных осадков теплого периода (май-сентябрь) на территории Российской части Даурских степей. Сглаженная кривая (красная линия) получена 11-летним скользящим осреднением

Совместный анализ изменений климата и динамики количества, а также площадей водной поверхности бессточных озер показал, что динамика морфометрических характеристик озер степной зоны Восточного Забайкалья обусловлена влиянием климатических факторов. При этом на климатические изменения более динамично реагируют озера с наименьшей площадью. Однако суммарная площадь озер существенно уменьшается позже, когда высыхают крупные озера (Барун-Торей и Зун-Торей). Для бессточных озер его размер в текущем году является следствием условий увлажненности ряда предшествующих лет. Снижение площади водного зеркала водоемов может наблюдаться и в годы многоводного периода, если этому году предшествовали годы с низкой водностью, справедлива и противоположная ситуация.

1.5. Особенности экологического региона Торейских озер

Торейские озера и примыкающая к ним территория образуют экологический регион «Даурский», для которого характерна чрезвычайная динамичность природных процессов, связанная с изменениями климата. Сотрудниками международного биосферного заповедника «Даурский» и Института природных ресурсов, экологии и криологии (ИПРЭК СО РАН) ранее был дан анализ изменений, происходящих во флоре и фауне Даурского региона при понижении уровня Торейских озер (Kirilyuk et al., 2012; Кирилюк, 2009; Кирилюк и др. , 2009; Bazarova et al, 2019; Vazhenov, 2019, Куклин и др., 2013; Ткачук, Жукова, 2010). Так, обмеление Торейских озер сопровождается высыханием других мелких водоемов, расположенных в экорегионе «Даурский» – обширные озерно-степные регионы Монголии, Китая, находящиеся южнее Торейских озер, и междуречья Онона и Аги – с юга. Кроме этого, на исследуемой территории понижение уровней водных объектов наблюдается при наступлении климатических засух, за которыми следуют изменения растительного покрова, выражающиеся в его оскудении, приводящие в свою очередь к уменьшению численности и видового

разнообразия животного населения на всех уровнях экосистемы региона Торейских озер, включая перелетных птиц. Другим следствием уменьшения уровня Торейских озер является увеличение минерализации воды, она становится горько-соленой, и это приводит к изменению численности и видового состава гидробионтов. Происходит сокращение околоводной растительности, в частности тростника, обеспечивающей кормовую базу и место обитания уток, лысух и других видов птиц.

Увеличение продолжительности маловодной фазы гидрологического цикла Торейских озер способно привести к изменению миграционных путей водоплавающих птиц. Например, в период 1999-2009 гг. численность уток в степной зоне Забайкальского края, в том числе в регионе Торейских озер, сократилась в 59 раз, когда миграционный путь сместился на восток к Предгорью Большого Хингана и на запад – в район Хэнтэя (Горошко, 2011).

Наполнение Торейских озер в начале многоводной фазы сопровождается появлением мелководных островов, которые в дальнейшем заполняются при подъеме уровня воды. Затопливается заросшее степной растительностью дно озер, которое преобразовывается в идеальное место для гнездования и вскармливания многих птиц. При среднем уровне Торейских озер сотрудниками заповедника «Даурский» отмечается оптимальное соотношение минерализации и объема воды, при котором наблюдался максимальный и разнообразный запас кормовой базы для животных (Кириллук, 2009). Поэтому в годы средней водности кратно возрастает численность птиц, в частности сухоносов, лебедей, даурских журавлей, стерхов и др.

В результате непрерывной смены гидрологических циклов на территории Торейских озер обеспечиваются условия обитания, подходящие для птиц с различными требованиями к окружающей среде. На одном участке в зависимости от стадии климатического цикла могут гнездиться утки, потом – кулики, затем – жаворонки (Кириллук, 2009). Благодаря этому

общее видовое разнообразие флоры и фауны на периодически высыхающих озерах крайне высоко.

В работе (Кирилюк, Ткачук, Кирилюк, 2012) сказано о том, что естественное динамическое состояние экологических систем региона «Даурия» определяется как состояние циклических сукцессий, отличительной особенностью которых является возврат экосистем к условиям, близким к исходным через определенные промежутки времени (Исаков и др., 1986). При этом авторы уточняют, что увеличение влияния каких-либо факторов на экосистему способно привести к необратимости природных процессов в ней. Известно, что животное население и растительность Даурского региона преимущественно адаптированы к современному климатическому циклу увлажненности продолжительностью 30 лет. На сегодняшний день для экологов и биологов исследуемого района остается открытым научный вопрос о степени влияния уменьшенного уровня Торейских озер и трансграничной реки Ульдза на флору и фауну Даурского региона.

ГЛАВА 2. Восстановление уровня режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных гидрологических измерений

2.1. Определение морфометрических характеристик водоемов с помощью методов ДЗЗ

Вследствие отсутствия режимных гидрологических наблюдений за Торейскими озерами объективным и независимым источником информации о происходящих на данной территории природных процессах являются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющие определять морфометрические характеристики озер, включая площадь водного зеркала. Морфометрических характеристик озер, полученные с помощью данных ДЗЗ, в свою очередь, позволяют оценивать водные ресурсы водоемов, в том числе в масштабах целой страны и устанавливать уникальность водоема с точки зрения научного интереса (Измайлова, 2018а, Измайлова, 2018б, Поздняков и др., 2020)

Для определения границы «суша–вода» используют автоматизированные методы дешифрирования спутниковых изображений (McFeeters, 1996; Xu, 2006; Sun, 2012; Feyisa et al., 2014; Курганович, 2015; Катаев, Бекеров, 2017; Морозова, 2019; Шмакова, 2020; Шихов и др, 2020). В настоящий момент наиболее популярными методами дешифрирования водного зеркала является применение следующих методов: тематическая классификация спутниковых изображений и применение мультиспектральных водных индексов.

Распространенным методом автоматизированного дешифрирования космических снимков является цифровая **классификация данных** (Сутырина, 2013). Этот метод подразумевает собой процесс отнесения каждого пикселя, находящегося на изображении, к тому или иному классу объектов. Метод основан на том, что каждому пикселю многоспектрального снимка принадлежит набор значений спектральных признаков, размерность которых равна числу съемочных зон. Таким образом, процесс классификации

водных объектов сводится к распознаванию водных поверхностей по собственным им значениям спектральной яркости или отражательным способностям в одной или нескольких зонах спектра. Многие дешифрируемые объекты характеризуются изменчивость признаков - отражательная способность объектов меняется в зависимости от времени суток и сезона и это является затрудняющим фактором в данном методе. Также элементы растра могут принадлежать нескольким классам. В процессе классификации каждый элемент относится к одному классу.

Классификация объектов основывается на математической теории распознавания образов. По теории пространство признаков делится на замкнутые области с признаками, принадлежащие одному из множества классов. Затем каждый пиксель относится к классу, в область которого попал его вектор признаков. Границы полученных замкнутых областей называют решающими (разделяющими), а внутренние области – областями решения.

Способ отнесения снимка к какому-либо классу объектов определяет тип классификации, который обеспечивает соответствующий алгоритм. Тип классификации обычно формируется на основе характеристик объектов, которые заранее определены на тестовых участках.

Алгоритмы классификации подразделяются на два вида: контролируемая и неконтролируемая классификации. При контролируемой классификации соответствие спектральной отражательной способности наземных объектов классу объектов устанавливают сначала на эталонных участках, а затем в автоматическом режиме применяют для всего космического снимка. Такие алгоритмы также называют «классификацией с обучением». На рисунке 2.1 приведен пример классификации с обучением данных с космического аппарата (КА) Landsat 8 по территории Торейских озер с разделением пикселей на классы водной поверхности и суши.

При классификации с обучением используют различные способы учета спектральных характеристик эталонных объектов. Например, могут использоваться следующие методы:

Дискриминантные функции. Представляют собой линии, которые разделяют объекты на классы, при условии их не пересечения в пространстве.

Минимальные расстояния R . При вычислении евклидова расстояния объектов в пространстве от эталонного объекта каждый пиксель относится к тому классу объектов, расстояние которого к нему минимально.

Алгоритм параллелепипеда. На эталонном участке выделяют замкнутые прямоугольные области, границы которых определяют при анализе гистограмм, построенных по значениям распределения спектральных яркостей эталонных объектов в нескольких зонах спектра. Каждый пиксель относится к тому классу, в чью прямоугольную область он попал со своим значением яркости.

Метод максимального правдоподобия. Метод основан на статистических характеристиках объектов классов, заключается он в расчете вероятности попадания пикселя в какой-либо класс. Данный метод применяют, когда спектральные отражательные характеристики классов объектов слабо различаются.

При неконтролируемой классификации в качестве алгоритмов используют методы кластеризации, они основаны на пороговых процедурах. Они основаны на убеждении, что спектральная отражательная способность природных объектов всегда различна, поэтому эталонные объекты не требуются. Как правило, при пороговой классификации сравнивают значения яркости двух соседних пикселей. В случае их различия на некоторую заданную величину (порог) их относят к разным классам объектов, и автоматически проводится разделяющая граница. Считается, что при таком способе классификации точность дешифрирования не высока, но если нет других данных, то выполнение такой процедуры рационально и полезно.

На практике для выделения границы «суша–вода» большую популярность приобрели спектральные индексные изображения вследствие минимальных трудозатрат и адекватного полученного результата.

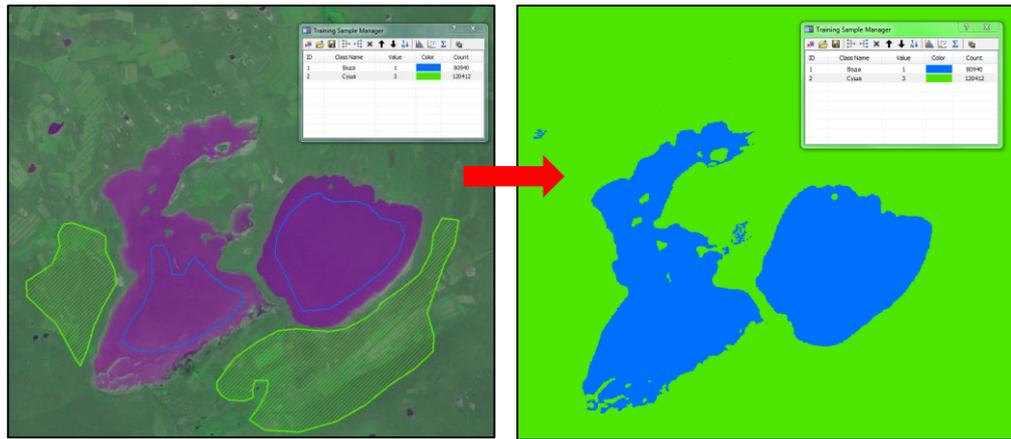


Рисунок 2.1. Пример тематической классификации с обучением

Для построения **мультиспектральных индексных изображений** вычисляют значение яркости каждого пикселя посредством применения арифметических операций над значением этого пикселя из разных каналов снимка. Часто при изучении многоспектральных изображений важны не абсолютные значения, а характерные соответствия между значениями яркости объекта в различных спектральных зонах. На таких изображениях более ярко и четко выделяются исследуемые объекты.

Для распознавания водных объектов на спутниковых изображениях существует множество спектральных индексов, которые называются «водные индексы». С помощью этих индексов определяется маска водности на подстилающей поверхности. Наиболее популярные из них описаны ниже.

Спектральный индекс Water Ratio Index (WRI). При его определении используют зеленый (*green*), красный (*red*), ближний инфракрасный (*nir*) и коротковолновой инфракрасный каналы (*swir*). Индекс вычисляют по формуле:

$$WRI = \frac{green + red}{nir + swir} \quad 2.1.1$$

Этот индекс используют для оценки содержания влаги в растительном покрове. В результате расчетов получают бинарную растровую карту с выделенными водными объектами.

Следующий индекс для определения влаги в растительности, которая взаимодействует с поступающей солнечной энергией – Нормализованный

разностный водный индекс NDWI. Этот индекс был предложен в 1996 году McFeeters (McFeeters, 1996). Использование данного индекса позволяет выявлять увлажненность растительности, кроме того, он используется для мониторинга водных объектов. Он вычисляется по формуле:

$$NDWI = \frac{green - nir}{green + nir} \quad 2.1.2$$

где *green* – излучение в зеленом участке спектра (0,5-0,6 мкм);

nir – излучение в инфракрасном участке спектра (0,7-0,9 мкм).

В 2006 году в работе (Ху, 2006) было установлено, что индекс NDWI не достаточно эффективен для выявления водных поверхностей и отделения комбинированных поверхностей. На основе идеи индекса NDWI Н. Ху предложил новый Модифицированный нормализованный разностный водный индекс – MNDWI. Поскольку им было установлено, что индекс NDWI не достаточно эффективен для выявления водных поверхностей и отделения комбинированных поверхностей (Ху, 2006). Индекс MNDWI рассчитывается по формуле:

$$MNDWI = \frac{green - swir}{green + swir} \quad 2.1.3$$

где *green* – излучение в зеленом участке спектра (0,5-0,6 мкм);

swir – излучение в среднем инфракрасном участке спектра (1,55-1,75 мкм).

Преимуществом этого индекса является его способность эффективно подавлять или удалять шумовые эффекты с поверхности, почвы и растительности, что приводит к более точному определению водных объектов на любой подстилающей поверхности. Граница отделения «суша-вода» проходит через ноль, значения индекса больше нуля соответствуют водным поверхностям. Помимо данных спутников серии Landsat, индекс MNDWI возможно извлечь по данным других спутниковых систем – SPOT, AQUA и TERRA (прибор MODIS), Sentinel-2, что говорит о его универсальности и стабильности (Ху, 2006; Курганович, 2015). Тем не менее, при выделении водных поверхностей на спутниковых изображениях с помощью индекса MNDWI могут возникнуть сложности при наличии на них

объектов с малой величиной альбедо, таких как автодороги, тени от облаков, гор или высоких зданий.

Для устранения этих недостатков используется многоканальный парный спектральный индекс AWEI – Automated Water Extraction Index (Автоматизированный индекс выделения вод), который использует 5 спектральных каналов (Feyisa et al., 2014). Данные индексы используются в паре, вначале $AWEI_{nsh}$ (non-shadowed) для общей классификации, затем $AWEI_{sh}$ (shadowed) для удаления затененных областей. Индексы $AWEI_{nsh}$ и $AWEI_{sh}$ Рекомендуется использовать в ситуациях, когда нет поверхностей с высоким альбедо, например снега или льда (Feyisa et al., 2014). Рассчитываются по формулам:

$$AWEI_{nsh} = 4(green - SWIR(1)) - (0.25 * nir + 2.75 * SWIR(2)) \quad 2.1.4$$

$$AWEI_{nsh} = blue + 2.5 * green - 1.5(NIR + SWIR(1)) - 0.25 * SWIR(2), \quad 2.1.5$$

где *green* – интенсивность излучения в зеленом участке спектра (0,5-0,6 мкм);

SWIR (1) – интенсивность излучения в среднем (коротковолновом) инфракрасном участке спектра (1,55-1,75 мкм);

SWIR (2) – интенсивность излучения в среднем (коротковолновом) инфракрасном участке спектра (2,09-2,35 мкм);

nir – интенсивность излучения в ближнем инфракрасном участке спектра (0,7-0,9 мкм);

blue – интенсивность излучения в голубом участке спектра (0,4-0,5 мкм).

В настоящее время проводится много исследований по выявлению водных объектов на основе спутниковых индексных изображений. Однако нет единого мнения о том, какой водный индекс наиболее точно определяет границу «суша – вода» (Курганович, Носкова, 2015; Катаев, Бекеров, 2017; Морозова, 2019; Корнеенкова, Измайлова, 2019; Шмакова, 2020). Поэтому в рамках настоящего исследования было проведено уточнение наиболее оптимального метода выявления водной поверхности для исследуемой территории.

2.2. Выбор оптимального метода дешифрирования водной поверхности Торейских озер

Для выбора оптимального метода дешифрирования водной поверхности Торейских озер протестированы следующие методы: классификация с обучением, классификация без обучения и применены спектральные водные индексы (парные индексы $AWEI_{sh}$ и $AWEI_{nsh}$, MNDWI, NDWI, WRI) на примере озера Ножий, которое расположено в 90 км от Торейских озер. Данные озера находятся в одной климатической зоне, и имеет однородную подстилающую поверхность окрестностей акваторий. Данные высокого пространственного разрешения (2,1 метра на пиксель) российских космических аппаратов (КА) серии Канопус-В, принятые и обработанные (прошедшие радиометрическую и геометрическую коррекции; ортотрансформирование в картографическую проекцию; комплексирование изображения из панхроматического и многоспектрального снимков) в НИЦ «Планета», являлись эталонными. Для территории оз. Ножий в летний период в базе данных НИЦ «Планета» имеется пять безоблачных спутниковых изображений за следующие даты: 5.08.2013 г., 11.08.2015 г., 2.05.2019 г., 13.06.2019 г., 2.09.2019 г. Для расчета площади поверхности озера Ножий спутниковые изображения КА серии Канопус-В были трансформированы в универсальную поперечную проекцию Меркатора, которая дает минимальную погрешность в вычислении площадных объектов. Непосредственное вычисление площади озера выполнялось средствами ПО ArcGIS методом визуального дешифрирования. Затем выбирались мультиспектральные данные КА серии Landsat за наиболее близкую дату к дате съемки эталонных данных, которые также были трансформированы в универсальную поперечную проекцию Меркатора. Далее в программном обеспечении ArcGIS с помощью инструментов Image Classification и Spatial Analyst проводилось вычисление площади озера Ножий рассматриваемыми методами дешифрирования спутниковых изображений.

Оценка точности дешифрирования спутниковых изображений различными методами производилась с использованием величины погрешности измерений ΔS :

$$\Delta S = \frac{S_{i,\varepsilon} - S_{i,\delta}}{S_{i,\varepsilon}} \times 100 \quad 2.1.6$$

где $S_{i,\delta}$ – площадь озера, определенная по результатам дешифрирования спутниковых изображений Landsat с использованием водных индексов

$S_{i,\varepsilon}$ – площадь озера, определенная по результатам визуального дешифрирования спутниковых изображений Канопус-В (эталонная).

В результате анализа полученных данных установлено, что все протестированные методы адекватно выделяют водную поверхность, а погрешность измеренных величин довольно низкая (до 2,23%). Наименьшая погрешность выделения водной поверхности выявлена для методов классификация с обучением и спектральных индексов MNDWI, AWEInsh (таблица 2.2.1, рисунок 2.2.1). Из протестированных методов наиболее оптимальным с точки зрения точности результата и временных затрат является использование спектрального индекса MNDWI.

Таблица 2.2.1. Площадь водной поверхности озера Ножий, полученная различными методами дешифрирования данных КА серии Landsat

Метод дешифрирования	Площадь озера, км ²					Погрешность, ΔS
	05.08.2013	11.08.2015	02.05.2019	13.06.2019	02.09.2019	
Эталон	10,28	9,42	8,98	9,00	8,83	
AWEI _{sh}	10,36	9,35	8,96	8,92	8,80	0,59
AWEI _{nsh}	10,54	9,63	9,28	9,16	9,01	0,92
NDWI	10,54	9,61	9,24	9,15	9,02	2,23
MNDWI	10,37	9,33	8,99	8,99	8,54	1,07
WRI	10,43	9,47	9,16	9,05	8,77	1,03
классификация без обучения	9,37	10,51	9,13	9,15	8,91	1,37
классификация с обучением	9,50	10,17	9,16	9,00	8,75	0,98



Рисунок 2.2.1. Сопоставление площадей водного зеркала озера Ножий, полученных по результатам автоматизированного и визуального дешифрирования

2.3. Пространственно-временная изменчивость Торейских озер по спутниковым данным

Для исследования многолетней динамики площади водного зеркала Торейских озер использованы данные КА серии Landsat и Sentinel-2 за период 1989-2020 гг. Выбор данных КА серии Landsat обусловлен в первую очередь доступностью долговременного однородного ряда данных. В настоящий момент данная информация является практически безальтернативным вариантом изучения изменений, происходивших в последние десятилетия на поверхности Земли, в частности водных объектов. Кроме того, данные Landsat характеризуются относительно высоким пространственным разрешением в 30 м, что обеспечивает достоверное определение площади водного зеркала озера. Данные КА серии Sentinel-2 использовались для увеличения периодичности наблюдений. Пространственное разрешение спутниковых изображений Sentinel-2

составляет 10 м., периодичность съемки – 2-3 дня. Используемые в работе спутниковые данные находятся в открытом доступе (earthexplorer.usgs.gov) и имеют географическую привязку, геометрическую и радиометрическую коррекцию. Учитывая линейные размеры Торейских озер, исходные спутниковые данные являются приемлемыми для исследования.

Обработаны и проанализированы все спутниковые изображения Торейских озер, находившиеся в открытом доступе за безледоставный период – **113** спутниковых изображений.

Подбор спутниковых изображений и их первоначальная обработка, включая вычисление индекса MNDWI, производились в web-сервисе Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>), который является составной частью Центра коллективного пользования ИКИ-Мониторинг (Лупян и др., 2015; Лупян и др., 2019, Lourian et al., 2022). Для дальнейшего расчета площадей водной поверхности озер использовалось ПО ArcGIS, где осуществлялось преобразование растровых индексных изображений в векторный формат.

Площади водной поверхности Торейских озер, полученные за один год, усреднялись. Это было необходимо для того, чтобы учесть сезонную изменчивость озер внутри года. На рисунке 2.3.1 показано изменение площади Торейских озер за 2017 г.

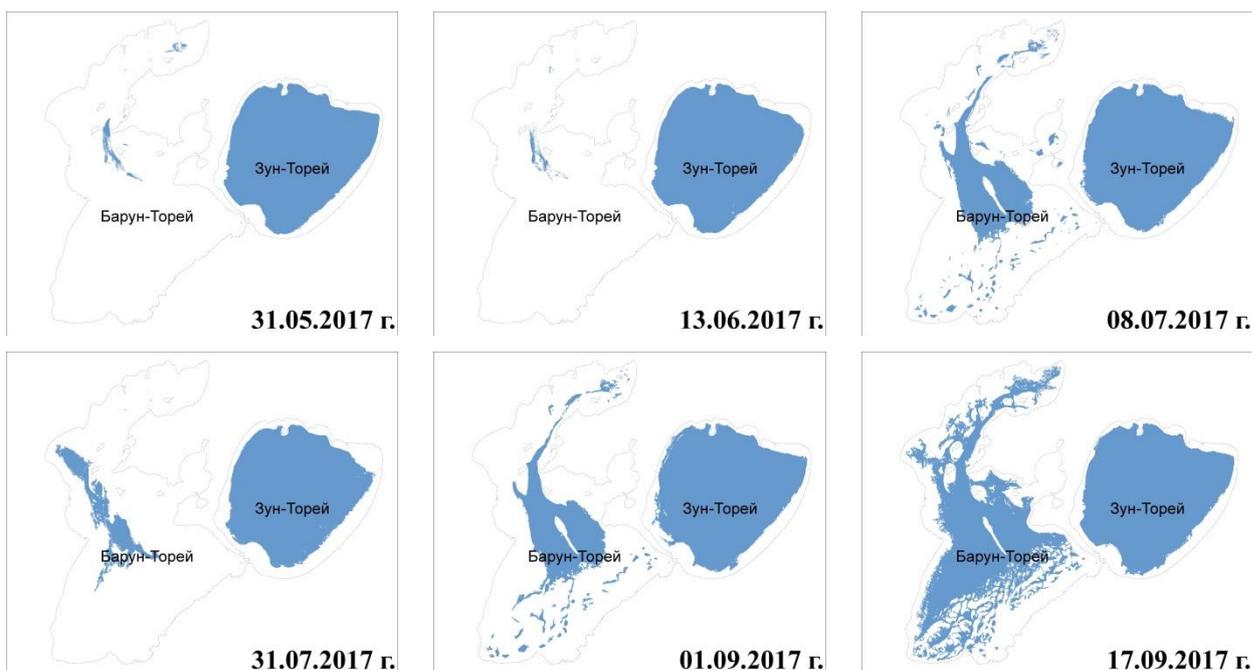


Рисунок 2.3.1. Карты-схемы водной поверхности озер Барун-Торей и Зун-Торей за 2017 г., полученные в результате дешифрирования спутниковых изображений КА серии Landsat и Sentinel-2

Результаты вычислений значений площади озер Барун-Торей и Зун-Торей за период 1989-2020 гг. приведены на рисунке 2.3.2. Анализ динамики площади водной поверхности озера Барун-Торей за период 1989-2020 гг. показал, что с 1989 площадь озера увеличивалась, достигнув максимального значения за весь наблюдаемый период в 1999 г. (548,7 км²). Далее площадь озера плавно уменьшалась до 2010 г., достигнув значения 64,6 км². Следующие 4 года наблюдалось небольшое увеличение площади водоема, а в 2015-2016 гг. озеро полностью высохло. С 2017 г. отмечается увеличение площади озера с небольшими колебаниями (рисунок 2.3.2.А). Стоит отметить, что при площади озера менее 100 км² прослеживаются отдельные участки акватории, заполненные водой, часто несоединенные друг с другом. Площадь водной поверхности озера Зун-Торей в период с 1989 по 2017 гг. менялась равномерно. Максимальная площадь озера наблюдалась в 2002 и составила 300,1 км², затем озеро равномерно уменьшалось до 2017 г., а в следующие 3 года площадь водоема уменьшилась на 86,6%, достигнув минимальной отметки, равной 31,5 км² (рисунок 2.3.2.Б).

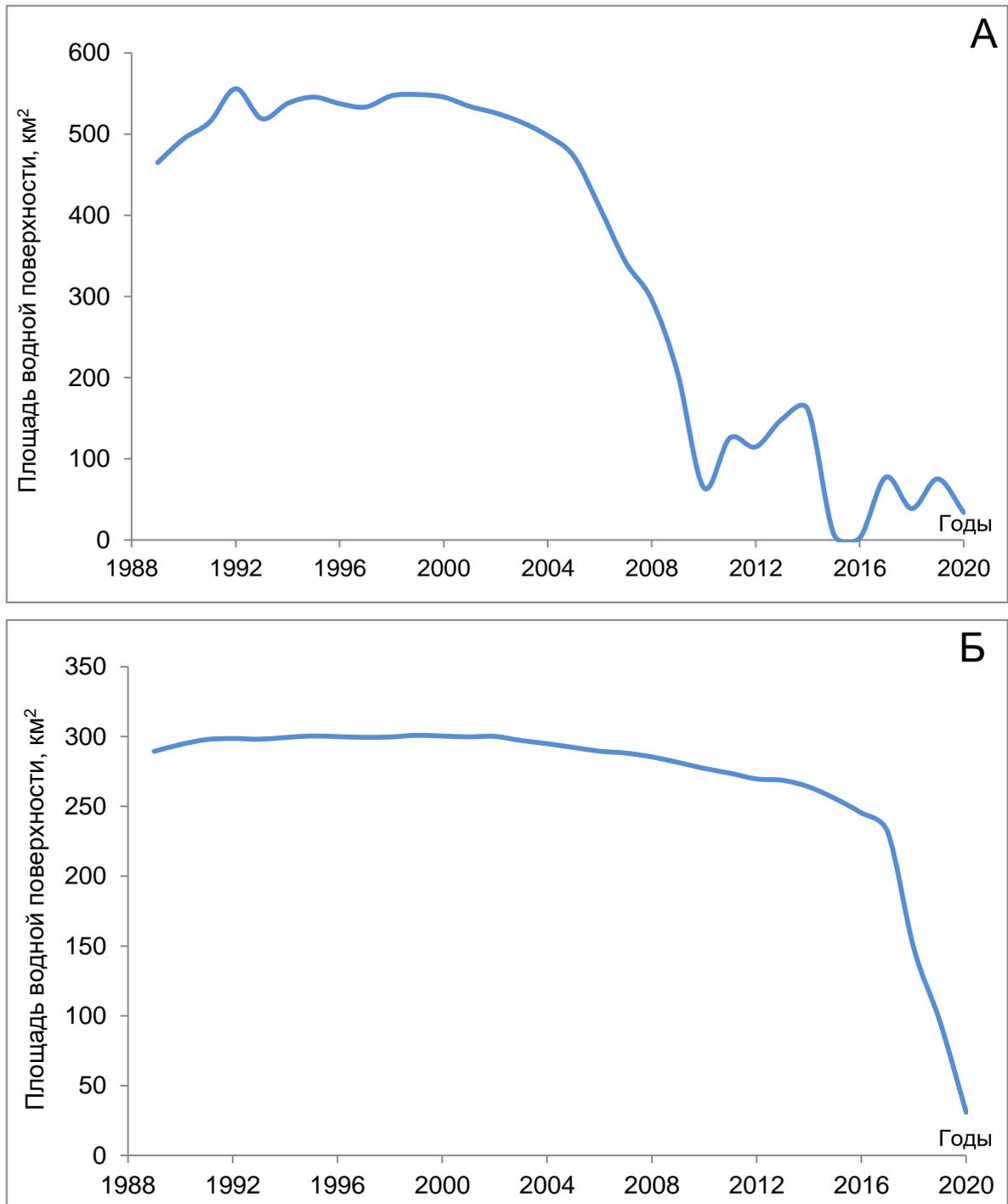


Рисунок 2.3.2. Изменение площадей водной поверхности Торейских озер за период с 1989 по 2020 гг.: А – Барун-Торей, Б – Зун-Торей

2.4. Восстановление уровня режима Торейских озер по данным ДЗЗ

В основу восстановления уровня режима Торейских озер за период с 1989 по 2020 гг. положены площадь водного зеркала Торейских озер, полученная по данным ДЗЗ, и цифровая модель рельефа местности (ЦМР).

Цифровая модель рельефа местности с шагом 50 см создана в программном обеспечении ArcGIS (рисунок 2.4.1). Исходными данными послужили карты рельефа местности, предоставленные государственным бюджетным учреждением «Государственный природный биосферный заповедник «Даурский».

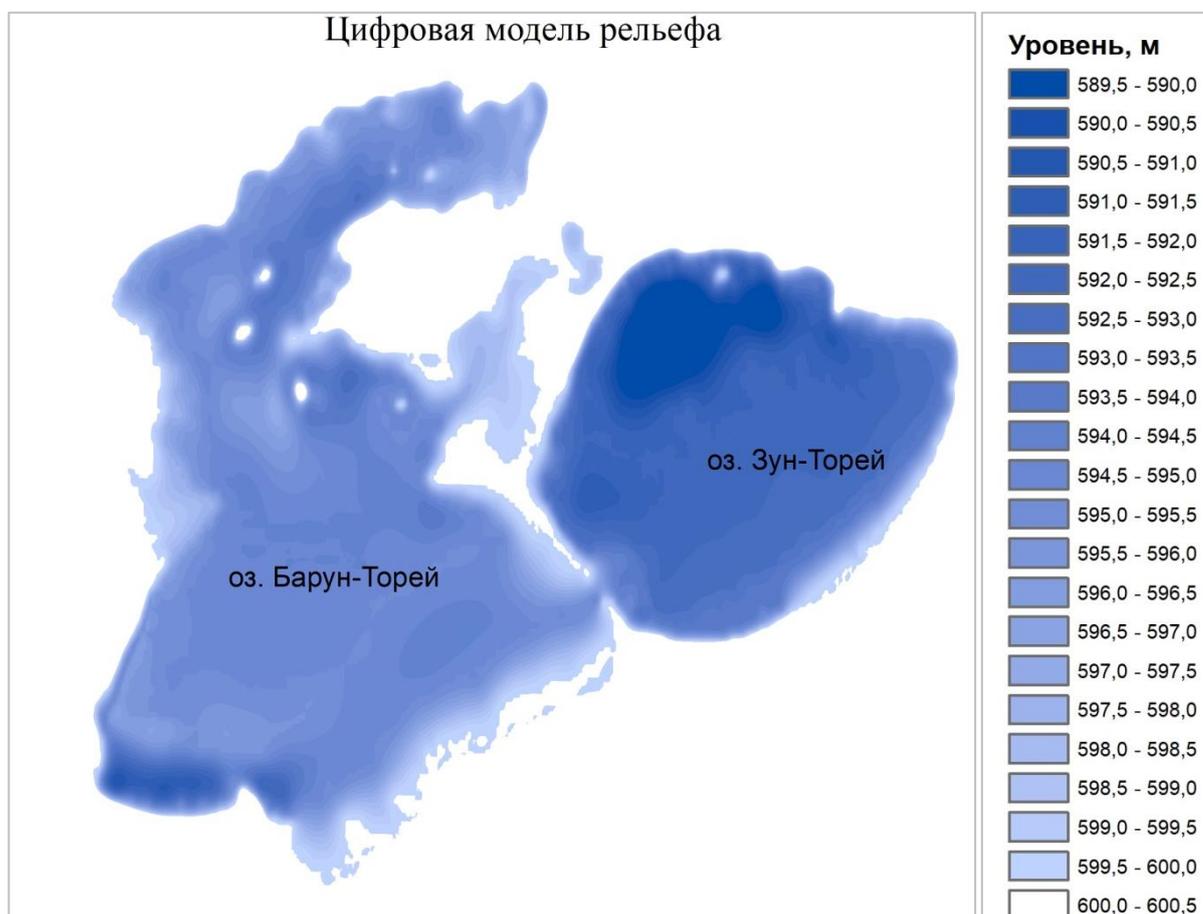


Рисунок 2.4.1. Цифровая модель рельефа дна Торейских озер

На полученной карте ЦМР Торейских озер отчетливо отмечаются острова, наиболее глубокие участки озер, а также пологие склоны берегов и дна водоемов. Особенности строения котловины озер при колебаниях уровня воды обуславливают значительные изменения площади озер и других морфометрических характеристик. Более пологие склоны отмечаются у озера

Барун-Торей. Большую глубину имеет озеро Зун-Торей – 7 м, но оба озера являются мелководными. Отдельного внимания требует котловина озера Барун-Торей. По данным ЦМР установлено, при уровне озера менее 595 м, данный водоем можно считать высохшим, в силу того, что по информации ЦМР при данном уровне наблюдаются отдельные, несвязанные между собой участки водоема - мелководья (рисунок 2.4.2).



Рисунок 2.4.2. Площадь водного зеркала Торейских озер при различных уровнях воды

Наличие поверхностного притока в озеро Барун-Торей определяет уровеньный режим данного озера. При достижении уровня воды в Барун-Торее равном 596,1 м, вода, по соединяющей протоке, перетекает в озеро Зун-Торей. Таким образом, Торейские озера соединяются и при достижении одинаковых отметок уровня воды выше 596,1 м имеют взаимосвязанный уровеньный режим. На рисунке 2.4.3 приведен график поперечного профиля дна Торейских озер с указанием уровня протоки. В периоды, когда уровень

воды в озерах ниже уровня протоки, их уровеньный режим становится разобщенным. При этом в озере Зун-Торей наблюдается резкий спад уровня воды.

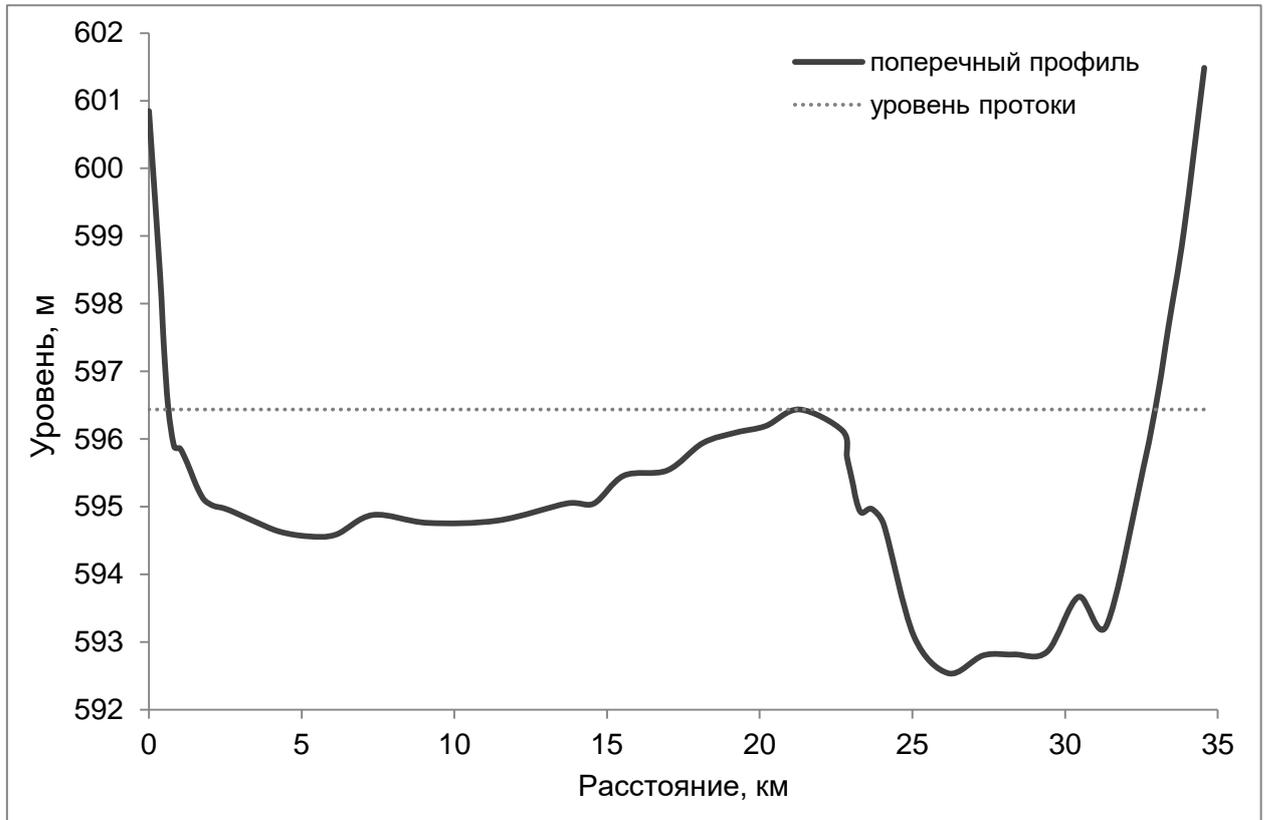


Рисунок 2.4.3. График поперечного профиля дна Торейских озер

Для восстановления уровня Торейских озер по данным ЦМР построены графики зависимости уровня воды озер от их площади водной поверхности и объема $H=f(S)$, $H=f(W)$ (рисунок 2.4.4, 2.4.5).

В результате сопоставления площадей Торейских озер, полученных по данным ДЗЗ и ЦМР, вычислены уровни водоемов за период с 1989 по 2020 гг. (рисунок 2.4.6).

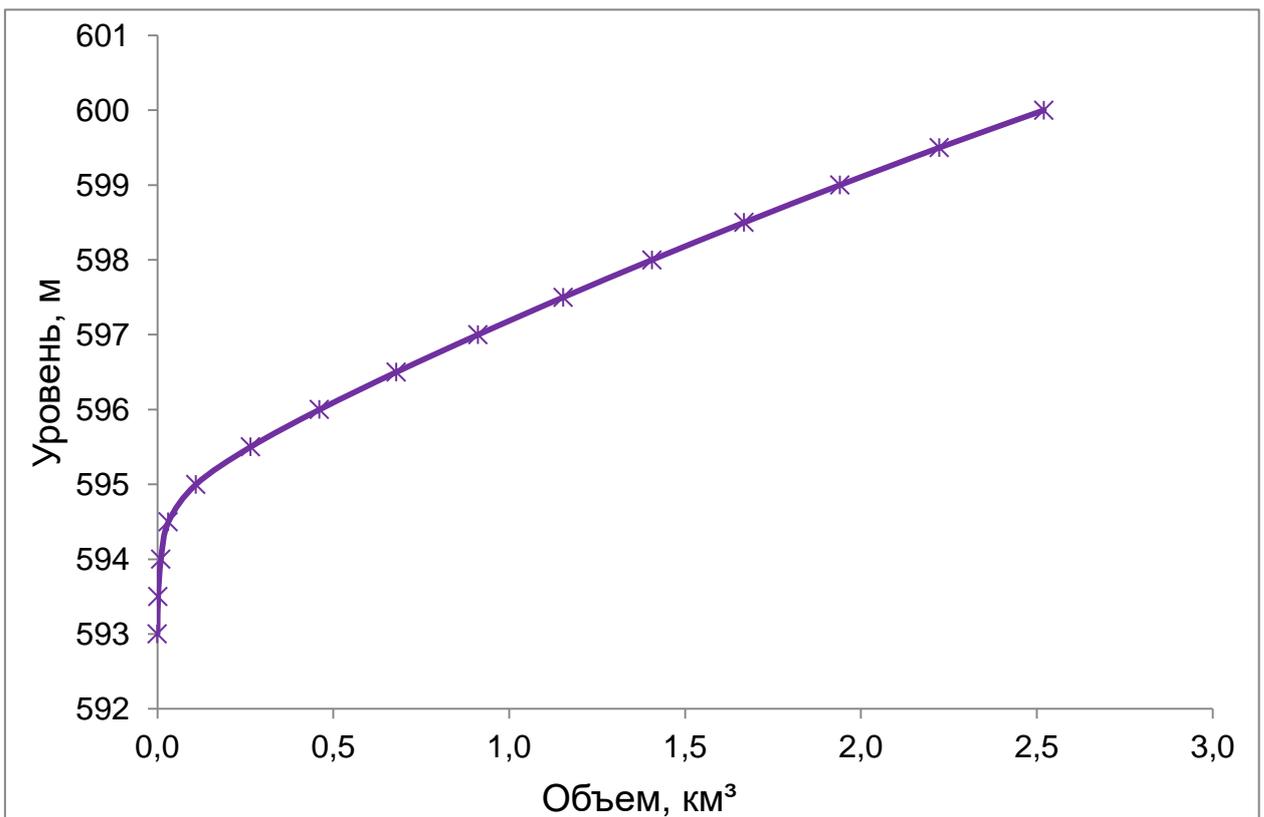
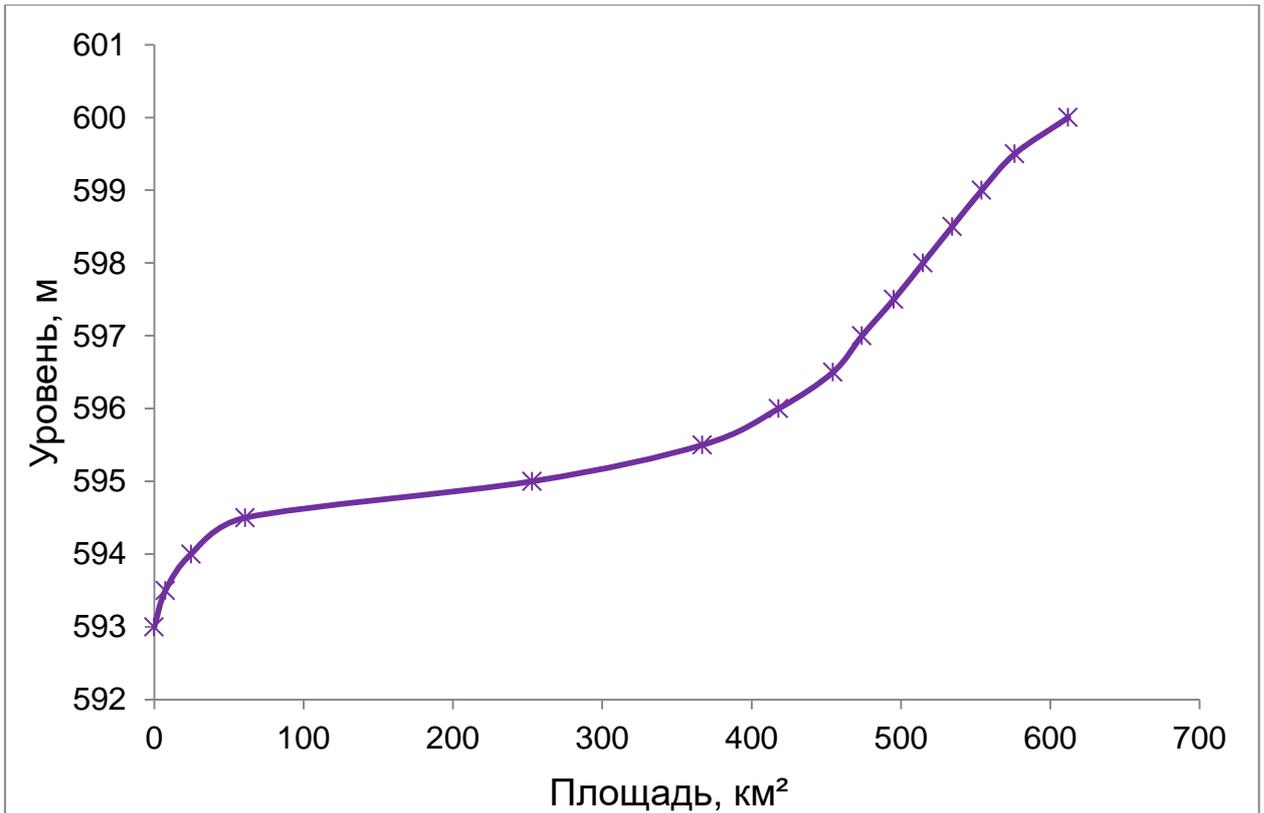


Рисунок 2.4.4 Графики зависимости уровня воды озера Барун-Торей от его площади водной поверхности и объема $H=f(S)$, $H=f(W)$

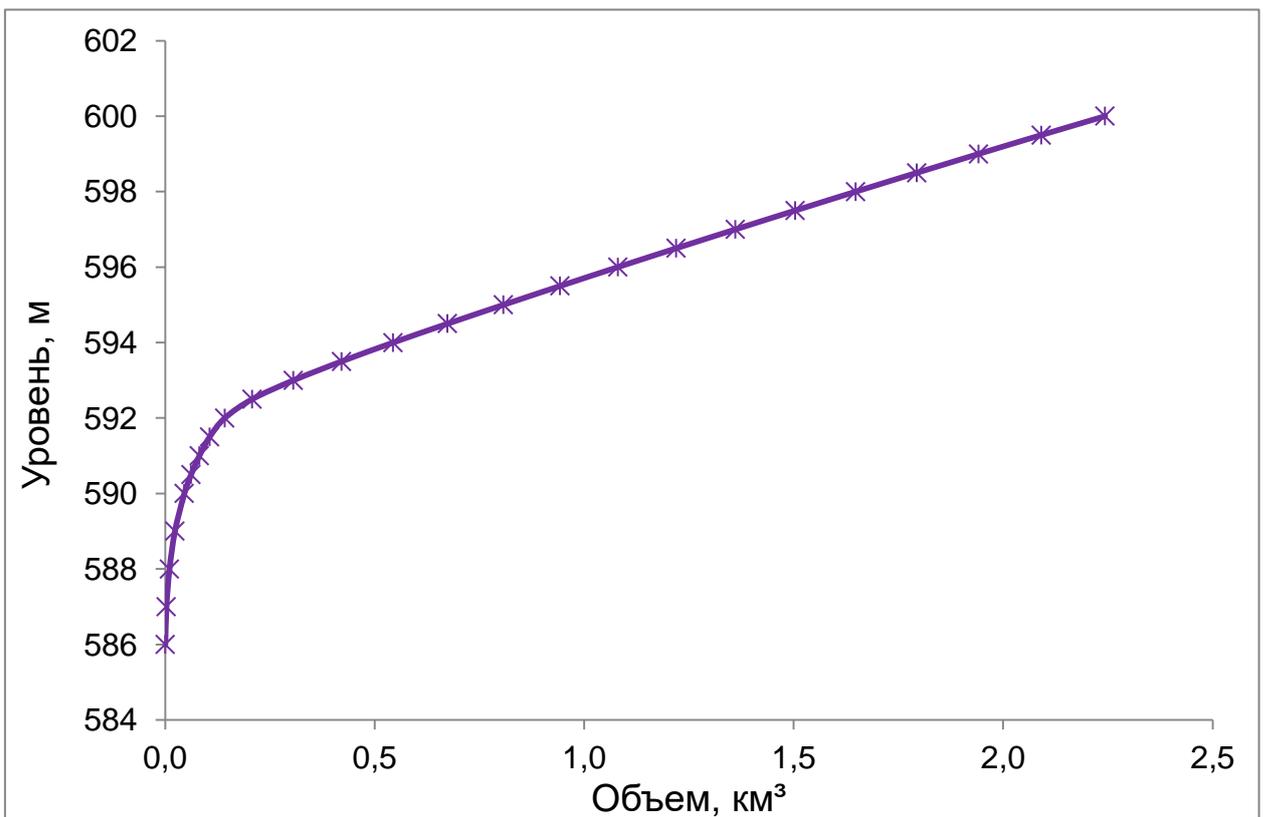
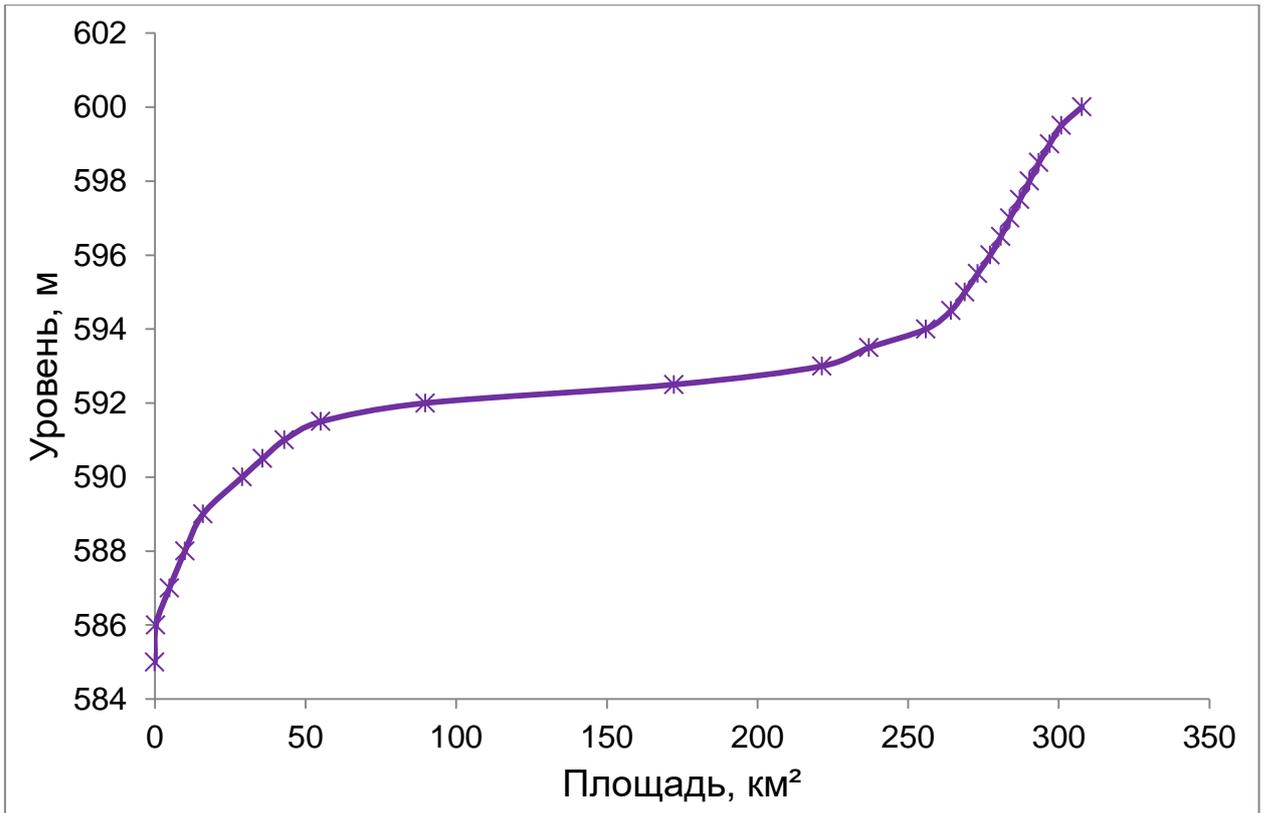


Рисунок 2.4.5 Графики зависимости уровня воды озера Зун-Торей от его площади водной поверхности и объема $H=f(S)$, $H=f(W)$

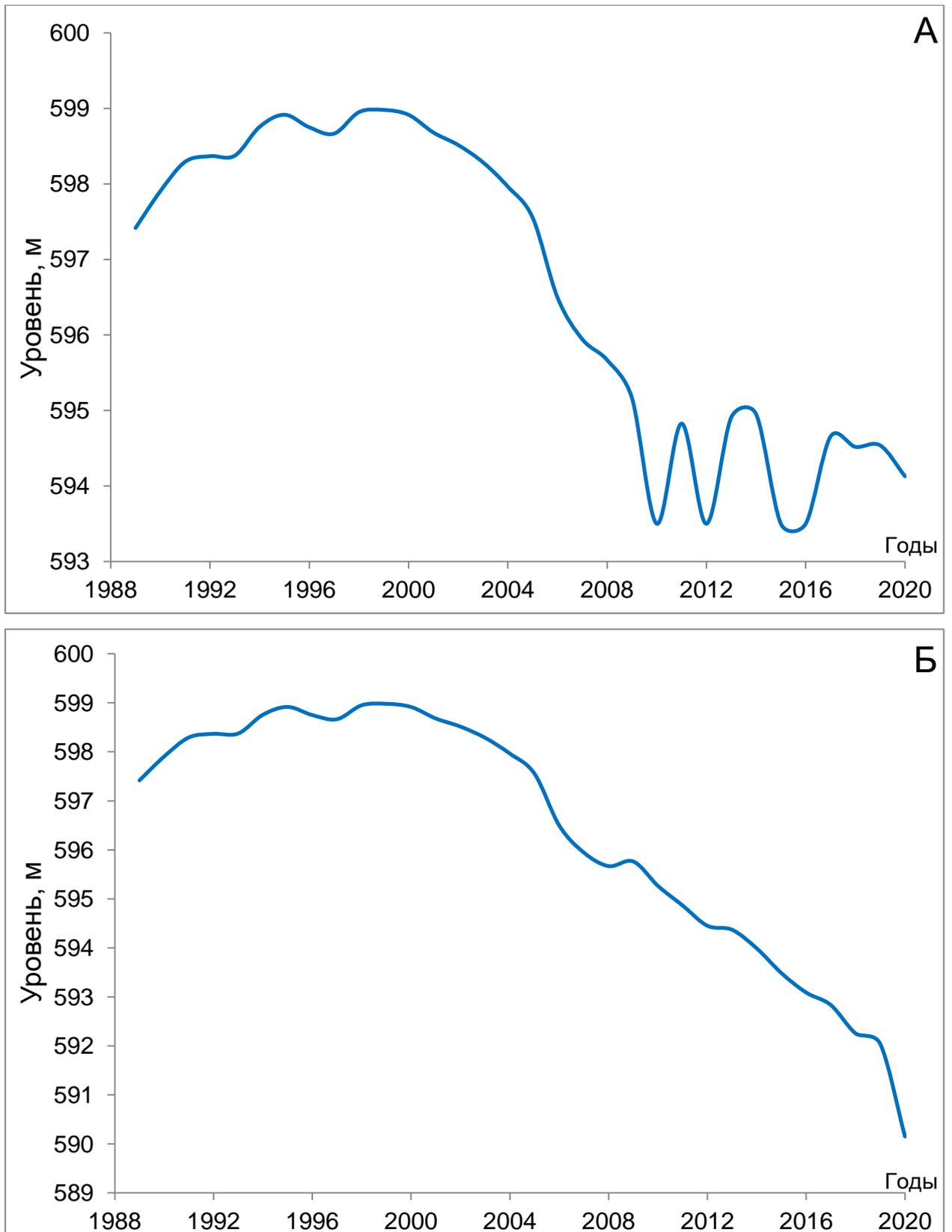


Рисунок 2.4.6. Уровень озер Барун-Торей (А) и Зун-Торей (Б), восстановленный по данным ДЗЗ за период с 1989 по 2020 г.

По спутниковой информации наблюдается рост уровня озера Барун-Торей в период с 1989 по 1999 гг. Период с 2001 по 2020 гг. характеризуется

понижением уровня озера, вплоть до полного высыхания котловины водоема в 2015-2016 гг. При этом если учесть факт, что при уровне ниже 595,0 м в котловине озера наблюдаются лишь отдельные заполненные водой участки, то можно заключить, что озеро высохло в 2009 г., когда его уровень составил 594,9 м. После полного высыхания озера в 2015-2016 гг. наблюдается незначительное повышение уровня озера, но до отметки ниже 595 м. Озеро Зун-Торей, также как и Барун-Торей, наполнялось до 1999 г. Затем, вплоть до 2020 г. наблюдается уменьшение уровня озера (Кашницкая, Болгов, 2021в).

Погрешность определения уровня Торейских озер по данным ДЗЗ

Для оценки точности определения значений площади зеркала Торейских озер, полученной в результате дешифрирования спутниковой информации, по картографическим материалам в первую очередь необходимо выявить погрешность пространственного положения изолиний на топографической карте σ_L при известной погрешности отметки поверхности Земли σ_{h1} по формуле:

$$\sigma_L = \sigma_{h1} / \operatorname{tg} \alpha, \quad 2.2.1$$

где α – уклон местности в данной точке.

По формуле определения погрешности площади, принятой в геодезии (Инструкция по межеванию земель, 1996), рассчитана погрешность определения площади зеркала озер:

$$\sigma_F = \sigma_k * \sqrt{F}, \quad 2.2.2$$

где F – площадь зеркала озер;

σ_k – ошибка координат точек, образующих контур озера (σ_L).

Тогда по вычисленной по данным ДЗЗ площади зеркала озер определим погрешность выявления уровня воды в данном озере при имеющейся зависимости $h = f(F_{03})$ по формуле предложенной Вентцель Е.С. (Вентцель, 2006):

$$\sigma_{h2} = |\varphi'(F_{03})| * \sigma_F, \quad 2.2.3$$

где $|\varphi'(F_{03})|$ – производная функция h от F .

Таким образом, оценка точности метода определения уровня воды Торейских озер по данным ДЗЗ с учетом погрешности измерений на каждом этапе вычислений составила в среднем 4,2 см.

ГЛАВА 3. Модель водного баланса Торейских озер

3.1. Описание модели водного баланса Торейских озер

Имеющиеся гидрометеорологические данные (оз. Барун-Торей – с. Кулусутай (1965-1978 гг.), р. Ульдза – с. Соловьевск (1965-2018 гг.), р. Ималка – н.п. Красная Ималка (1965-2018 гг.), с. Соловьевск (1965-2019 гг.)) (раздел 1.3) и восстановленный по спутниковым данным уровенный режим Торейских озер за период 1989-2020 гг. (раздел 2.2) позволили создать устойчивую модель водного баланса (Кашницкая, Болгов, 2021а). Она основана на решении уравнения водного баланса. Известно, что для водного баланса бессточных озер, расположенных в аридной и полуаридной природных зонах, единственным расходным элементом водного баланса является испарение. Приходную часть водного баланса обеспечивают осадки и речной сток, а в условиях недостаточного увлажнения роль речного стока возрастает.

В настоящем исследовании рассматривается уравнение водного баланса для бессточных озер за годовой интервал времени, которое имеет вид:

$$P + Q_{SI} - E - \eta = \Delta H, \quad 3.1.1$$

где P – осадки на водную поверхность водоема; Q_{SI} – поверхностный речной сток; E – испарение с водной поверхности; η – невязка; ΔH – изменение уровня воды.

Осадки на водную поверхность Торейских озер определялись по данным метеорологической станции Соловьевск, расположенной в 10 км в южном направлении от исследуемых озер.

Поверхностный речной сток определялся по данным гидрологических станций – р. Ульдза–с. Соловьевск, р. Ималка–н.п. Красная Ималка.

Среднемесячные значения испарение с водной поверхности в безледоставный период рассчитывались по формуле, рекомендованной ГГИ (Указания, 1969), в период ледостава – по формуле П.П. Кузьмина (Постников, 2016). Формулы приведены в разделе 1.3 первой главы настоящей работы под номерами 1.3.3. и 1.3.7.

Восстановление водного баланса Торейских озер за период 1965-2018 гг. осуществлялось с использованием возможностей проекта Jupyter Notebook (<https://jupyter.org/>). Для этого написана автоматизированная программа для ЭВМ на языке python, в основу которой положено уравнение водного баланса Торейских озер. В качестве исходных данных программа использует сведения об осадках, испарении и притоке. Выходными результатами ее работы являются данные об уровнях, площадях и объемах Торейских озер в формате Excel (Свидетельство о государственной регистрации..., 2022)

В связи с тем, что измерения и расчет параметров водного баланса происходят в любом случае с погрешностью, вызванной несовершенствами методов измерений и расчетов, в уравнение водного баланса вводят дополнительный член уравнения – невязка η (Соколов, Чапмен, 1976).

Невязка в уравнении водного баланса подразделяется на систематическую и случайную погрешности. Систематические погрешности приводят к систематическому отклонению элементов водного баланса от истинных значений. Они являются следствием не учета каких-либо постоянно действующих факторов. Выявить систематическую погрешность можно методом сопоставления элементов водного баланса с истинными значениями (Вуглинский, 1991).

В настоящем исследовании невязка (или дополнительные потери) определялась в результате сопоставления измеренных уровней воды в озере Барун-Торей за период с 1965 по 1978 гг., уровней Торейских озер, восстановленных по данным дистанционного зондирования Земли за период с 1989 по 2020 гг. (рисунок 2.4.6) и графиками уровня воды озера Барун-Торей, полученными Обязовым В.А. (Обязов, 1996; Обязов, 2012).

Модель водного баланса Торейских озер калибрована на основе знаний о том, что исследуемые озера и нижнее течение реки Ульдза расположены в зоне «рассеивания» стока, в которой потери воды на фильтрацию из русел и испарение существенно превышают местный сток. Поэтому маловодные периоды в притоке воды к озеру носят более выраженный, затяжной характер, что также отражается на водном балансе озер, увеличивая потери на фильтрацию при росте уровня воды

(Болгов, 1985). По результатам исследователей в засушливых регионах потери воды в дельтах рек могут составлять от 5 до 25% (Викулина, 1979; Зайков, 1960; Кренделев, Шамсутдинов, 1987).

Из всех составляющих водного баланса испарение с водной поверхности является рассчитываемой величиной, поэтому в его значениях с большей вероятностью могут находиться статистические ошибки, обусловленные неточностью метода определения искомой величины. На данную величину была введена поправка.

Таким образом, установлено, что в уравнении водного баланса Торейских озер систематически занижено испарение на 5 %, а приток увеличен на 28 %. Приняв выявленные поправки в уравнение водного баланса (формула 3.1), получены изменения уровня, площади и объема Торейских озер за период 1965-2018 гг. Графики изменения уровня Торейских озер представлены на рисунках 3.1.1 и 3.1.2. Графики изменения объема и площади озер приведены в Приложении 1.

В результате корреляционного анализа установлено, что уровенный режим Торейских озер за период 1965-1978 гг., восстановленный методом водного баланса, высоко согласован с наблюдаемыми данными на гидрологическом посту Кулусутай, установленном на берегу озера Барун-Торей. Коэффициент корреляции r составляет 0,99. Хорошая согласованность отмечается между многолетними изменениями уровней озер Барун-Торей и Зун-Торей, определенными методом водного баланса, с уровнями, выявленными по данным ДЗЗ, коэффициент корреляции – 0,98. Также полученные данные хорошо согласованы с ходом изменения уровня озера Барун-Торей за 1965-2009 гг., выявленным Обязовым В.А.

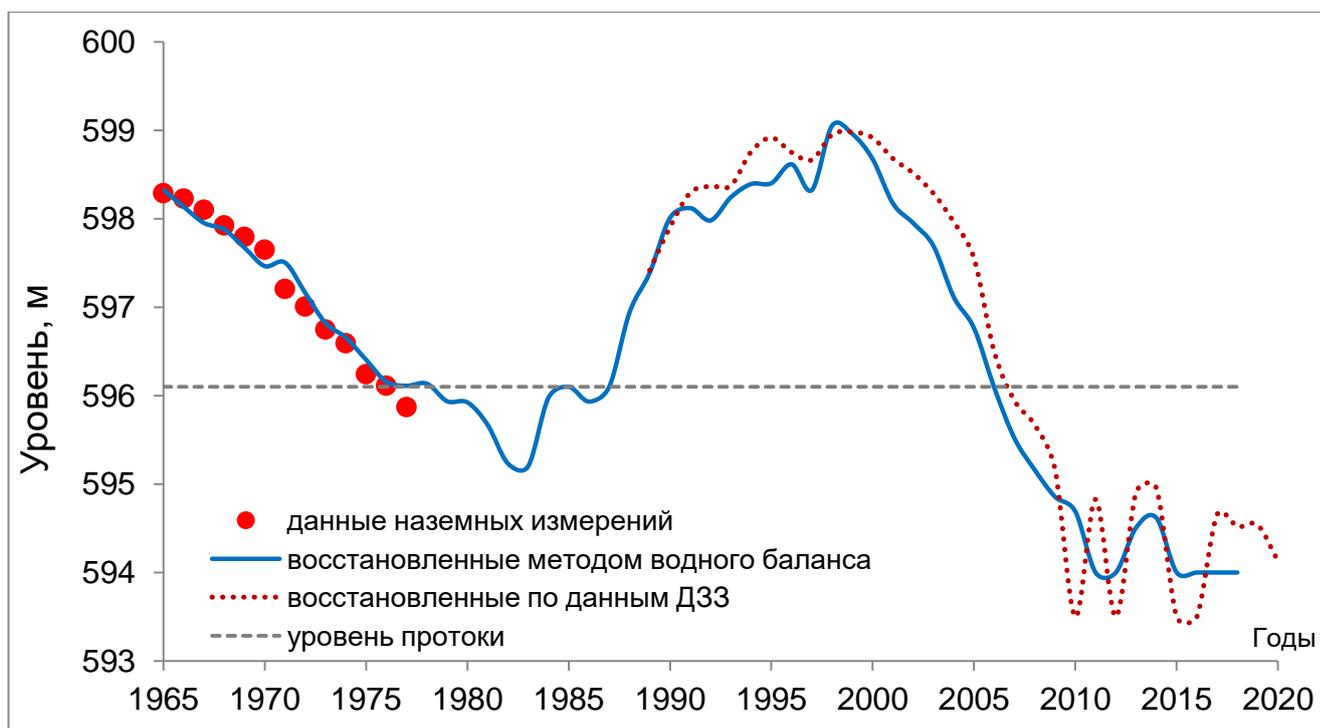


Рисунок 3.1.1. Многолетнее изменение уровня режима озера Барун-Торей, восстановленное с помощью применения методов: водного баланса и данных ДЗЗ; график дополнен данными наземных наблюдений

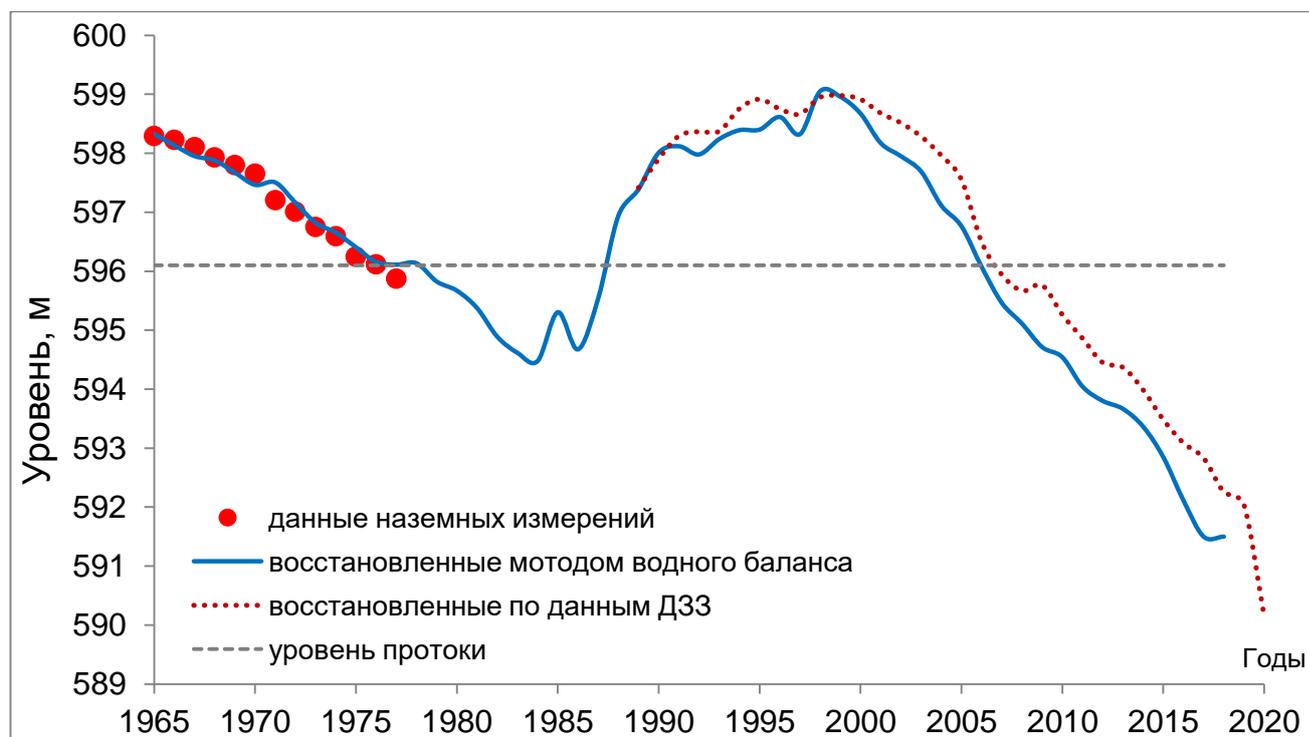


Рисунок 3.1.2. Многолетнее изменение уровня режима озера Зун-Торей, восстановленное с помощью применения методов: водного баланса и данных ДЗЗ; график дополнен данными наземных наблюдений

По данным модели водного баланса за период с 1965 по 2018 гг. на Торейских озерах максимальная наполненность котловины наблюдалась в 1999 г. Минимальные уровни воды наблюдались за этот период дважды: для озера Барун-Торей в 1982-1983 гг., и с 2009 года до настоящего времени. Также необходимо учитывать, что при уровне воды в данном озере ниже 595 м, в котловине озера отмечаются лишь отдельные мелкие водоемы и солончаки. На озере Зун-Торей минимальный уровень воды в озере наблюдался в 1984-1986 гг., однако уровень в данные годы был выше, чем в последний сухой период увлажненности, наблюдающийся на озерах в настоящее время.

Проверка на репрезентативность гидрологического режима Торейских озер за период 1965-2018 гг.

Ряд данных гидрологического режима Торейских озер за период 1965-2018 гг. является выборкой из генеральной совокупности данных. Поэтому важным этапом является оценка того, насколько полученный ряд данных отражает типичные закономерности изменения гидрологического режима на исследуемой территории, иными словами репрезентативен.

В гидрологии оценка репрезентативности (представительности) анализируемого ряда данных применяется для того, чтобы оценить возможные ошибки параметров и расчетных значений с заданной вероятностью превышения при инженерных расчетах, не прибегая к увеличению коротких гидрологических рядов и их параметров до значений многолетнего периода.

Представительность ряда данных характеризуется не только длительностью периода наблюдений, но и строгим соблюдением научно обоснованных правил выбора данных из генеральной совокупности, обеспечивающим его объективность. Способы выделения выборочного ряда данных делятся на: элемент и группа элементов (гнездовой и серийный отбор). Данные гидрологических наблюдений являются серийным отбором – непрерывный ряд данных, представляющий собой фрагмент всего ряда наблюдений (генеральной совокупности). Приемлемая точность выбранного ряда данных из генеральной

совокупности достигается при условиях: выборка должна быть достаточно длительной $n > 30$ лет, в ней должны быть отражены закономерности, существующие в генеральной совокупности; элементы выборки нужно выбирать объективно, независимо от предпочтений исследователя. Данные условия установлены математической теорией выборочного метода, основанной на основных теоремах теории вероятностей (Большая советская энциклопедия, 1975). Однако, анализ изменений гидрологического режима рек и озер за более длительные периоды наблюдений показывает наличие колебаний гидрологических характеристик, таких как расход воды и уровень озера. Эти колебания проявляются в форме последовательной смены многоводных и маловодных групп лет, которые отличаются между собой по отклонению от среднего значения гидрологической характеристики и по продолжительности той или иной группы лет. Данные группы представляют собой циклы разной амплитуды колебаний и продолжительности. Период времени, в течение которого наблюдается увеличение водности, называется многоводной фазой цикла (многоводный период), а при уменьшении – маловодной фазой цикла (маловодный период) (Владимиров, 1990).

На рисунке 3.1.3 представлена интегральная разностная кривая, отражающая циклы колебаний уровня Торейских озер за период 1965-2018 гг., из которого следует, что в период 1965-2018 гг. наблюдалась одна полная многоводная фаза цикла – с 1988 по 2003 гг. и две маловодные – с 1973 по 1987 гг. и с 2004 по 2018 гг. Полный цикл водности, включающий многоводную и маловодную фазы, наблюдался в период с 1973 по 2003 гг. Для статистических достоверных гидрологических расчетов период наблюдений должен включать несколько циклов водности (Соколов, 1976). Поэтому на данном этапе гидрологических расчетов необходимо восстановить уровень Торейских озер за максимально возможный период.

Продолжительность периода наблюдений считают достаточной, если рассматриваемый период репрезентативен, а относительная средняя квадратическая погрешность расчетного значения исследуемой гидрологической

характеристики не превышает 10 % для годового и сезонного стоков и 20 % - для максимального и минимального стоков (Международное руководство, 1984). В нашем случае среднее квадратическое отклонение составляет 1,37 или 0,23 %.

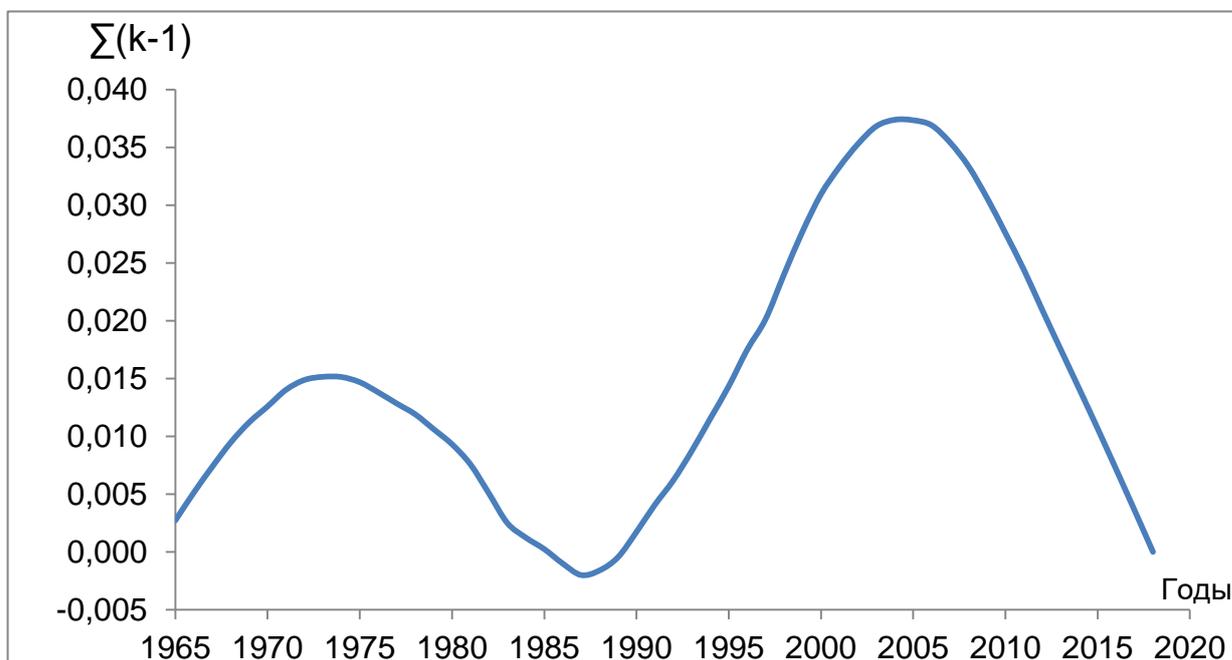


Рисунок 3.1.3. Интегральная разностная кривая уровня Торейских озер за период 1965-2018 гг.

3.2. Восстановление уровневого режима Торейских озер за продолжительный период по данным наземных измерений

Восстановление уровневого режима Торейских озер и определение основных расчетных гидрологических характеристик за продолжительный период проводилось с привлечением данных наблюдений пунктов-аналогов. Данный метод восстановления гидрометеорологических данных рекомендован нормативным документом СП-33-101-2003, разработанным Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) Росгидромета (СП-33-101-2003).

Для восстановления параметров уравнения водного баланса, атмосферных осадков, испарения и притока, рассмотрены данные метеорологических станций и гидрологических постов наземной наблюдательной сети Росгидромета, расположенные в близости от Торейских озер и соответствующие критериям выбора пунктов-аналогов.

Приведение гидрологического ряда данных рек Ульдза и Ималка к длительному периоду выполнено аналитическим методом, основанным на регрессионном анализе, с использованием пункта-аналога. В качестве пункта-аналога выбран гидрологический пост р. Шилка – г. Сретенск. Данный гидрологический пост функционирует с 1897 по настоящее время и имеет самый продолжительный ряд гидрологических наблюдений в Забайкальском крае. Кроме этого ряд наблюдений на р. Шилка удовлетворяет условиям выбора пункта-аналога, приведенным в СП-33-101-2003, а именно:

$$n \geq 6 - 10; \quad R \geq R_{кр}; \quad \frac{R}{\sigma_R} \geq A_{кр}; \quad \frac{k}{\sigma_k} \geq B_{кр}, \quad 3.2.1$$

где n – число совместных лет наблюдений в приводимом пункте и пунктах-аналогах; R – коэффициент парной корреляции между значениями стока исследуемых рек и значениями стока в пунктах-аналогах; k – коэффициент уравнения регрессии; σ_k – средняя квадратическая погрешность коэффициента регрессии; $R_{кр}$ – критическое значение коэффициента парной корреляции; $A_{кр}$ и $B_{кр}$ – критические значения отношений R/σ_R и k/σ_k соответственно.

Расчет расхода реки Ульдза проводился по выведенной формуле уравнения линейной регрессии, связывающей данные расходов гидрологических постов рек Ульдза–ст. Соловьевск и Шилка–г. Сретенск:

$$Q = -6,17 + 0,03 * Q_a, \quad 3.2.2$$

где Q_a – расход, измеренный на гидрологическом посту р. Шилка – г. Сретенск (пункт-аналог).

Аналогичным способом была выведена формула линейной регрессии для расчета расхода реки Ималка по данным гидрологических постов на реках Ималка–ст. Красная Ималка и Ульдза–ст. Соловьевск, которая имеет вид:

$$Q = 0,007 + 0,08 * Q_a, \quad 3.2.3$$

Для дальнейших расчетов уровенного режима Торейских озер данные о расходах рек Ималка и Ульдза были суммированы и преобразованы в приток. На

рисунке 3.2.1 приведен восстановленный продолжительный ряд данных о притоке Торейских озер за период с 1897 по 2018 гг.

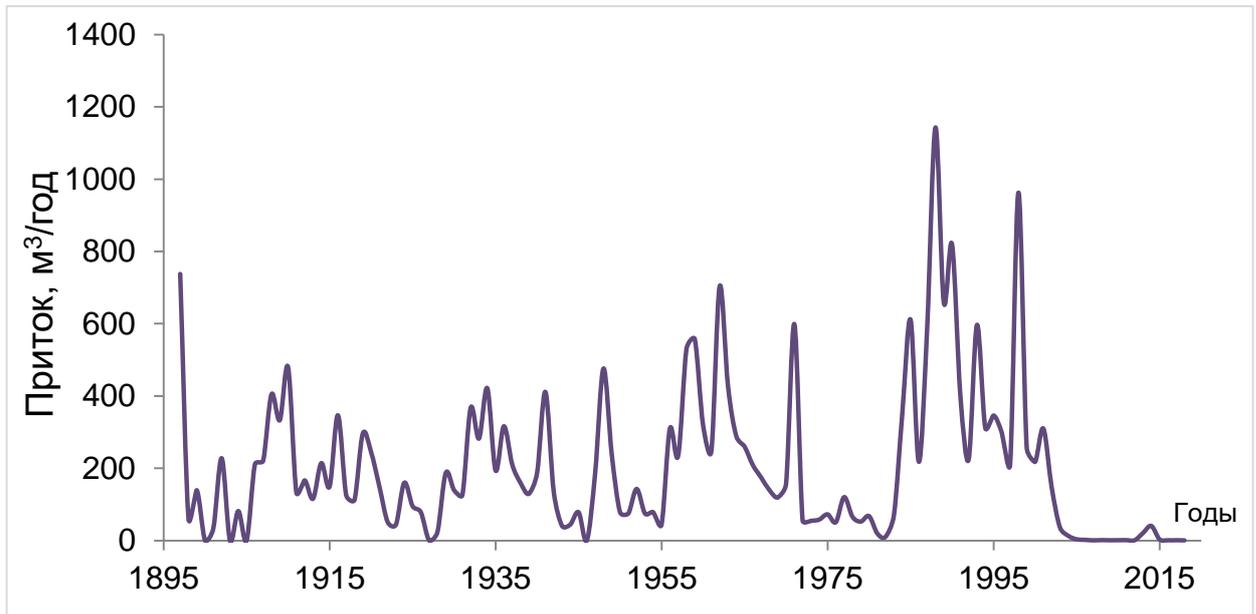


Рисунок 3.2.1. Восстановленное изменение суммарного притока рек Ульдза и Ималка за период с 1897 по 2018 гг.

С целью восстановления данных об атмосферных осадках проанализированы данные наблюдений следующих метеорологических станций (мст.): Борзя, Акша, Чита, Агинское, Оловянная, Кайластуй. В соответствии с матрицей парной корреляции (таблица 3.2.1) в качестве пункта-аналога могут быть приняты метеорологические станции Борзя и Оловянная. Однако мст. Борзя имеет более длительный период наблюдений – с 1902 по 2018 гг., что обусловило выбор данной метеорологической станции в качестве пункта-аналога и определение уравнения линейной регрессии по данному пункту:

$$P = 85,5 + 0,7 * P_a , \quad 3.2.4$$

где P_a – атмосферные осадки на метеорологической станции Борзя.

Для восстановления значений атмосферных осадков на метеостанции Соловьевск за период 1897-1902 гг. предварительно были восстановлены данные на всех используемых метеорологических станциях в последовательности, соответствующей матрице парной корреляции: мст. Акша, Агинское, Оловянная, Борзя. Вычислив уравнение линейной регрессии по данным метеорологической станции Чита, имеющей самый длительный период наблюдений, восстановлены

данные мст. Акша. Затем, по полученным данным, восстановлены значения атмосферных осадков на мст. Агинское, а по ним – на мст. Оловянная.

Таблица 3.2.1. Матрица парной корреляции значений атмосферных осадков

	Соловьевск	Борзя	Акша	Чита	Агинское	Оловянная	Кайластуй
Соловьевск	1						
Борзя	0,7	1					
Акша	0,5	0,4	1				
Чита	0,3	0,3	0,6	1			
Агинское	0,5	0,4	0,7	0,6	1		
Оловянная	0,7	0,6	0,6	0,4	0,7	1	
Кайластуй	0,5	0,5	0,4	0,1	0,5	0,6	1

Следующий этап расчета заключался в восстановление ежегодных значений атмосферных осадков на мст. Борзя. По уравнению линейной регрессии (формула 3.2.4) были получены ежегодные атмосферные осадки на мст. Соловьевск за период 1897-1902 гг. График изменения атмосферных осадков восстановленных за период 1897-2018 гг. приведен на рисунке 3.2.2.

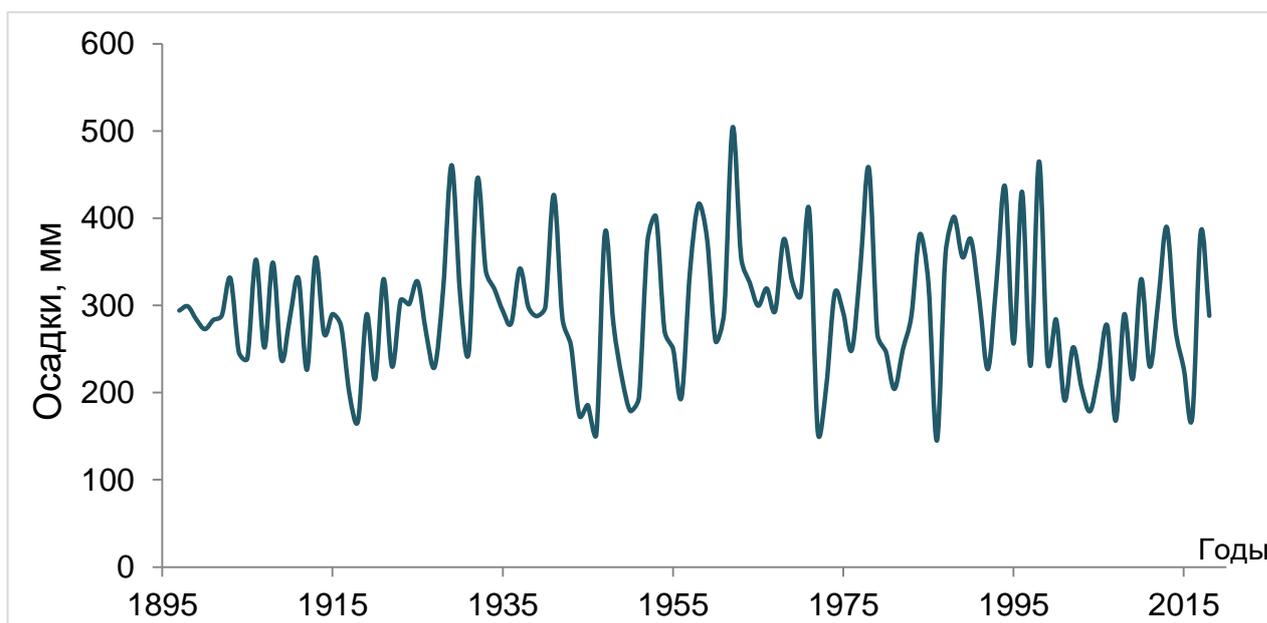


Рисунок 3.2.2. Восстановленное изменение атмосферных осадков на метеорологической станции Соловьевск за период с 1897 по 2018 гг.

Испарение с поверхности исследуемого водного объекта за период с 1897 по 2018 гг. восстановлено методом имитационного моделирования. Основой данного метода явились знания о циклических изменениях притока за

аналогичный период в виде интегральной разностной кривой (рисунок 3.2.3). В соответствии с циклами увлажненности выбирались данные об испарении из имеющегося ряда данных (рисунок 3.2.4).

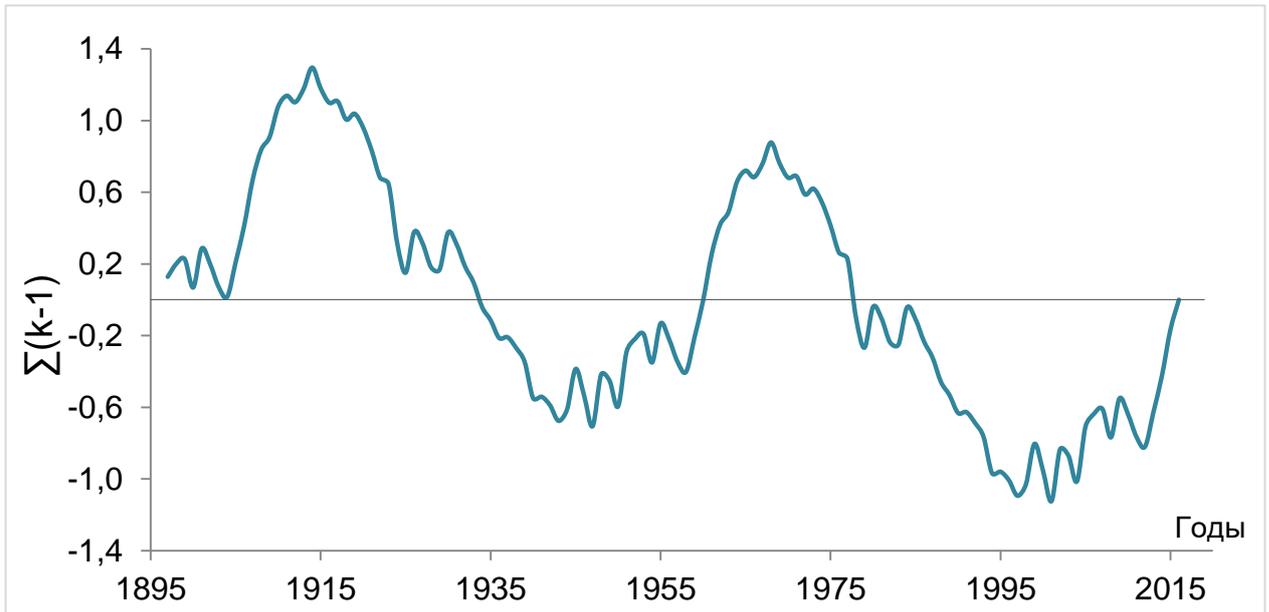


Рисунок 3.2.3. Интегральная разностная кривая суммарного расхода рек Ималка и Ульдза за период с 1897 по 2018 гг.

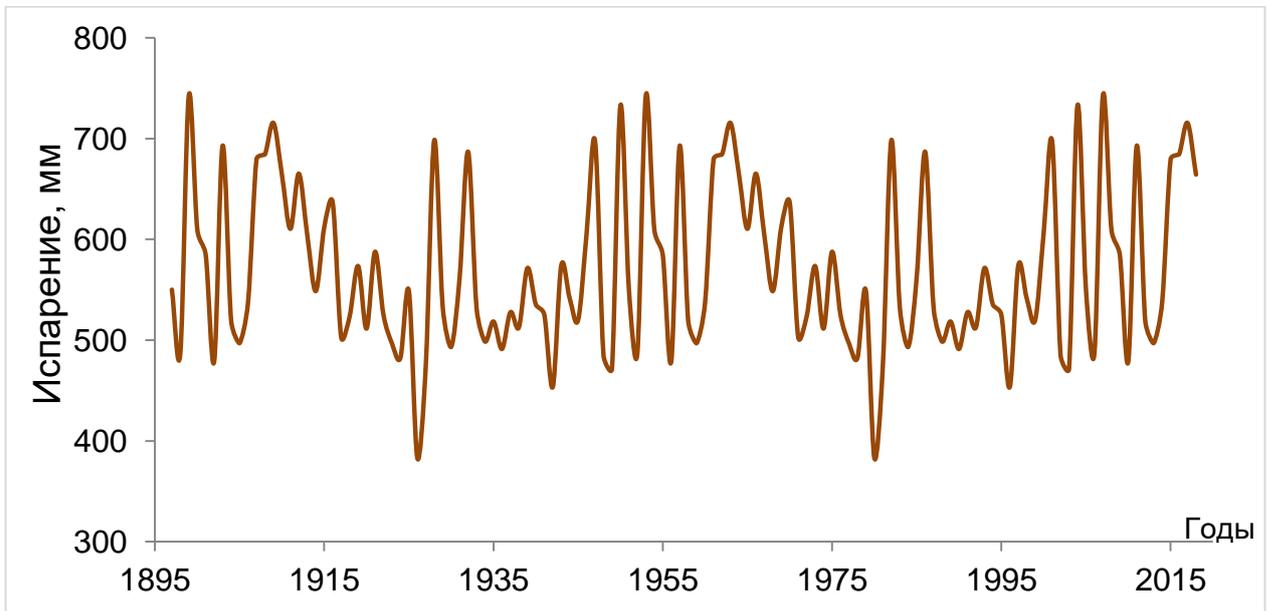


Рисунок 3.2.4. Изменение испарения на метеорологической станции Соловьёвск за период с 1897 по 2018 гг.

Восстановление уровней Торейских озер за период 1897-2018 гг.

Восстановленные параметры водного баланса Торейских озер (приток, осадки и испарение) за период с 1897 по 2018 гг. послужили исходными данными для определения уровня режима Торейских озер за данный период. Расчет

производился в созданной модели водного баланса Торейских озер с параметрами коррекции притока и осадков, выявленными при калибровке модели уровня Торейских озер за период с 1965 по 2018 гг. Графики восстановленного изменения уровня Торейских озер за период 1897-2018 гг. представлены на рисунках 3.2.5 и 3.2.6.

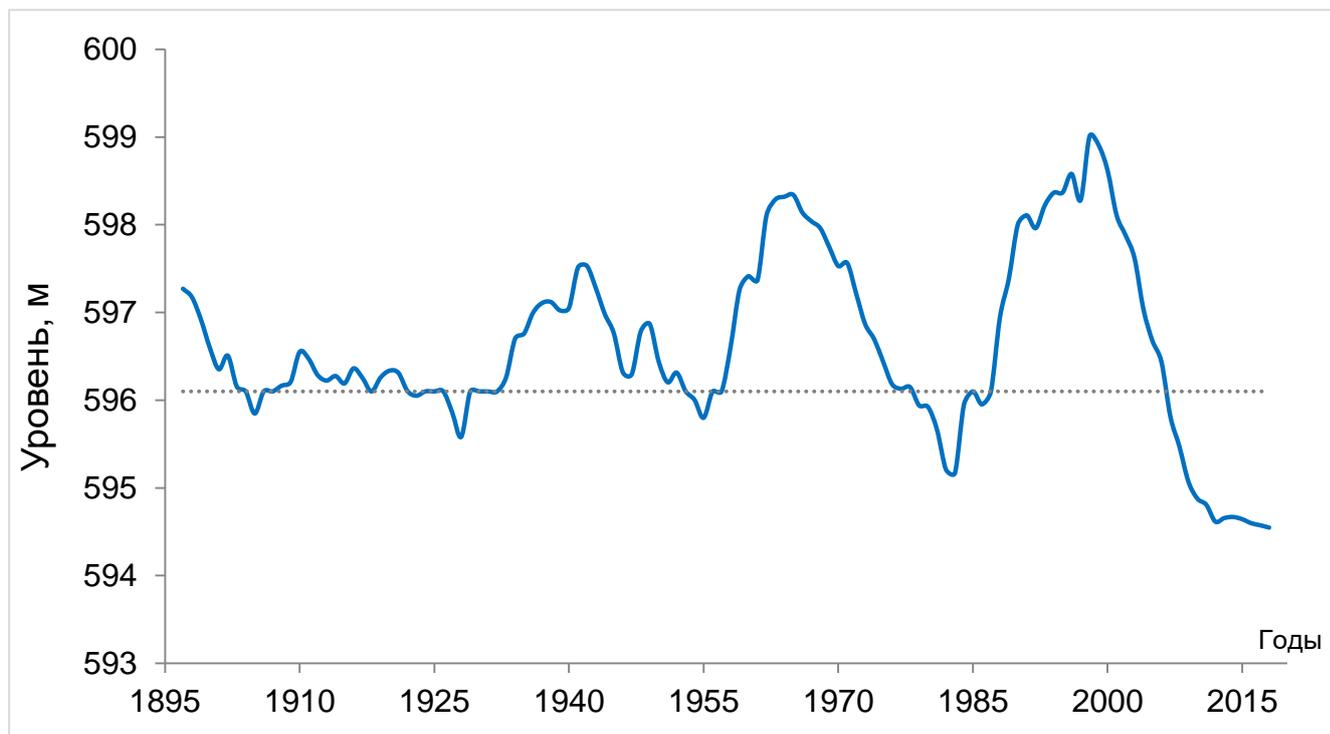


Рисунок 3.2.5. Многолетнее изменение уровня озера Барун-Торей за период с 1897 по 2018 гг.

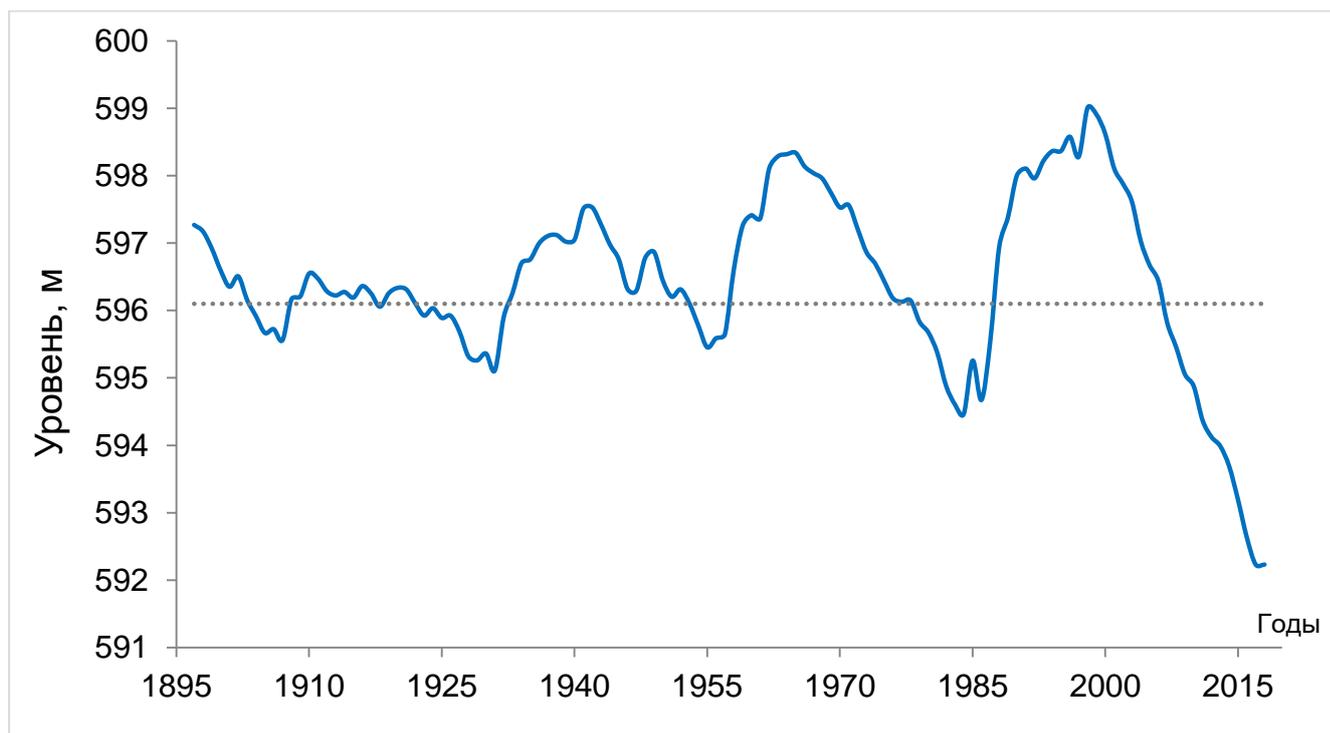


Рисунок 3.2.6. Многолетнее изменение уровня озера Зун-Торей за период с 1897 по 2018 гг.

В период 1897-2018 гг. в уровненом режиме Торейских озер отмечается цикличность. В многолетнем изменении уровня озер с 1897 по 1905 гг. (1907 г. – для оз. Зун-Торей) отмечается уменьшение уровня воды в Торейских озерах. Затем наблюдается подъем уровня с достижением максимальной отметки – 596,5 м в 1910 г. До 1928 г. (1931 г. – для оз. Зун-Торей), когда наблюдался пик следующей маловодной фазы, уровень озер колебался в пределах уровня протоки. Затем последовали 3 цикла водности Торейских озер, длительность которых в среднем составляет 30 лет. Максимальное наполнение озерной котловины отмечено в 1941 г. – 597,5 м, 1965 г. – 598,3 м, 1998 г. – 599,0 м.

Таким образом, восстановленный уровненый режим Торейских озер соответствует качественным описаниям данных водоемов, освещенных в отчетах экспедиций, проводимых исследователями-путешественниками в предыдущем столетии. Кроме этого, подтверждается более современными исследованиями. В работе (Обязов, 1996) Обязов В.А писал, что за последние 200-220 лет Торейские озера неоднократно высыхали и наполнялись с периодичностью 30 лет.

3.3. Анализ адекватности модели водного баланса Торейских озер на примере сокращения притока на заданную величину

С целью установления достоверности вычислений уровня Торейских озер с использованием созданной модели водного баланса был проведен анализ результатов расчета данной модели на примере сокращения притока в исследуемые водоемы на заданную величину. В настоящее время сокращение притока Торейских озер может быть вызвано изменениями климатических условий и увеличивающейся антропогенной нагрузкой. Для проверки достоверности вычислений, было заложено сокращение притока на 10 и 20 %.

Расчет уровня Торейских озер с учетом дополнительных изъятий проводился в созданной модели водного баланса за два периода – 1965-2018 гг. (Кашницкая, Болгов, 2021г) и 1897-2018 гг.

Результаты расчетов уровня воды Торейских озер с учетом испарения с поверхности 10 м^2 показывают снижение уровня в озере Барун-Торей в среднем на 0,10 м., в Зун-Торее на 0,15 м. Существенных изменений в циклах водности озер не происходит, однако озера высыхают на 1 год ранее. При сокращении притока на 10 % наблюдается снижение уровня воды в озере Барун-Торей на 0,3 м., в озере Зун-Торей на 0,4 м. При сокращении притока на 20 % отмечается снижение уровня в озерах: в Барун-Торей на 0,6 м., в Зун-Торей на 0,9 м. При этом сокращение притока на 10 и 20 % приводит к позднему наполнению озер после периода малой водности, в среднем на 1 год, и более быстрому высыханию озер, следующему после многоводной фазы, на 2 и 3 года, соответственно (рисунки 3.3.1. и 3.3.2) (Кашницкая, 2022).

Аналогичные исследования проведены для периода с 1897 по 2018 гг. При сокращении притока на величину испарения с поверхности площадью 10 м^2 уровень воды в озере Барун-Торей в среднем уменьшается на 0,1 м, в озере Зун-Торей – на 0,2 м. Результаты расчетов при сокращении поступающей воды в Торейские озера на 10 и 20 % показывают снижение уровня воды в озере Барун-Торей в среднем на 0,5 и 0,9 м, соответственно, в озере Зун-Торей – на 0,7 и 1,9 м, соответственно. Максимальное снижение уровня отмечается в период повышенной водности и составляет для озера Барун-Торей 1,0 и 1,8 м, для озера Зун-Торей – 1,8 и 3,5 м, соответственно. При сокращении притока на 10 % после маловодных периодов подъем уровня начинается с запаздыванием на 2-4 года, высыхание озер начинается на 2 года ранее. При сокращении притока на 20 % наблюдаются длительные периоды с низким уровнем воды, отмечается сокращение многоводной фазы цикла (рисунки 3.3.3 и 3.3.4).

В заключение отметим, что разработанная модель водного баланса Торейских озер позволяет адекватно производить расчет уровней исследуемых водоемов, в том числе с учетом влияний, оказываемых на бассейн Торейских озер, которые могут быть обусловлены антропогенной нагрузкой или климатическими изменениями.

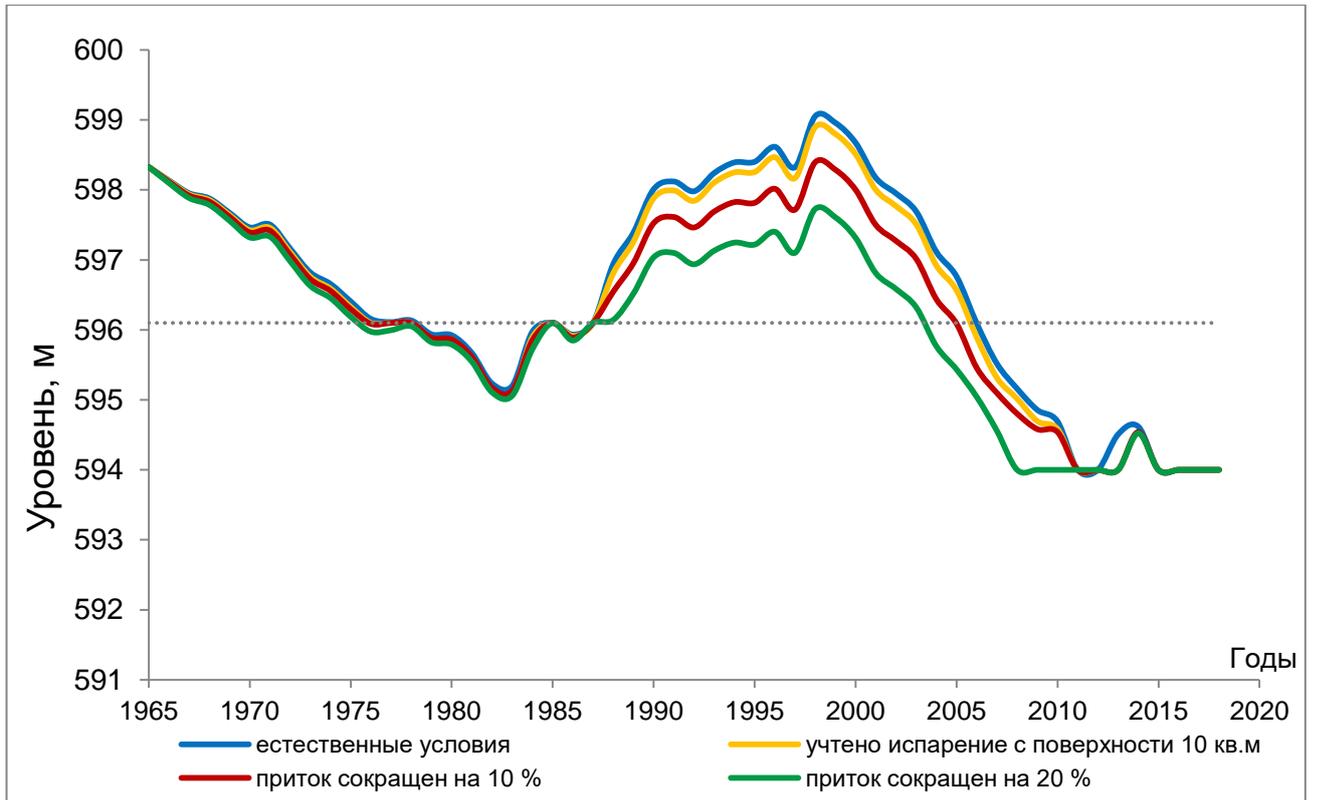


Рисунок 3.3.1. Многолетнее изменение уровня режима озера Барун-Торей за период 1965-2018 гг. с учетом сокращения притока на 10 и 20% и величины испарения с поверхности 10 кв.м

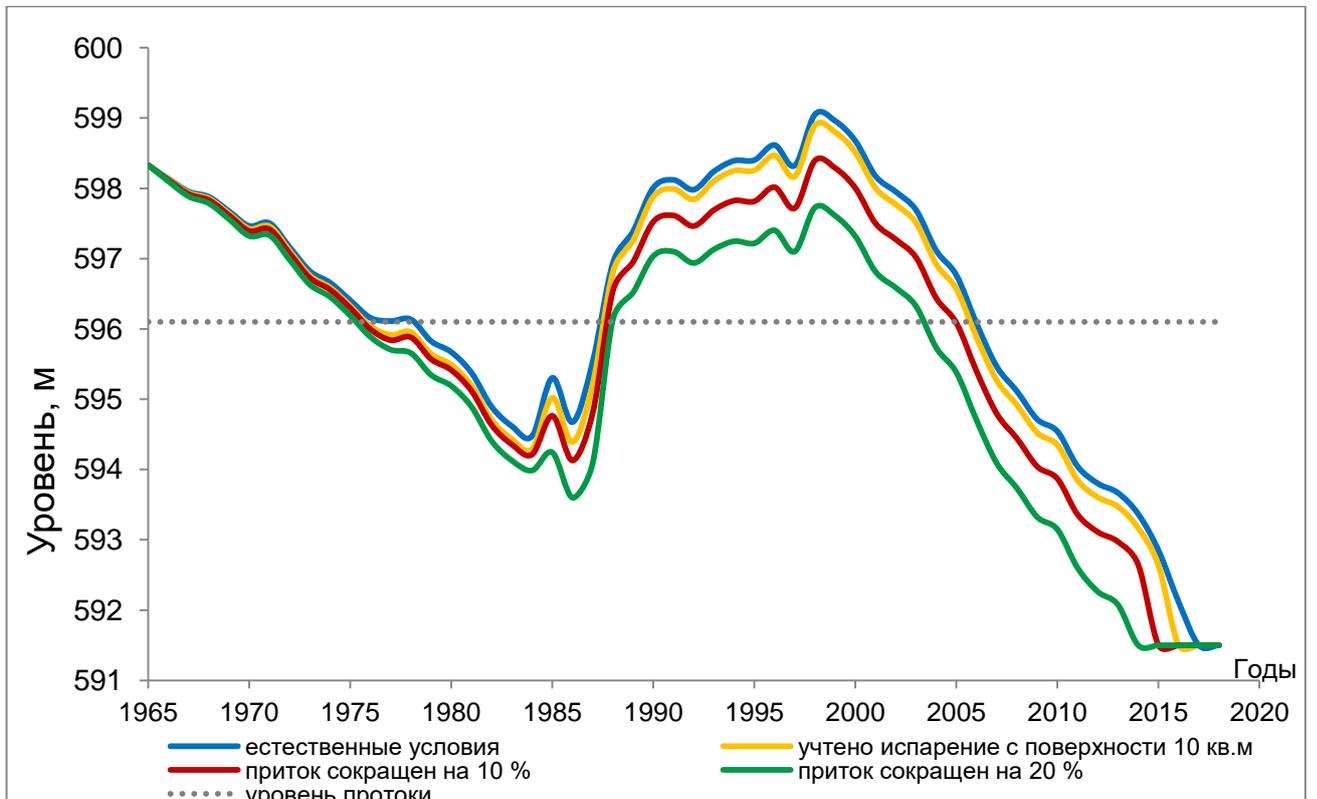


Рисунок 3.3.2. Многолетнее изменение уровня режима озера Зун-Торей за период 1965-2018 гг. с учетом сокращения притока на 10 и 20% и величины испарения с поверхности 10 кв.м

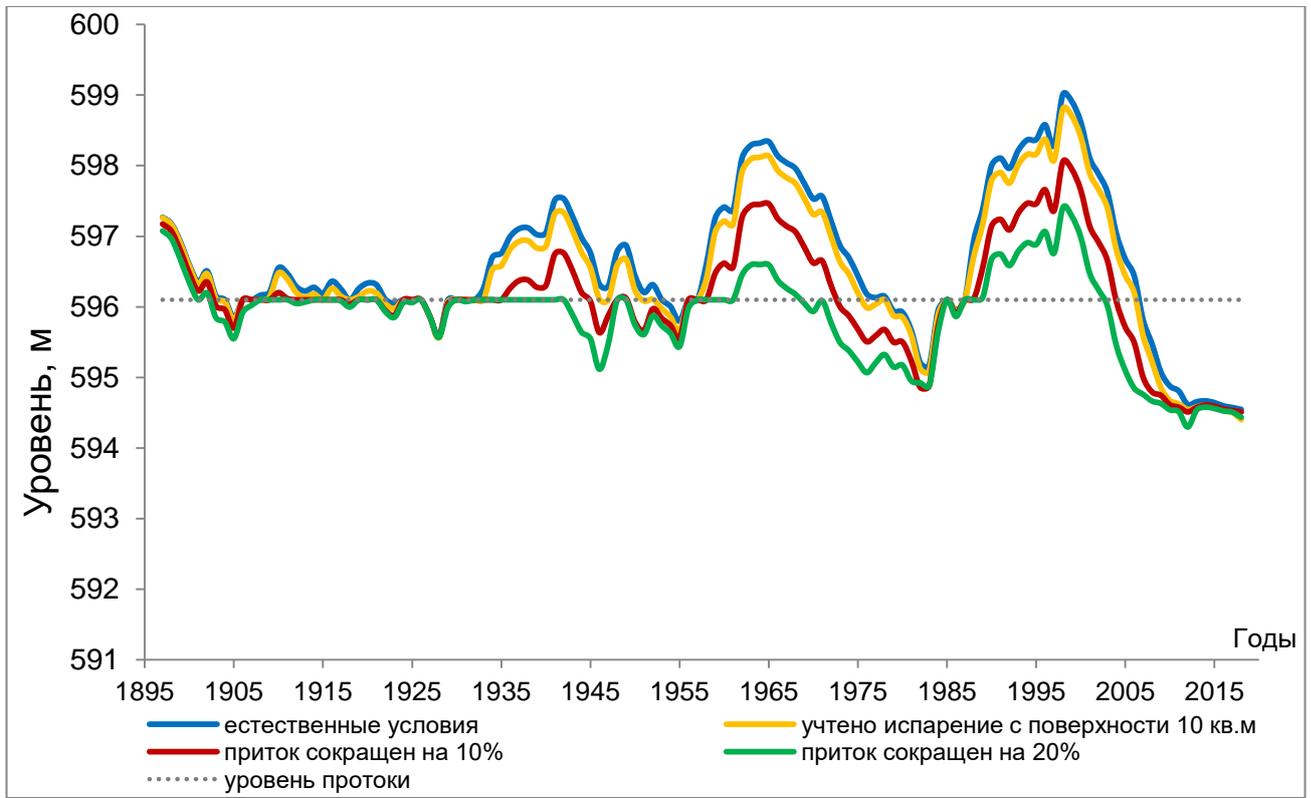


Рисунок 3.3.3. Многолетнее изменение уровня режима озера Барун-Торей за период 1897-2018 гг. с учетом сокращения притока на 10 и 20% и величины испарения с поверхности 10 кв.м

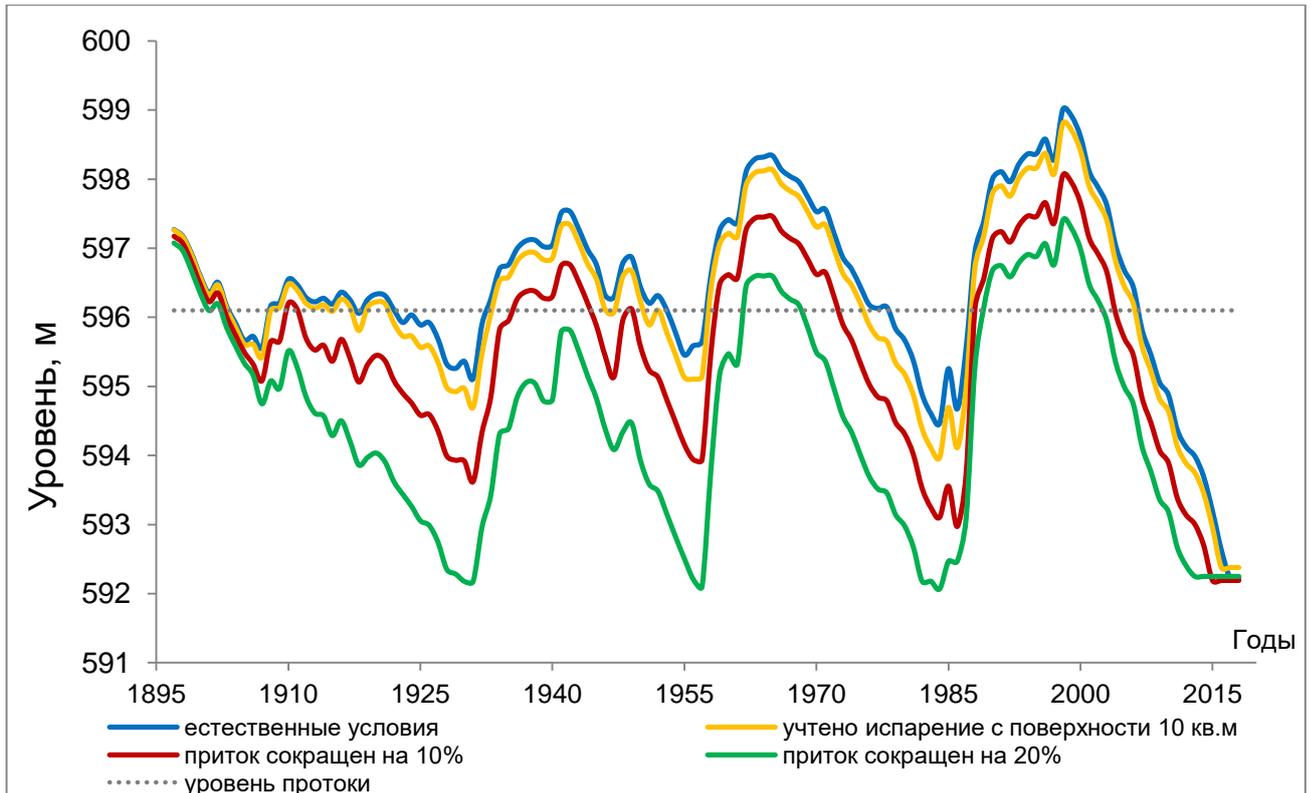


Рисунок 3.3.4. Многолетнее изменение уровня режима озера Зун-Торей за период 1897-2018 гг. с учетом сокращения притока на 10 и 20% и величины испарения с поверхности 10 кв.м

ГЛАВА 4. Гидрологический режим Торейских озер в естественных и нарушенных условиях

4.1. Моделирование составляющих уравнения водного баланса Торейских озер

В гидрологических исследованиях большое внимание уделяется вероятностному прогнозированию уровня замкнутых озер с циклическим характером изменения уровня режима. Например, одним из наиболее сложных объектов является Каспийское море, для которого вероятностный прогноз дан путем решения стохастического дифференциального уравнения водного баланса в аналитическом виде (Крицкий и др., 1975, Музылев и др., 1982). В последние десятилетия, вследствие сложности задачи прогноза и необходимости учета антропогенных воздействий, для вероятностного прогноза часто применялся метод имитационного моделирования (Болгов, 2005; Болгов и др., 2007). Вероятностный прогноз, полученный на основе имитационного моделирования, составлялся для озер Чаны (Болгов, Коробкина, 2012), которое иногда называют «пульсирующим», Ханка (Болгов, 2016), Далайнор (Болгов, Фролова, 2012).

Для построения имитационной модели функционирования водного объекта, являющегося к тому же составной частью водохозяйственной системы, необходимо получить искусственные временные ряды среднегодовых значений притока, осадков и испарения большой продолжительности. Для этих целей в отечественной гидрологии были разработаны различные по сложности методы. По причине того, что в бассейне Торейских озер значимая корреляционная связь между притоком, осадками и испарением с водной поверхностью отсутствует (таблица 4.1.1), то данные процессы допускается моделировать как независимые друг от друга последовательности, но со сложной структурой, требующей дополнительного обоснования.

Таблица 4.1.1. Матрица парных коэффициентов корреляции между параметрами водного баланса Торейских озер за период 1965-2018 гг.

	Осадки	Приток	Испарение
Осадки	1		
Приток	0,5	1	
Испарение	-0,4	-0,3	1

Имеющиеся данные о гидрологическом режиме Торейских озер (глава 2), показывают, что в период с 1998 по 2018 гг. уровень воды в озерах снижался, полное высыхание котловины озер наблюдалось в 2015-2017 гг. С помощью интегральной разностной кривой (рисунок 3.3) показано, что с 2000 г. в бассейне Торейских озер, в том числе на исследуемых водоемах, наблюдается маловодная фаза гидрологического цикла. При этом следует отметить, что в сравнении с предыдущей маловодной фазой (1973-1987 гг.) последняя фаза (2004 г. – настоящее время) характеризуется более длительным периодом с полным высыханием котловины двух озер – Барун-Торей и Зун-Торей. Начиная со второй половины 2020 г. по данным спутникового мониторинга было установлено увеличение водности данных озер.

В состав входных процессов, учитываемых в модели водохозяйственной системы Торейских озер, входят: приток речных вод к Торейским озерам, слой испарения с поверхности озер и слой осадков на его поверхность. Существенными являются также потери воды на фильтрацию как в устьевой области, так и при росте уровня и затоплении осушенных ранее территорий. Перечисленные элементы являются приходными и расходными составляющими уравнения водного баланса. Реакция озерной системы на их соотношение проявляется в изменении уровня Торейских озер, учитывающем так же переток воды из озера Барун-Торей в озеро Зун-Торей в зависимости от уровня воды в первом водоеме.

Для моделирования искусственных рядов осадков, испарения и притока продолжительностью 10000 лет использовались данные за период 1965-2018 гг., приведенные ранее в главе 1 (рисунки 1.3.3, 1.3.4, 1.3.5). На их

основе были получены параметры распределения основных гидрометеорологических характеристик, приведенные в таблице 4.1.2.

Таблица 4.1.2. Параметры распределения вероятностей основных гидрологических характеристик за период с 1965 по 2018 гг. в бассейне Торейских озер

Гидрологическая характеристика	Параметры распределения			
	Среднее	C_v	C_s	$r(1)$
Приток к Торейским озерам	$186,4 \cdot 10^6 \text{ м}^3$	1,39	2,02	0,60
Осадки на поверхность озер	291,7 мм	0,27	0,27	0,01
Испарение с поверхности озер	573,6 мм	0,17	1,13	0,25

В результате анализа параметров распределения вероятностей основных гидрологических характеристик Торейских озер принято решение моделировать искусственные ряды осадков и испарения с помощью цепи Маркова первого порядка, а для моделирования притока использовать более сложную схему.

Статистический анализ рядов исходной информации показал, что ряд суммарного годового притока рек Ульдза и Ималка характеризуются значительной линейной зависимостью. Первый коэффициент автокорреляции рядов годового стока рек Ульдза и Ималка составляет 0,6, что существенно больше, чем в среднем по территории РФ. Оценка автокорреляционной функции указывает на существенные отклонения механизма колебаний притока от традиционно принимаемой в гидрологических расчетах Марковской модели этого процесса, на наличие циклических колебаний во временном ходе годового стока. При этом оценка коэффициента автокорреляции по всему ряду не дает представлений о причинах цикличности. Следовательно, характер формирования цикличности уровня режима Торейских озер более сложен, чем простая линейная авторегрессия элементов водного баланса. Вероятно, саморегулирующая функция исследуемого водосбора проявляется по-разному в маловодные и многоводные периоды. Поэтому моделирование годовых значений притока к Торейским озерам выполнялось в несколько этапов, описанных ниже.

Вначале в имеющемся ряду годовых значений притока к Торейским озерам выделялись многоводные и маловодные фазы водности (рисунок 4.1.1). Установлено, что в период с 1965 по 2018 гг. в ряде данных суммарного годового стока рек Ульдза и Ималка многоводная фаза длилась с 1984 по 1999 гг. и составила 16 лет, а маловодная фаза в имеющемся ряде данных наблюдалась дважды – в период с 1965 по 1983 гг. и с 2000 по 2018 гг. и продолжалась по 19 лет.

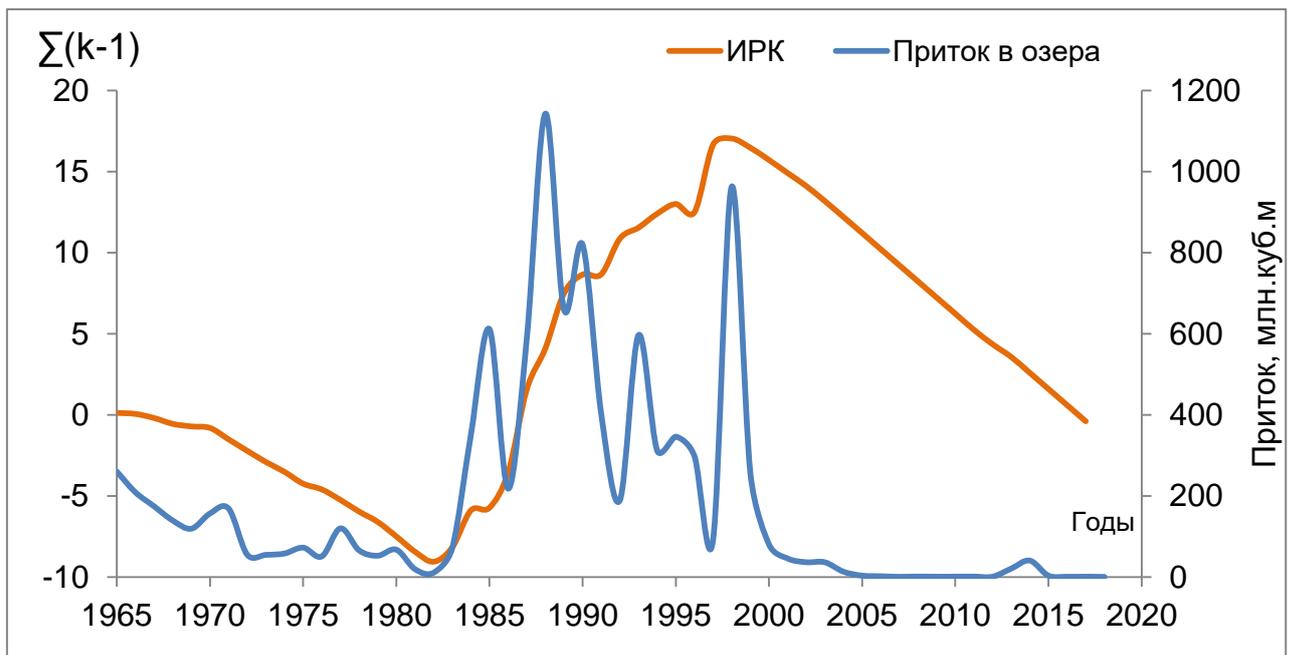


Рисунок 4.1.1. Графики изменения притока Торейских озер и интегральной разностной кривой (ИРК) за период 1965-2018 гг.

Затем определялись параметры распределения вероятностей величин годового стока за разные фазы водности (таблица 4.1.3), и осуществлялось моделирование двух искусственных последовательностей годовых значений притока с параметрами, характерными для разных фаз водности с помощью Марковской цепи первого порядка.

Образование комбинированного ряда длиной 10000 лет осуществлялось путем комбинации двух последовательностей, смоделированных на предыдущем шаге отдельно для многоводных и маловодных лет. Для этой цели последовательно, из обоих рядов данных, выбирались отрезки длиной 16 и 19 лет для многоводной и маловодной фаз

соответственно. Полученные отрезки образуют временной ряд, в котором будет наблюдаться смена фаз водности в соответствии с заданными параметрами (продолжительность фаз водности и параметры распределений стока за каждую фазу).

Таблица 4.1.3. Параметры распределения вероятностей рядов годового притока Торейских озер за разные фазы цикла водности

Приток Торейских озер	Параметры распределения				
	N, лет	Среднее, м ³	Cv	Cs/Cv	r(1)
Весь ряд данных	54	186,4*10 ⁶	1,39	1,45	0,60
Многоводный период	16	490,0*10 ⁶	0,60	1,1	0,00
Маловодный период	38	58,4*10 ⁶	1,13	1,1	0,85

Полученные таким образом смоделированные ряды осадков, испарения и комбинированный ряд данных притока были поданы на вход водобалансовой модели и осуществлен расчет уровня режима Торейских озер за период в 10000 лет. В качестве примера на рисунке 4.1.2 показаны приведенные смоделированные уровни за первые 122 года и восстановленные за период 1897-2018 гг. В таблице 4.1.4 приведены параметры распределения вероятностей восстановленных за периоды в 54 года (1965-2018), 122 года (1897-2018) и смоделированных за 10000 лет рядов уровней озера Барун-Торей. Из рисунка и таблицы видна хорошая согласованность смоделированных и восстановленных рядов данных.

На основе полученных уровней Торейских озер с помощью метода ранжированного ряда по формуле С.Н. Крицкого – М.Ф. Менкеля (Вейбулла) (Сикан, 2020) были построены вероятностные кривые обеспеченности (рисунки 4.1.3 и 4.1.4). Анализ кривых показывает, что предложенная имитационная модель хорошо воспроизводит распределение уровней воды в диапазоне, охваченном наблюдениями. Хорошее качество модели позволяет использовать ее для различных гидрологических расчетов, а также выполнения исследований по оценке антропогенного влияния на составляющие водного баланса озер.

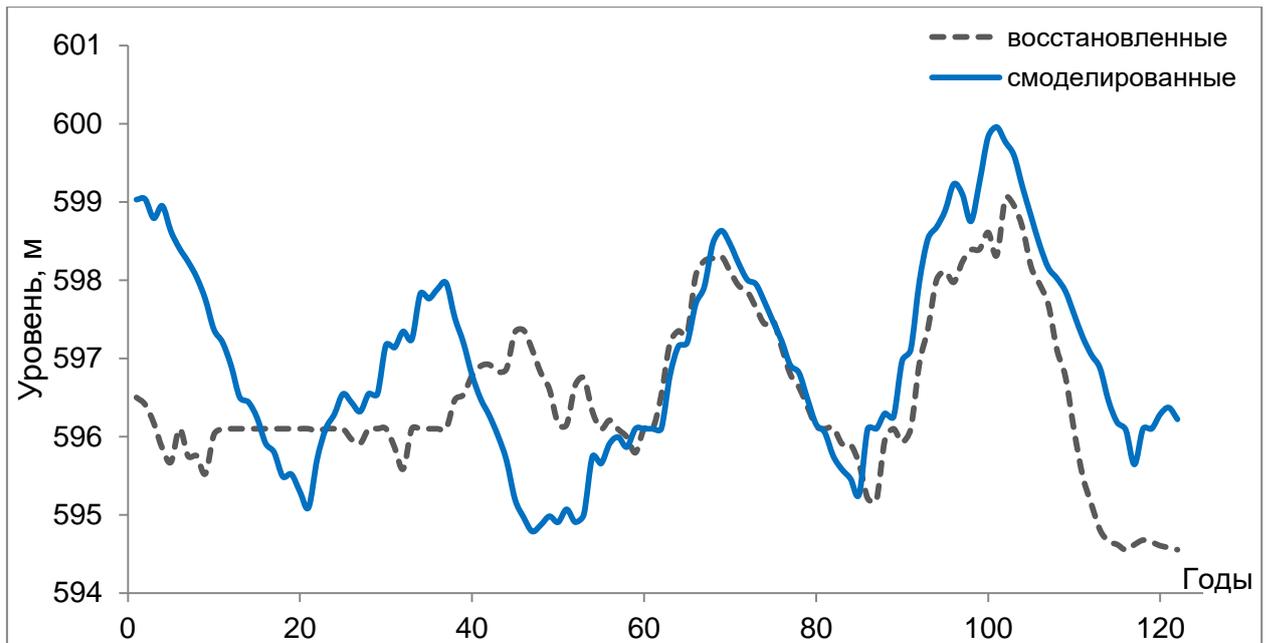


Рисунок 4.1.2. Графики уровня режима озера Барун-Торей, полученные с помощью модели водного баланса на основе данных, восстановленных за 122 года и смоделированных за 1000 лет.

Таблица 4.1.4. Параметры распределения уровней озера Барун-Торей, полученные с помощью модели на основе составляющих водного баланса, рассчитанных за 54 года, восстановленных за 122 года и смоделированных за 10000 лет.

Период	Параметры распределения				
	Среднее, м	СКО	C_v	C_s	$r(1)$
54 года	596,6	1,5	0,003	-0,3	0,97
122 года	596,5	1,1	0,002	0,1	0,96
10 000 лет	596,6	1,2	0,002	0,3	0,96

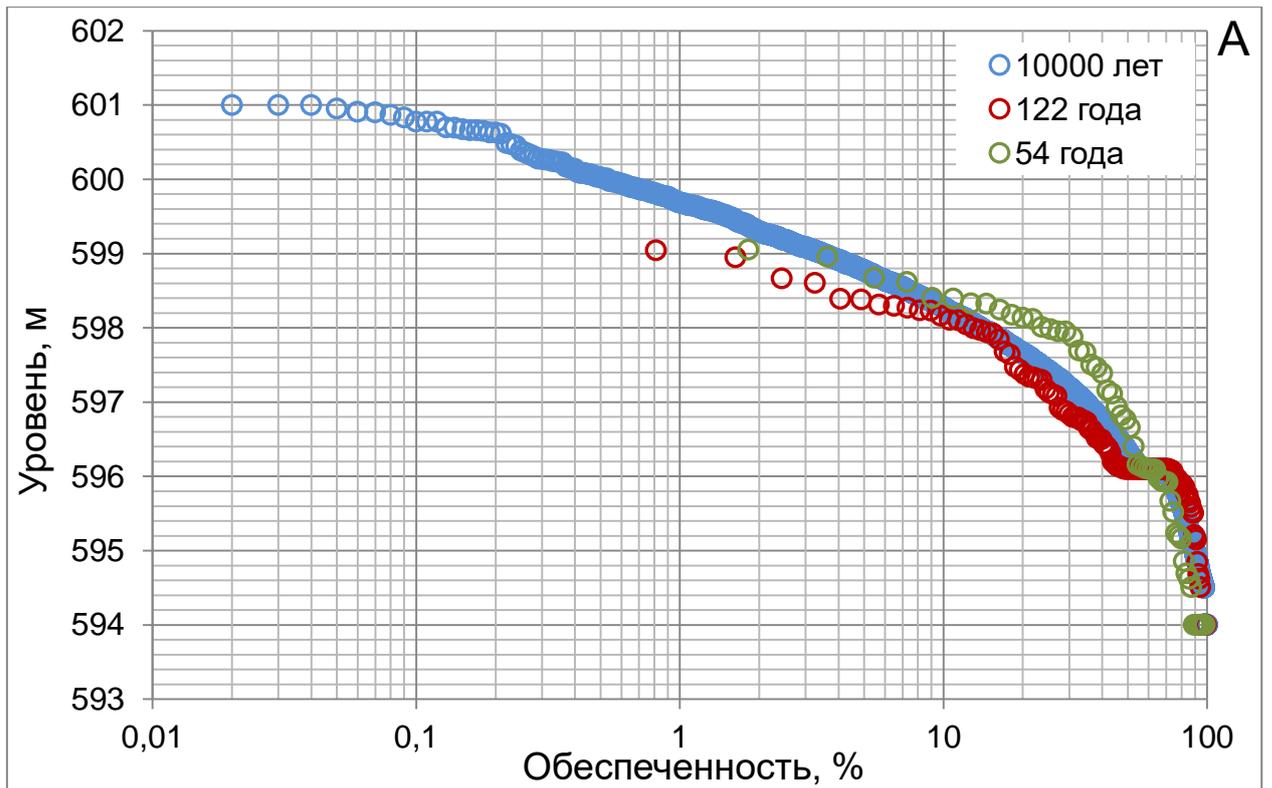


Рисунок 4.1.3. Совмещенные кривые обеспеченности по наблюдаемым, восстановленным и смоделированным данным уровней озера Барун-Торей

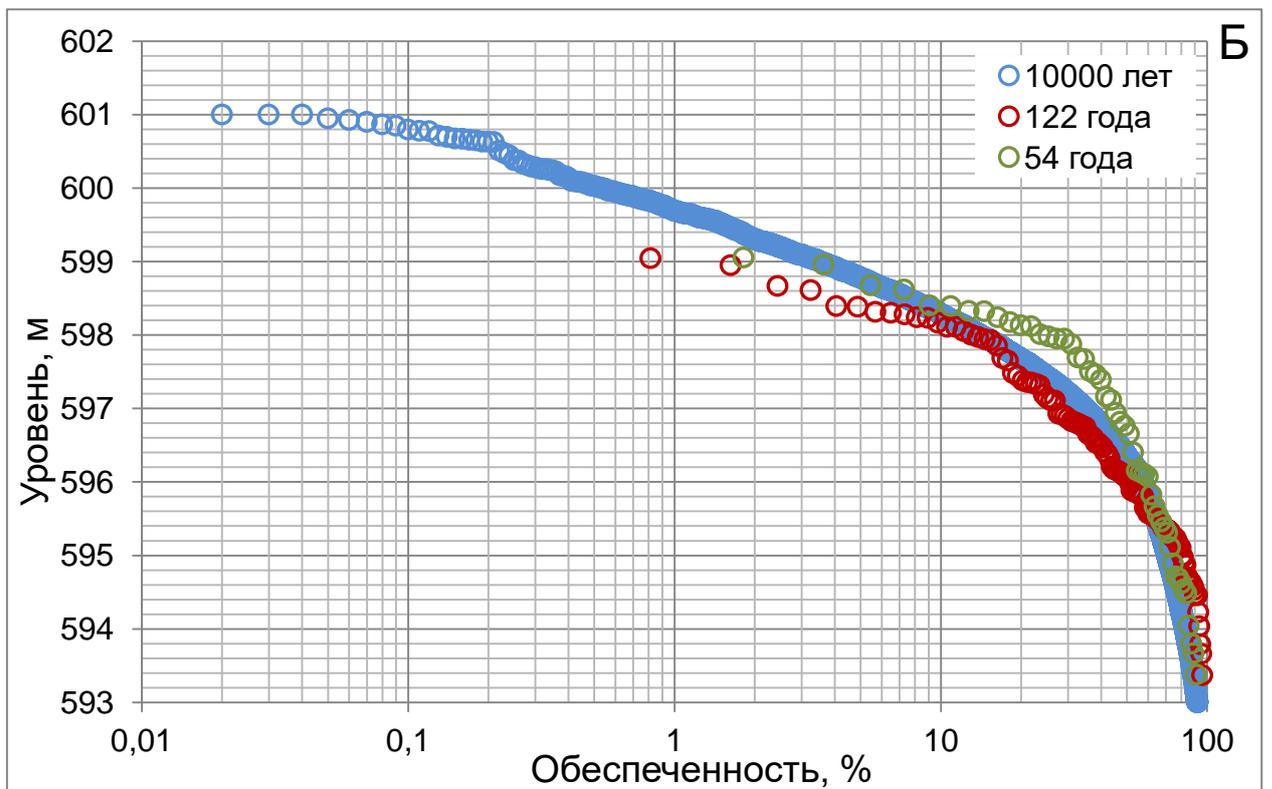


Рисунок 4.1.4. Совмещенные кривые обеспеченности по наблюдаемым, восстановленным и смоделированным данным уровней озера Зун-Торей

4.2. Антропогенная нагрузка на водные ресурсы бассейна Торейских озер.

Антропогенное воздействие на трансграничные водные объекты без тесного международного сотрудничества часто приводят к экологическим проблемам в сопредельных регионах. Например, гидротехническое строительство, промышленное и сельскохозяйственное развитие в бассейне реки Амур повлекло за собой изменение гидрологического режима данной реки, ее притоков, а также озера Ханка, а впоследствии к экологическим проблемам (Бакланов и др., 2019; Махинов, 2020; Махинов и др., 2018; Соколова, 2022; Кондратьева и др., 2017, Румянцев и др., 2021). Поэтому очень важно достичь международного соглашения на этапе планирования антропогенных воздействий на водные объекты.

В июле 2020 г., в результате анализа спутниковых изображений Земли, на территории МНР обнаружено гидротехническое сооружения на реке Ульдза в 15 км от н.п. Наранбулаг в начальной стадии строительства. Возведение этого сооружения началось без согласования с российской стороной. По предварительным оценкам функционирование сооружения может вызвать существенное изменение составляющих гидрологического цикла реки, а, следовательно, и Торейских озер, что может привести к потере статуса Торейских озер как объекта Всемирного наследия (Кашницкая, Болгов, 2021б).

По информации, находящейся в открытом доступе, известно, что строительство гидротехнического сооружения на реке Ульдза ведется в рамках реализации проекта «План управления бассейном реки Ульдза-Гол», в результате которого планируется создание водохранилищ в бассейне реки, регулирующих ее сток. Данный проект является составной частью монгольской программы «Синий конь» («Хух морь»). Программа предусматривает перераспределение стока наиболее полноводных северомонгольских рек, трансграничных с Россией, на засушливый юг и юго-восток МНР (регион Гоби). Кроме того, предусмотрена их стыковка с водными

ресурсами Автономной Внутренней Монголии – сопредельного с МНР обширного региона Китая. В ходе реализации программы планируется создание каналов длиной в 400-650 км, отводящих воду от монгольских рек Южнобайкальского и Амурского бассейнов в южное и юго-восточное монгольско-китайское приграничье (На российско-монгольской границе..., 2021). На официальном сайте о государственных закупках, в техническом задании и в проектной документации, размещенной к тендеру, заявлены следующие характеристики возводимого водохранилища на реке Ульдза: высота – 12 м, длина около 700 м, объем 27 млн. м³, площадь до 10 км², функция – экологическое восстановление реки путем стабилизации стока (Улз голын урсцыг..., 2021).

Целью проекта является обеспечение сельскохозяйственного водоснабжения и орошения сельскохозяйственных угодий. Кроме этого, создание водохранилища будет сопровождаться изъятием воды из стока р. Ульдза, необходимым для его заполнения в начальный период, а также испарением с его водной поверхности.

Как уже неоднократно отмечалось, климатические условия региона характеризуются наличием продолжительных циклов в увлажнении территории и в изменении уровней воды в озерах (глава 1), поэтому искусственное регулирование стока р. Ульдза может негативно повлиять на экосистему, в том числе Торейских озер. Этот вывод связан с тем фактом, что биологическая продуктивность озер, расположенных в засушливых регионах с циклическим характером изменения гидрологического режима, оказывается большей в сравнении с озерами со стабильным уровнем воды.

Нарушение естественных гидрологических циклов водности реки и озер приведет к увеличению продолжительности маловодных периодов и сокращению многоводных, к более низким отметкам уровня воды в Торейских озерах, и соответственно, к неблагоприятным экологическим последствиям. В материалах (Симонов, Кирилук, 2021) упоминаются следующие общие последствия создания плотин: затруднение миграции

водных организмов и реколонизация пересыхающих водоемов; сокращение стока наносов, изменение режимов накопления и выветривания солей (изменение продуктивности водоемов), а также вторичные локальные, региональные и континентальные экологические и водохозяйственные последствия (например, изменение миграционных потоков и мест гнездования птиц с волнообразным сокращением их численности).

Оценка последствий реализации комплекса водохозяйственных мероприятий в бассейне реки Ульдза на гидрологический режим Торейских озёр дана в виде вероятностного прогноза посредством построения кривых обеспеченностей уровней при возникновении дополнительных потерь воды в виде безвозвратных изъятий стока.

В качестве исходной водохозяйственной информации использованы сведения из российских и иностранных открытых информационных источников, а также статьи в научных изданиях (Кирилюк и др., 2021; На российско-монгольской границе..., 2021; Улз голын урсцыг..., 2021). Для модельных расчетов рассмотрены два сценария (варианта) изменения водохозяйственной обстановки в бассейне Торейских озёр. В предлагаемых сценариях учтен важнейший элемент водохозяйственной системы, включающий замкнутые озера, – безвозвратные потери воды. Сценарии развития водохозяйственной системы в нашем случае соответствуют сценариям роста безвозвратного водопотребления в бассейне.

Антропогенная нагрузка при реализации проекта по строительству водохранилища на реке Ульдза увеличится, в том числе и на Торейские озера. Вследствие отсутствия в открытых источниках, данных о дополнительных изъятиях из реки Ульдза данная оценка проведена косвенно на основе информации Монгольского статистического управления (Национальное статистическое управление..., 2021), научных трудов (Кирилюк и др., 2021, Симонов, 2021) и нормативных документов (ГОСТ Р 58331.3-2019; Укрупненные нормы водопотребности для орошения ..., 1984; Нормы расходов воды..., 1997).

4.2.1 Определение водопотребности участников проектируемого водохозяйственного комплекса

Располагаемые водные ресурсы. Определение объема располагаемых водных ресурсов реки Ульдза выполнено по формуле:

$$W_p = Q_i \times t \times k, \quad 4.2.1.1$$

где Q_i – расход воды за рассматриваемый период, м³/с; t – число секунд за период; k – коэффициент, учитывающий потери воды на испарение и фильтрацию, $k = 0,95-0,97$

Водопотребность для орошения сельскохозяйственных полей.

Известно, что ниже по течению реки Ульдза от проектируемого водохранилища построена ирригационная система площадью около 2100 га (Кирилюк и др., 2021). Определение объема водопотребности на орошение данной ирригационной системы выполнено по формуле 4.2.1.2 с использованием укрупненных норм водопотребности для орошения (ГОСТ Р 58331.3-2019, Укрупненные нормы водопотребности для орошения ..., 1984):

$$W_{op} = q_{op} \times F, \quad 4.2.1.2$$

где q_{op} – норма водопотребности на орошение, рассчитанная по природно-климатическим зонам и культурам; F – орошаемая площадь поля.

В справочнике (Укрупненные нормы водопотребности, 1984) приведены средневзвешенные нормы водопотребности для различных сельскохозяйственных культур: овощи, зерновые, картофель, силосные и многолетние травы. В силу того, что на данный момент нет информации о культурах, выращиваемых на орошаемых сельскохозяйственных полях, в качестве нормы было принято осредненное значение по всем культурам за оросительный сезон – 1630 м³/га.

Потребность в воде для нужд животноводства. Несмотря на стихийные бедствия, наблюдаемые в скотоводческих регионах Монголии в 2000-2001 и 2009-2010 гг., обусловленные неспособностью домашнего скота найти корм под снежным покровом, отмечается рост поголовья скота

(Гомбожапов, 2011). Справедливо это и для сомонов (районов), где находится бассейн реки Ульдза – Баяндун, Дашбалбар Чулуунхороот аймака Дорнод (рисунок 4.2.1.1). На рисунке 4.2.1.2 приведена статистическая численность поголовья скота для данных сомонов. Выявлено, что в последнее десятилетие численность поголовья скота в перечисленных сомонах увеличилась в среднем на 134%.

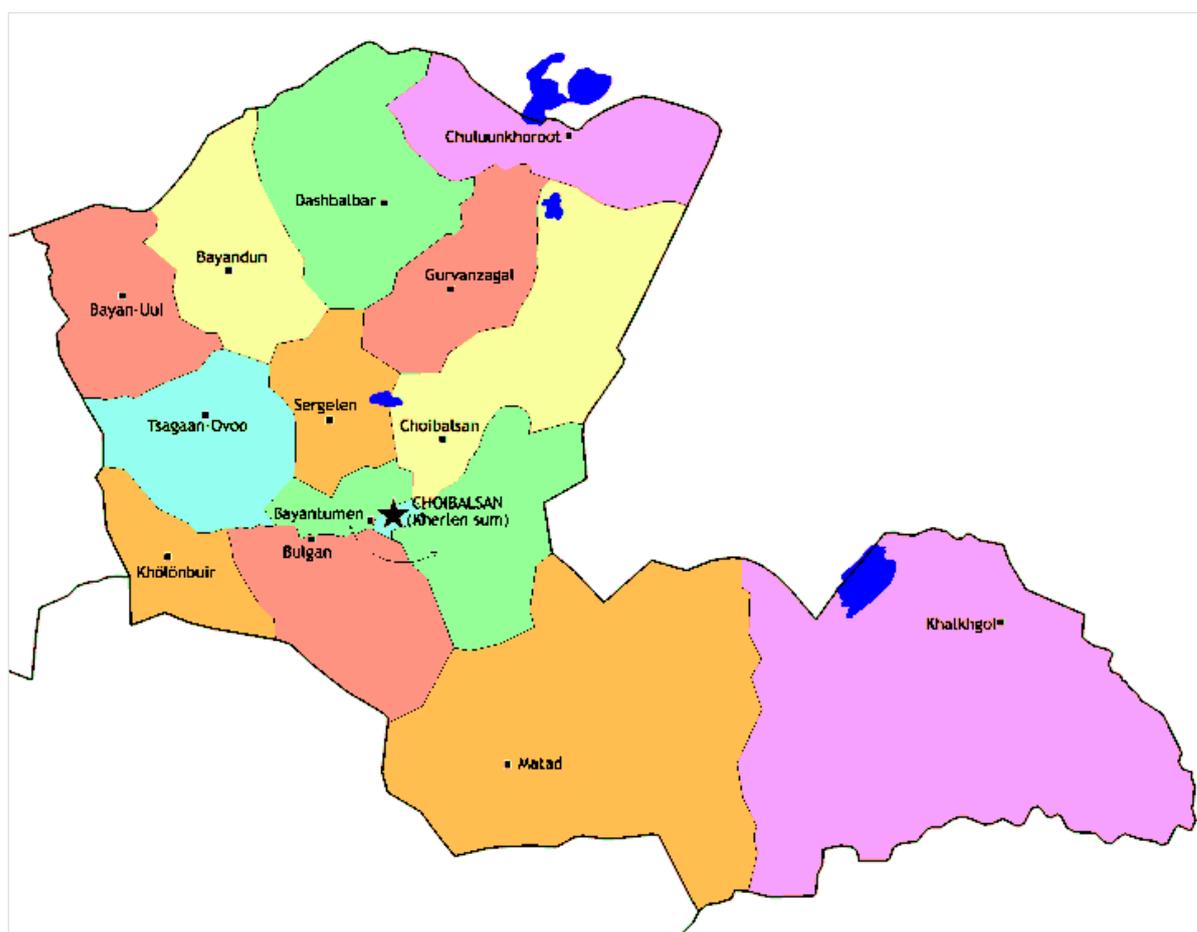


Рисунок 4.2.1.1. Административное деление аймака Дорнод на сомоны (Дорнод, 2021)

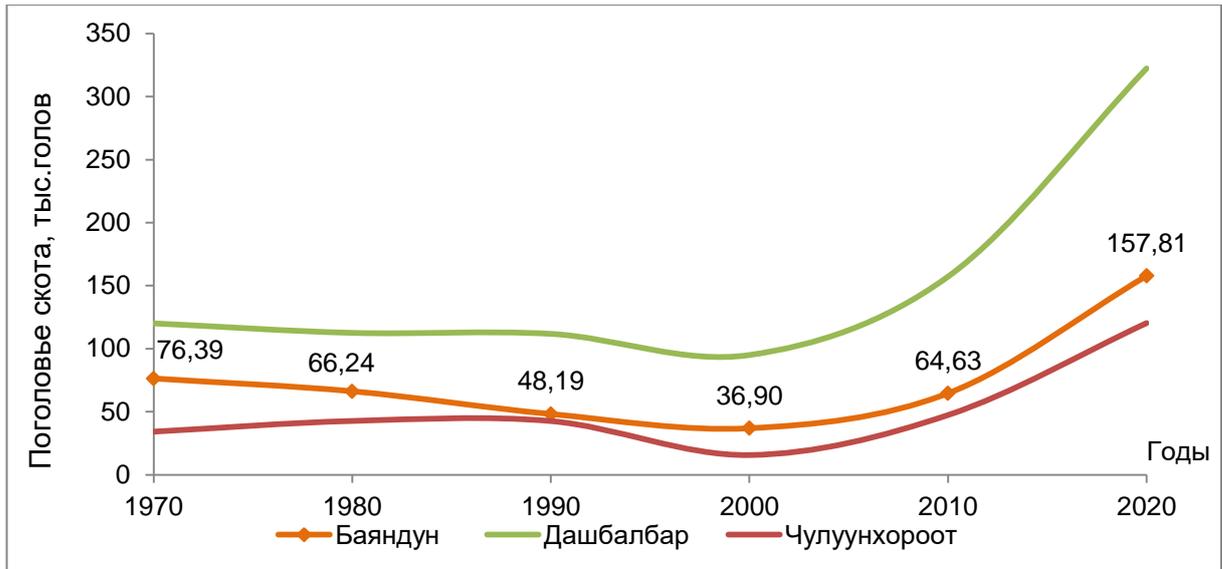


Рисунок 4.2.1.2. Динамика численности поголовья скота в районах (сомонах) Баяндун, Дашбалбар и Чулуунхороот Монголии

В сомоне Баяндун, где наблюдается строительство дамбы на реке Ульдза, это значение увеличилась на 144%. При этом, структура стада в процентном соотношении изменилась незначительно (рисунок 4.2.1.3). На 2020 год общая численность скота составила 157,8 тыс. голов. Численность крупного рогатого скота (КРС) составляла 26,7 тыс. голов; лошадей – 19,0; верблюдов – 0,3; овец – 64; коз – 47,9. В результате строительства водохранилища планируется изымать воду для жизнеобеспечения крупного рогатого скота.

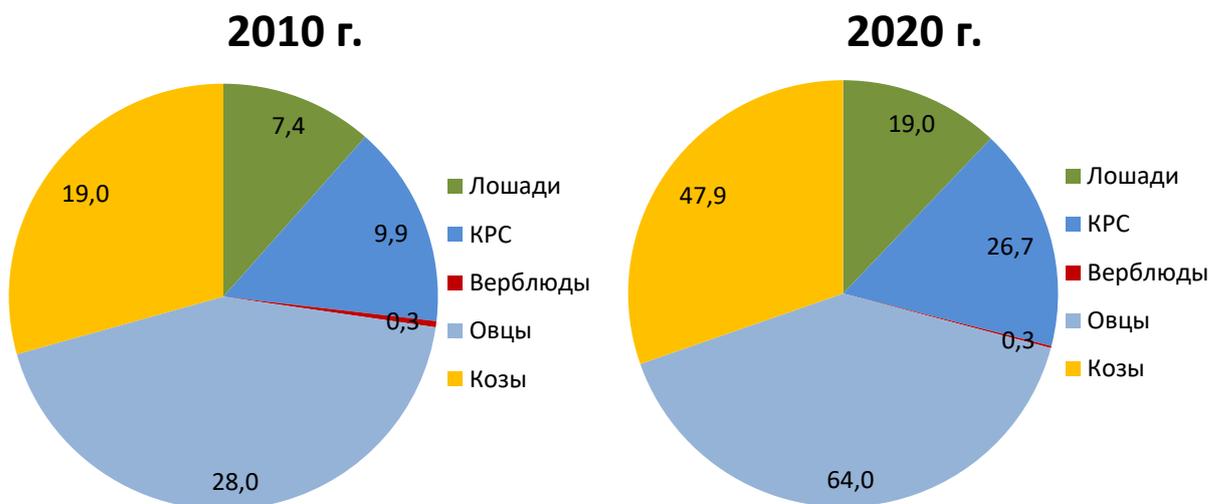


Рисунок 4.2.1.3. Структура стада в районе (сомоне) Баяндун Монгольской Народной Республики

Нормы расхода воды на поение крупного рогатого скота приняты по данным ВНТП-Н-97 (Нормы расходов воды..., 1997). Среднесуточная норма расхода воды в расчете на одну корову приведена отдельно для лактирующих, сухостойных и среднегодовых молочных коров и зависит от уровня молочной продукции. В настоящем исследовании приняты осредненные значения – 51,3 л/сут.

Определение водопотребности для сельскохозяйственного животноводства выполнено по формуле:

$$W_{\text{ж}} = q_{\text{ж}} \times N, \quad 4.2.1.3$$

где $q_{\text{ор}}$ – норма расхода воды на поение крупного рогатого скота;

N – количество голов крупного рогатого скота.

Экологический сток. Санитарные попуски – это искусственные периодические или эпизодические сбросы воды из водохранилища, увеличивающие расход воды в русле реки на непродолжительный период. Попуски производят для удовлетворения нужд водопользователей и водопотребителей – орошения, рыболовства, судоходства и т.д. Несвоевременные санитарные попуски воды из водохранилищ могут понести серьёзные экономические последствия. Обычно в правилах эксплуатации водохранилищ предусмотрены режимы и назначения, объемы и другие параметры попусков. Для проектируемого водохранилища предусмотрены санитарные попуски величиной 0,018 км³/год (Кирилюк и др., 2021).

Возвратное и безвозвратное водопотребление. При изъятиях воды для орошения сельскохозяйственных полей, промышленности, коммунально-бытового использования часть воды возвращается обратно в русло реки, и может использоваться повторно. Тогда как изъятия воды из реки на поение животных являются безвозвратными потерями. Стоит учитывать, что возвращаемая вода является главным источником загрязнения водных объектов и окружающей среды. При этом существуют случаи, когда воду повторно использовать невозможно.

Определение объемов возвратных вод рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{воз}} = K_{\text{воз}} \times W_{\text{потр}}, \quad 4.2.1.4$$

где $K_{\text{воз}}$ – коэффициент, учитывающий норму возврата для каждой отрасли (Кузнецов и др., 2018), $W_{\text{потр}}$ – объем водопотребления отраслью.

В настоящем исследовании вода в русло реки возвращаться будет только после орошения сельскохозяйственных полей. Принимая во внимание, объем затрачиваемых вод на орошение, объем возвратных вод составит 547 680 м³ в год.

Объем изымаемых вод из бассейна Торейских озер. Потери воды на фильтрацию и испарение с поверхности проектируемого водохранилища учтены в расчете располагаемых водных ресурсов в размере 5% от общего объема реки. Расчеты потерь на водопользование и водопотребление (орошение сельскохозяйственных полей, нужды животноводства, санитарные попуски) произведены вышеуказанными способами, значения объемов потерь приведены в таблице 4.2.1.1 Совместный анализ гидрологического режима реки Ульдза и полученных объемов потерь воды показал, что в маловодную фазу цикла потери воды на планируемые нужды существенно превышают естественный сток реки.

Таблица 4.2.1.1. Объем потерь воды при функционировании водохранилища

Водопотребление	Объем изъятий, м ³ /год	Возвратные воды, м ³ /год
Орошение с/х полей	3 423 000,0	547 680,0
Животноводство	516 796,2	-
Итого	3 939 796,2	547 680,0

4.2.2 Сценарный план развития проектируемой водохозяйственной системы

Для оценки последствий реализации монгольской стороной проекта «Хух Морь» («Синий конь») необходимо выполнить комплекс водохозяйственных расчетов с целью определения уровенного режима Торейских озер в зависимости от сценариев (вариантов) изменения

безвозвратных потерь. Для этого составлены и рассмотрены сценарии изменения водохозяйственной обстановки на реке Ульдза в бассейне Торейских озер (таблица 4.2.2.1).

Гидрологический режим Торейских озер имеет циклический характер с полным высыханием котловины водоемов в маловодную фазу, зависящий от стока реки Ульдза, водохозяйственные расчёты выполнены, в том числе, для разных фаз цикла водности.

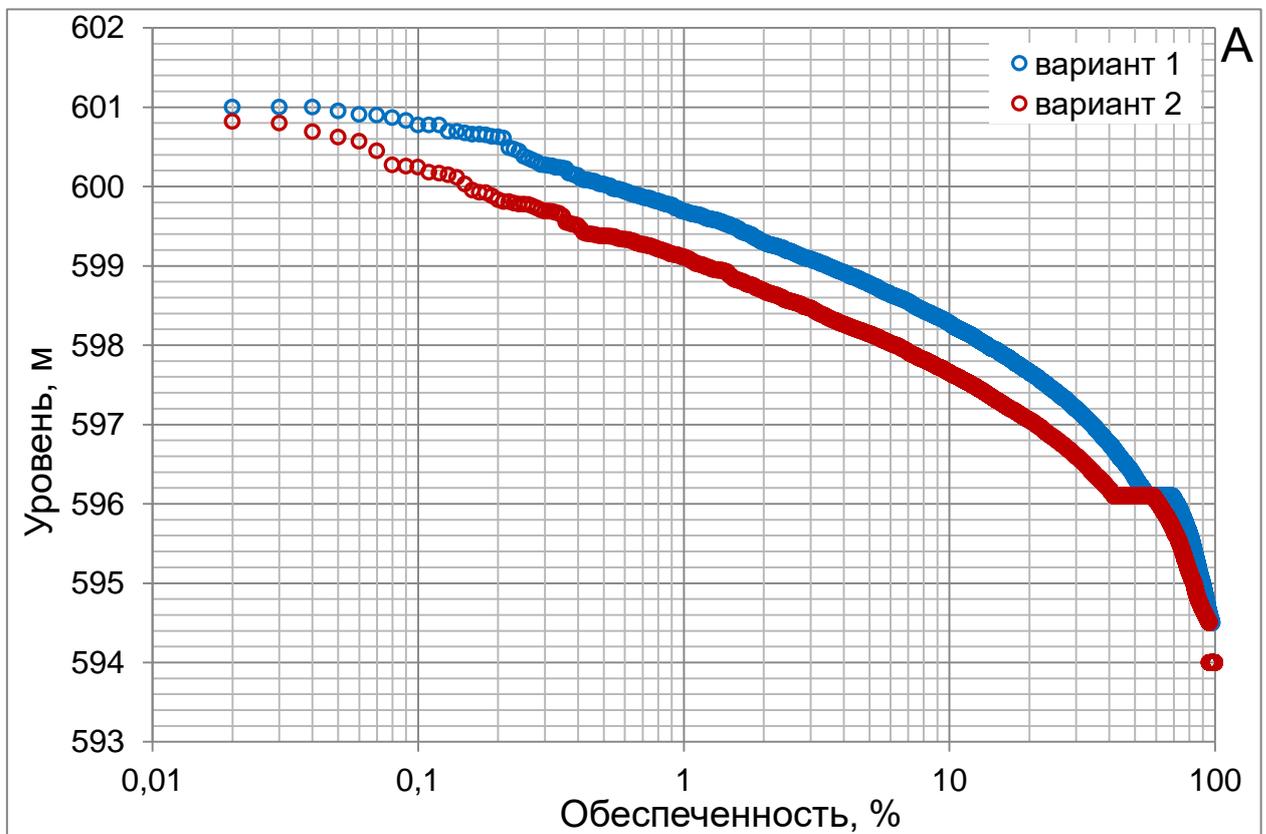
Таблица 4.2.2.1. Возможные сценарии изменения водохозяйственной обстановки в бассейне реки Ульдза

Номер варианта расчета	Условия функционирования водохозяйственной системы и оценка безвозвратных потерь
вариант № 1	Естественные условия
вариант № 2	Водохранилище наполнено. Водные ресурсы затрачиваются на фильтрацию и испарение с поверхности водохранилища. Дополнительные расходы осуществляются для поддержания санитарных попусков в размере 0,018 км ³ /год; для орошения сельскохозяйственных полей площадью 2100 га с учетом нормы орошения равной 1630 м ³ /га и возвратных вод; для нужд скотоводческого хозяйства в количестве 26,7 тыс. голов при норме суточного потребления 51,3 л/сут.
вариант № 3	Расчет уровней производится для маловодной фазы цикла. Учитываются изъятия воды, предусмотренные во втором варианте.

Основная цель водохозяйственных расчетов – выяснить влияние безвозвратных изъятий на режим исследуемых озер, особенно в маловодную фазу гидрологического цикла озер. Решение данной задачи осуществлено имитационным методом расчета уровней воды в Торейских озерах большой продолжительностью посредством созданной модели водного баланса (глава 3) и на основе предложенной выше схемы моделирования компонент водного баланса.

4.3 Результаты водохозяйственных расчетов

В результате водохозяйственных расчетов получены ряды уровней Торейских озер большой продолжительности в соответствие с представляемыми сценариями. Результаты статистической обработки полученных рядов представлены в таблицах 4.3.1 и 4.3.2 и на рисунках 4.3.1-4.3.3, а также в приложениях 2-3. Статистическая обработка выполнялась для двух вариантов: полный ряд, получаемый в результате водобалансовых расчетов, и отдельно рассматривался ряд наполнений озера в маловодные по притоку периоды.



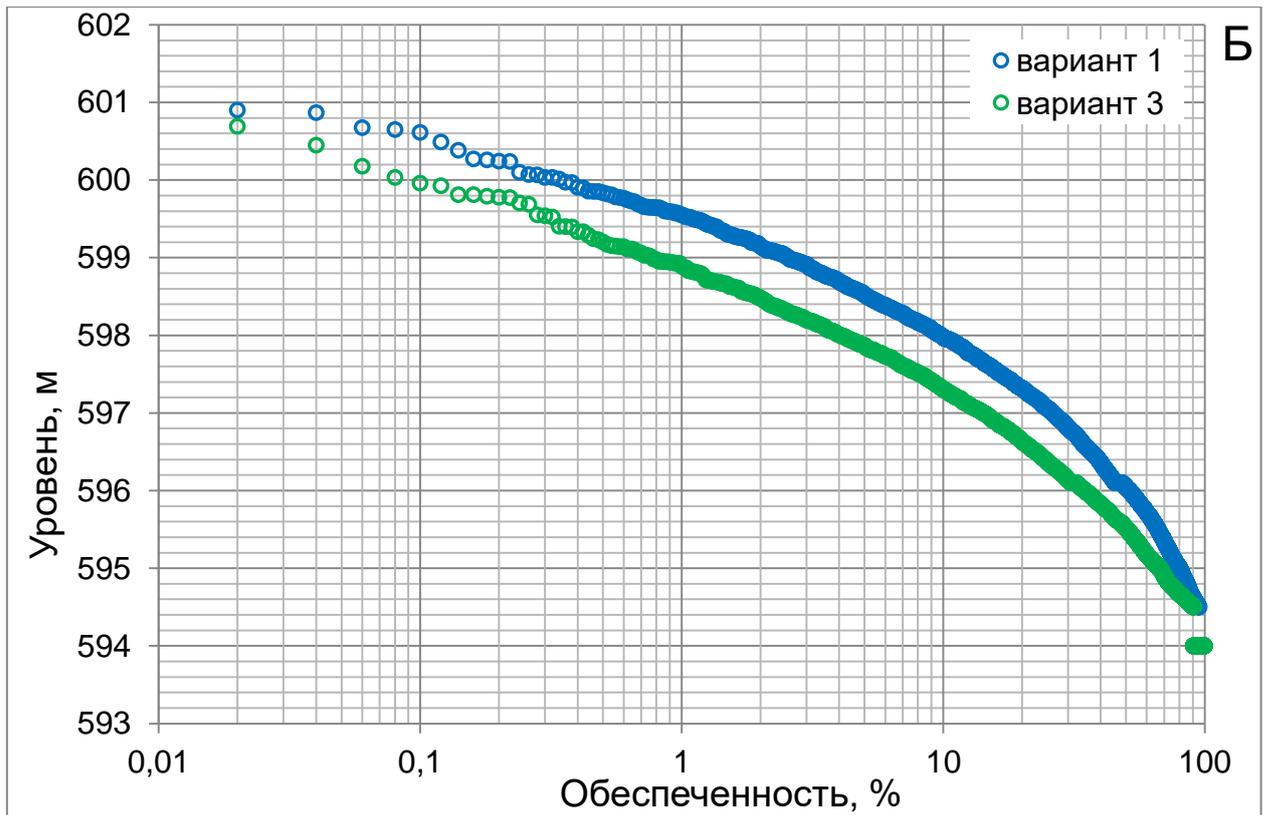
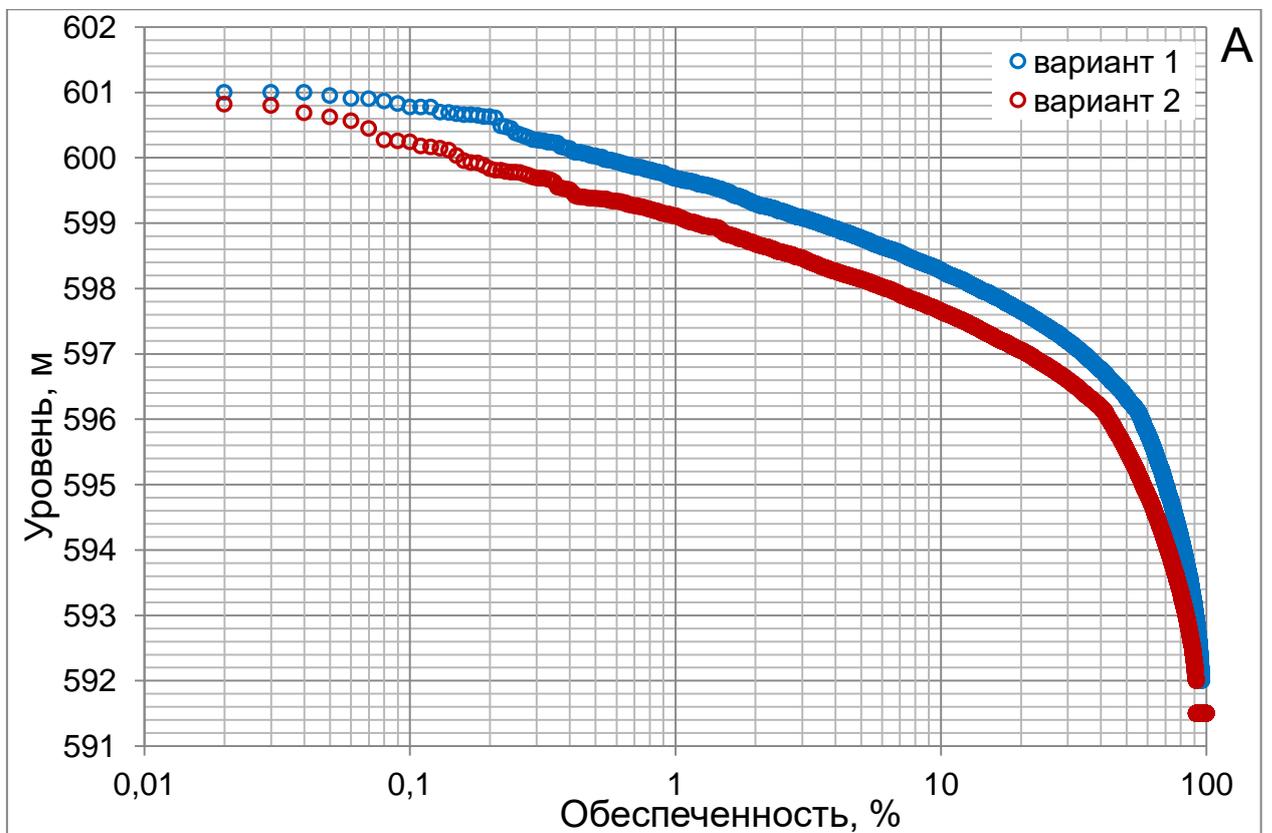


Рисунок 4.3.1. Кривые обеспеченности уровня озера Барун-Торей в периоды:
А – полный гидрологический цикл водности; Б – маловодная фаза



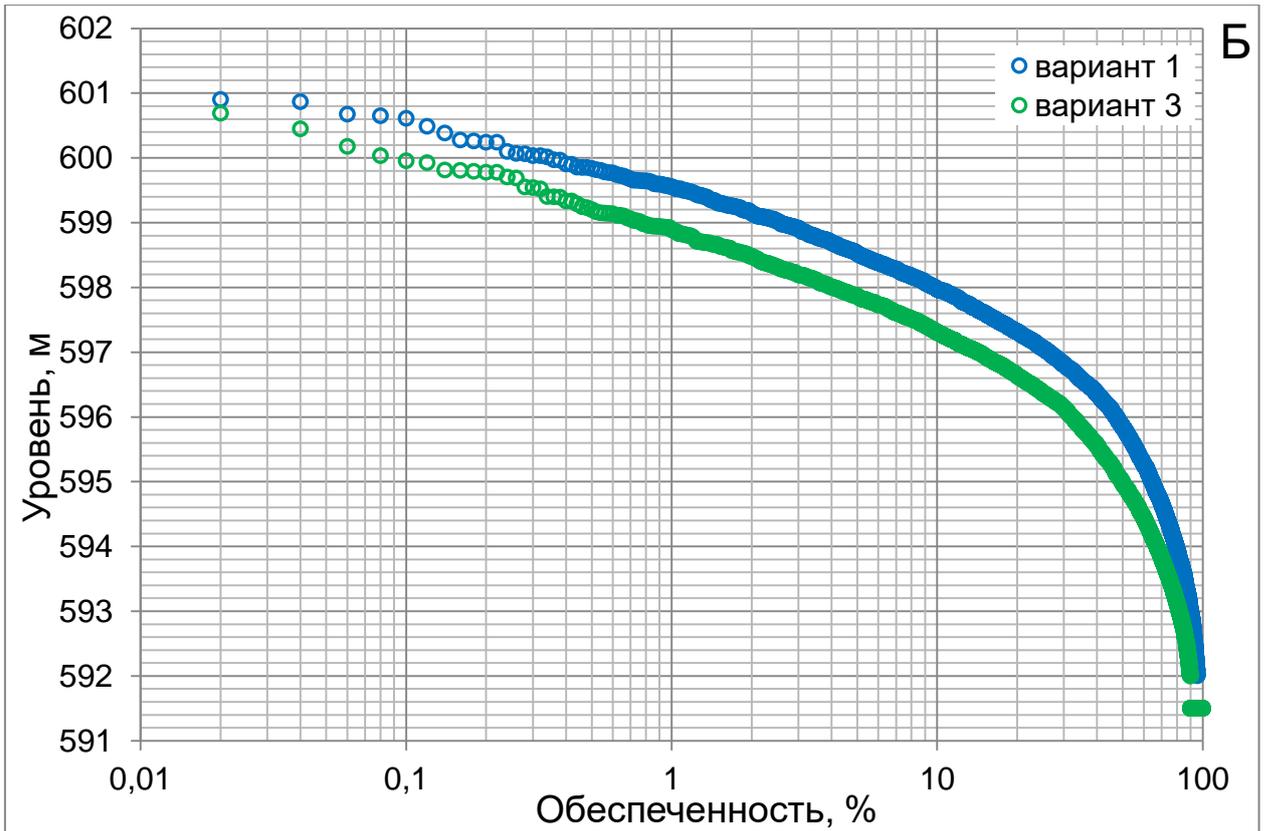
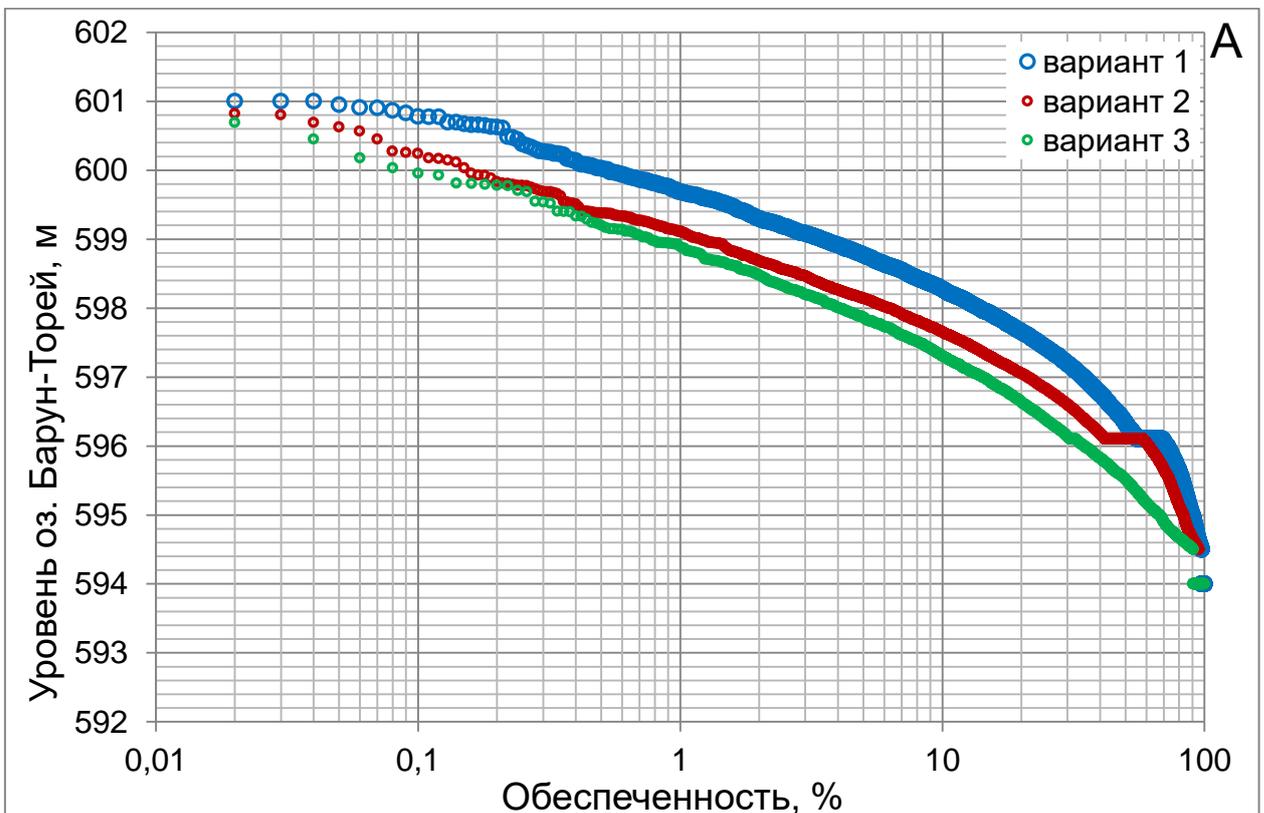


Рисунок 4.3.2. Кривые обеспеченности уровня озера Зун-Торей в периоды:
 А – полный гидрологический цикл водности; Б – маловодная фаза



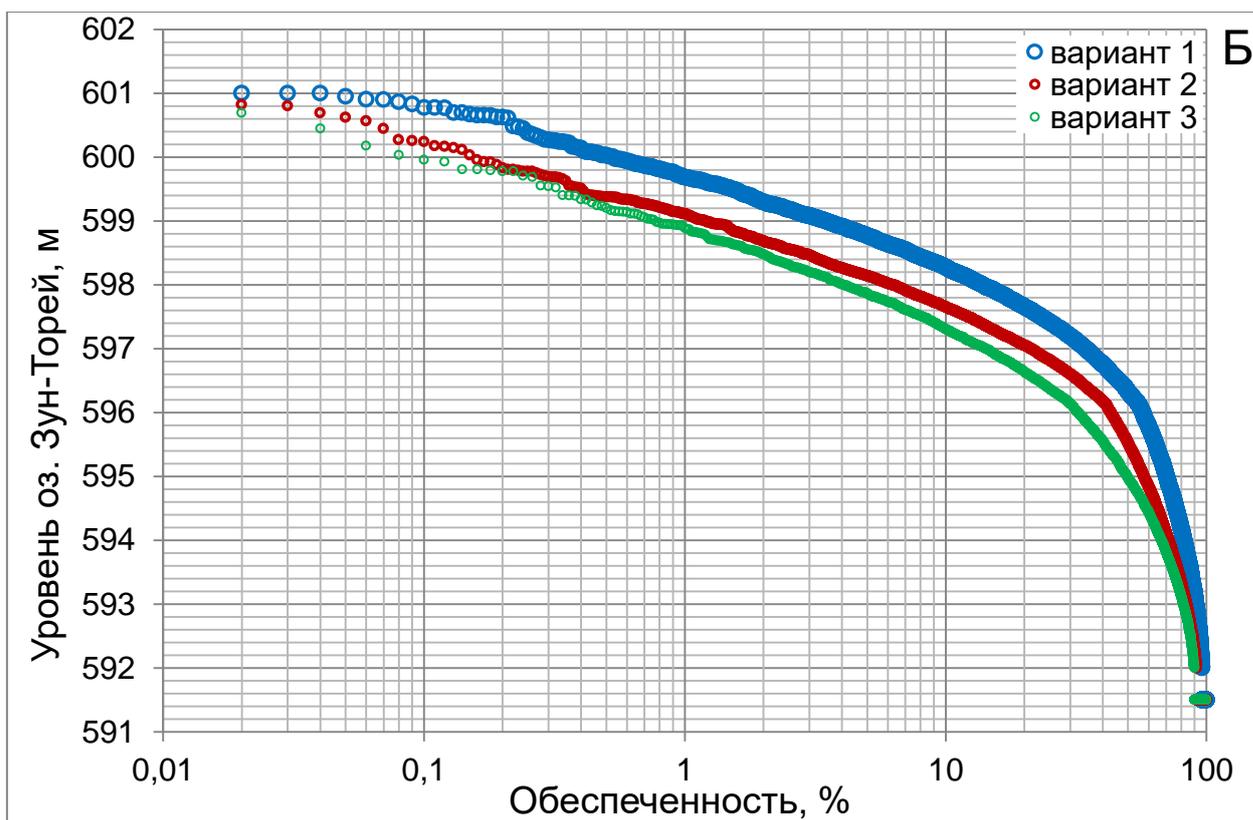


Рисунок 4.3.3. Кривые обеспеченности уровней Торейских озер: А – Барун-Торей; Б – Зун-Торей

Таблица 4.3.1. Уровень озера Барун-Торей (средний за год) в годы различной обеспеченности при рассмотрении представленных вариантов

Уровень	Обеспеченность												
	0,1	0,5	1	5	10	20	50	75	90	95	97	99	99,9
вариант 1	601	601	599,7	598,8	598,3	597,7	596,3	595,9	595	594,6	594,5	594	594
вариант 2	600,9	600,6	599,1	598,1	597,7	597,1	596,1	595,4	594,7	594,5	594	594	594
вариант 3	600,7	599,2	598,9	597,9	597,3	596,6	595,5	594,8	594,5	594	594	594	594

Таблица 4.3.2. Уровень озера Зун-Торей (средний за год) в годы различной обеспеченности при рассмотрении представленных вариантов

Уровень	Обеспеченность												
	0,1	0,5	1	5	10	20	50	75	90	95	97	99	99,9
вариант 1	600,8	600	599,7	598,8	598,3	597,7	596,3	594,6	593,2	592,3	591,5	591,5	591,5
вариант 2	600,2	599,4	599,1	598,1	597,7	597,1	595,5	593,8	592,3	591,5	591,5	591,5	591,5
вариант 3	600	599,2	598,9	597,9	597,3	596,6	595	593,5	592	591,5	591,5	591,5	591,5

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

При реализации монгольской стороной планируемых водохозяйственных проектов, сопровождающихся дополнительными безвозвратными потерями стока, уровень воды в Торейских озерах будет

ниже, чем при естественных условиях. Уменьшение уровня воды составит в озере Барун-Торей в среднем 0,4 м (составляет 8,5 % от значений максимального уровня), в Зун-Торее – 0,5 м (7,7 %). Наибольшее влияние изъятий воды будет проявляться в периоды маловодной фазы водности: в озере Барун-Торей понижение уровня составит в среднем 0,7 м (14,9 %), в Зун-Торее – 0,8 м (12,3 %). При этом наблюдается более быстрое высыхание озер, в среднем на 2-3 года. После окончания маловодной фазы наполнение озер происходит в тот же год, что и при естественных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ научных публикаций и данных наблюдений сети Росгидромета по изученности Торейских озер показал, что их гидрологический режим недостаточно изучен для целей его прогнозирования.
2. На основе совместного использования спутниковой информации и цифровой модели рельефа (ЦМР) дна исследуемых озер получен непрерывный ряд надежной информации об уровненом режиме Торейских озер в условиях отсутствия регулярных наземных гидрологических наблюдений. Для этой цели обоснован оптимальный метод дешифрирования площади водного зеркала озер степной зоны Забайкалья с точки зрения точности результата (погрешность измерений равна 1,07 %) и временных затрат – MNDWI.
3. Учет цикличности уровненого режима Торейских озер и выявленных различий в потерях стока на рассеивание в многоводные и маловодные периоды, позволил обосновать поправочные коэффициенты к компонентам уравнения водного баланса, заключающиеся в увеличении испарения на 5 % и уменьшении притока на 28 %.
4. Разработана модель водного баланса Торейских озер, основанная на комплексировании данных наземных наблюдений и спутниковой информации. Многолетнее изменение уровненого режима Торейских озер, полученное по результатам расчетов созданной в работе модели, хорошо согласуется с данными гидрологических наблюдений и уровнями воды водоемов, восстановленных с помощью спутниковой информации, коэффициент корреляции составляет 0,99 и 0,98, соответственно.
5. Оценены безвозвратные изъятия воды при функционировании строящегося гидротехнического сооружения на реке Ульдза, включающие потери воды на орошение сельскохозяйственных полей и нужды животноводства. Предложен сценарный план развития проектируемой на территории МНР водохозяйственной системы, в том числе независимо рассмотрены маловодный и многоводный периоды, характерные для исследуемых озер.

Установлено, что безвозвратные потери воды на обеспечение рассмотренного водопотребления в бассейне реки Ульдза могут быть сопоставимы с естественным стоком реки в маловодную фазу цикла водности.

б. С помощью метода имитационного моделирования на основе Марковской цепи первого порядка выполнен вероятностный прогноз гидрологического режима Торейских озер в естественных и нарушенных условиях. При реализации монгольской стороной планируемых водохозяйственных проектов, сопровождающихся дополнительными безвозвратными потерями стока, уровень воды в Торейских озерах будет ниже, чем при естественных условиях. Уменьшение уровня воды составит в озере Барун-Торей в среднем 0,4 м (составляет 8,5 % от значений максимального уровня), в Зун-Торее – 0,5 м (7,7 %). Наибольшее влияние изъятий воды будет проявляться в периоды маловодной фазы водности: в озере Барун-Торей понижение уровня составит в среднем 0,7 м (14,9 %), в Зун-Торее – 0,8 м (12,3 %). При этом наблюдается более быстрое высыхание озер, в среднем на 2-3 года. После окончания маловодной фазы наполнение озер происходит в тот же год, что и при естественных условиях.

Автор благодарит свою семью за неоценимую поддержку, понимание и терпение на всех этапах написания диссертации.

Список использованной литературы

1. Атлас географических открытий XVII - XVIII веков. – М.: Наука, 1964. 137 с.
2. Баженова, О.И. Современная динамика озерно-флювиальных систем Онон-Торейской высокой равнины (Южное Забайкалье) / О.И. Баженова // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – №. 371. – С. 171-177.
3. Бакланов, П.Я. Современные геоэкологические проблемы в бассейне озера Ханка / П.Я. Бакланов, А.Н. Качур, В.В. Ермошин, С.И. Коженкова, А.Н. Махинов, А.Н. Бугаец, В.Б. Базарова, В.И. Ким, В.В. Шамов // География и природные ресурсы. – 2019. №. 4 (158). – С. 33-43.
4. Болгов, М.В. Дождевые паводки водотоков Монгольской народной республики / М.В. Болгов // Метеорология и гидрология. – 1985. – № 8. – С. 83-88.
5. Болгов, М.В. Марковские процессы в задаче прогнозирования уровня замкнутого водоема / М.В. Болгов // Метеорология и гидрология. – 2005. – №11. – С. 74-85.
6. Болгов, М.В. Экстремальные уровни озера Ханка: природные вариации или антропогенное воздействие / М.В. Болгов // Вестник Отделения наук о Земле. – 2016. – Т.8. – С. 1-14.
7. Болгов, М.В. О моделировании колебаний уровня озера Чаны для управления его гидрологическим режимом / М.В. Болгов, Е.А. Коробкина // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2012. – №1. – С. 4-21.
8. Болгов, М.В. Каспийское море. Экстремальные гидрологические события / М.В. Болгов, Г.Ф. Красножон, А.А. Любушин. – М.: Наука, 2007. – 380 с.
9. Болгов, М.В. Водный режим реки Аргунь и озера Далайнор в условиях антропогенного воздействия / М.В. Болгов, Н.Л. Фрологва // География и природные ресурсы. – 2012. – №4. – С. 21-29.
10. Большая советская энциклопедия. Том 5. – М.: Советская энциклопедия, 1975. – С. 40.

11. Буторин, А.А. Ландшафты Даурии – новый российский объект Всемирного наследия / А.А. Буторин // Вестник Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО. – 2017 – № 32. – С. 116–143.
12. Вахнина, И.Л. Особенности изменения площади водного зеркала и количества озер степной зоны Восточного забайкалья / И.Л. Вахнина, Е.В. Носкова, **М.А. Голятина** // Вестник Воронежского университета. Серия География. Геоэкология. – 2020. – №3. – С. 13-23.
13. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: уч. для вузов 10-е изд., стер / Е.С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 2006. – 576 с.
14. Викулина, З.А. Водный баланс озер и водохранилищ Советского союза / З.А. Викулина. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 176 с.
15. Владимиров, А.М. Гидрологические расчеты: Учебник для вузов / А.М. Владимиров. – СПб.: Гидрометеиздат, 1990. – 366 с.
16. Воскресенский, С.С. Генезис и строение рельефа Юго-Восточного Забайкалья. Геоморфологические исследования / С.С. Воскресенский, Г.А. Постоленко Ю.Г. Симонов. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1965. – С. 11-122.
17. Вуглинский, В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР / В.С. Вуглинский. – Л.: Гидрометиздат, 1991. – 223 с.
18. Генеральная карта о Российской Империи сколько возможно было исправно сочиненная трудом Ивана Кирилова, обер-секретаря Правительствующего Сената. В Санктпетербурге: [АН]. 1734. 1 к.
19. **Голятина, М.А.** Исследование степных озер Забайкальского края с помощью космического мониторинга / М.А. Голятина // Материалы V Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». – 2018. – С. 289-293.
20. **Голятина, М.А.** Динамика количества и площадей водного зеркала озер Восточного Забайкалья / М.А. Голятина, И.Л. Вахнина, К.А. Курганович // мат-лы XVIII международная научно-практическая конференция: в 3 частях «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов». – 2018. – С. 120-124.

21. **Голятина, М.А.** Анализ динамики озер Даурской степи в условиях изменения климата с применением данных ДЗЗ / М.А. Голятина, И.Л. Вахнина, Е.В. Носкова // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2019. – С. 80.
22. Гомбожапов, А.Д. К проблемам кочевников-животноводов Монголии / А.Д. Гомбожапов // Вестник Бурятского научного центра СО РАН. – 2011. – №. 3. – С. 72-75.
23. Горошко, О.А. Влияние многолетних климатических циклов на орнитокомплексы Даурии / О.А. Горошко // Материалы научной конференции «Эволюция биогеохимических систем (факторы, процессы, закономерности) и проблемы природопользования» и симпозиума «Геоэкологические, экономические и социальные проблемы природопользования» посв. 30-летию ИПРЭК СО РАН. – 2011 г. – С. 141-143.
24. ГОСТ Р 58331.3-2019 Системы и сооружения мелиоративные. Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 25 с.
25. Дмитриева, В.Т. Зонально-поясные особенности и режим озер Забайкалья / В.Т. Дмитриева, А.Т. Напрасников, А.И. Сизиков // Региональные особенности природы Забайкалья. Записки Забайкальского филиала географического общества СССР. Вып. 103. – Чита, 1976. – С. 41-59.
26. Дорнод [Электронный ресурс]. Свободная Энциклоедия, 2021. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B4> (дата обращения 25.12.2021).
27. Зайков, Б.Д. Очерки по озероведению. Ч.2 / Б.Д. Зайков. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 240 с.
28. Измайлова, А.В. Водные ресурсы водоёмов Российской Федерации и тенденции их изменения, обусловленные антропогенными факторами / А.В. Измайлова // Вопросы географии. – 2018a. – №. 145. – С. 347-359.

29. Измайлова, А.В. Озерные водные ресурсы азиатской части Российской Федерации / А.В. Измайлова // Водные ресурсы. – 2018б. – Т. 45. №. 5. – С. 453-462.
30. Измайлова, А.В. Озерность территории Российской Федерации и определяющие ее факторы / А.В. Измайлова, Н.Ю.Корнеенкова // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. №. 1. – С. 16-25.
31. Им, С.Т. Климатогенная динамика озер в экотоне лесостепи Забайкалья / С.Т. Им, В.И. Харук, Н.М. Ракитянская, А.С. Голуков // Сибирский экологический журнал. – 2015. – Т. 22. №. 6. – С. 823-831.
32. Инструкция по межеванию земель. – М.: Роскомзем, 1996.
33. Исаков, Ю.А. и др. Зональные закономерности динамики экосистем / Ю.А. Исаков, Н.С. Казанская, А.А. Тишков. – М.: Наука, 1986. – 150 с.
34. Катаев, М.Ю. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20. №. 4. – С. 105-108.
35. **Кашницкая, М.А.** Исследование динамики площадей водной поверхности озёр степной зоны Восточного Забайкалья на основе данных дистанционного зондирования Земли / М.А. Кашницкая // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021а. – Т. 18. № 3. – С. 242-253.
36. **Кашницкая, М.А.** Водный режим Торейских озер в условиях антропогенного влияния / М.А. Кашницкая // «Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2022. – Т. 39. – С. 44-54.
37. **Кашницкая, М.А.,** Болгов М.В. Бессточные Торейские озера: можно ли дать прогноз изменений гидрологического режима? / М.А. Кашницкая, М.В. Болгов // Метеорология и гидрология. – 2021а. – № 5. – С. 95-98.
38. **Кашницкая М.А.** Оценка влияния строительства гидротехнического сооружения на гидрологический режим трансграничной реки Ульдза

- (Российская Федерация и Монгольская Народная Республика) / М.А. Кашницкая, М.В. Болгов // Статья в сборнике трудов конференции «Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана» / Редакционная группа: Беспалова Л.А., Болгов М.В., Косолапов А.Е., Трофимчук М.М., Фролова Н.Л. Новочеркасск. – 2021б. – С. 179-185.
39. **Кашницкая, М.А.** Уровенный режим Торейских озер на основе спутниковых данных за период 1989-2020 гг. / М.А. Кашницкая, М.В. Болгов // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2021в. – С. 91.
40. **Кашницкая, М.А.** Оценка изменения гидрологического режима Торейских озер в результате антропогенных воздействий / М.А. Кашницкая, М.В. Болгов // Статья в сборнике трудов IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». – 2021г. – С. 196-201.
41. Кириллюк, В.Е. и др. Биосферный заповедник «Даурский» / В.Е. Кириллюк, О.А. Горошко, Л.И. Сараева, С.М. Сеница, Т.И. Бородина, Е.Э. Ткаченко, В.А. Бриних. – Чита: Экспресс-издательство, 2009. – 104 с.
42. Кириллюк, В.Е. и др. Предварительная оценка влияния на экосистему Торейских озер плотины, строящейся на трансграничной реке Ульдза в Монголии / В.Е. Кириллюк, В.А. Обязов, А.В. Шаликовский, К.А. Курганович, М.А. Босов, О.И. Никитина, О.А. Горошко. // Статья в сборнике трудов конференции «Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана» / Редакционная группа: Беспалова Л.А., Болгов М.В., Косолапов А.Е., Трофимчук М.М., Фролова Н.Л. Новочеркасск. – 2021. – С. 185-191.
43. Кириллюк, В.Е. и др. Влияние изменений климата на местообитания и биоту в Даурии / В.Е. Кириллюк, Т.Е. Ткачук, О.К. Кириллюк // Проблема адаптации к изменению климата в бассейне рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. – Чита: Экспресс-издательство, 2012. – С. 46-62.

44. Кирилюк, О.К. Даурия и Аргунь вчера и сегодня. Будет ли завтра? / О.К. Кирилюк // Степной бюллетень. – 2009. – № 27. – С. 22-24.
45. Кирилюк, О.К. Даурия как экологический регион / О.К. Кирилюк, Т.Е. Ткачук // Проблема адаптации к изменению климата в бассейне рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. – Чита: Экспресс-издательство, 2012. – С. 7-13.
46. Кондратьева, Л.М. Комплексная оценка трансграничного загрязнения реки Амур при различном гидрологическом режиме / Л.М. Кондратьева, Д.В. Андреева, А.Н. Уткина // Статья в сборнике: Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. Труды III Всероссийской научной конференции с международным участием: в 4 томах. – 2017. – С. 40-49.
47. Корнеенкова, Н.Ю. Использование космической информации при оценке морфометрических характеристик озер и построении карт озерности и густоты озерной сети / Н.Ю. Корнеенкова, А.В. Измайлова // Региональная экология. – 2019. – №. 2 (56). – С. 43-50.
48. Корнутова, Е.И. История развития Торейских озер Восточного Забайкалья / Е.И. Корнутова // Мезозойских и кайнозойские озер Сибири. – М.: Наука, 1968. – С. 74-88.
49. Кренделев, Ф.П. Периодичность наполнения и высыхания Торейских озер (Юго-Восточное Забайкалье) / Ф.П. Кренделев // Доклады АН СССР. –1986. – Т.287. №2. – С. 396-400.
50. Кренделев, Ф.П., Шамсутдинов В.Х. Торейская котловина и генезис ее озер / Ф.П. Кренделев, В.Х. Шамсутдинов // Геология и геофизика. – 1987. – №1. – С. 37-42.
51. Крицкий, С.Н. Колебания уровня Каспийского моря / С.Н. Крицкий, Д.В. Коренистов, Д.Я. Раткович. – М.: Наука, 1975. – 158 с.
52. Кузнецов, Н.Т. Озерные стадии развития Центральной Азии в четвертичное время / Н.Т. Кузнецов, Э.М. Мурзаев // Озера полуаридной зоны. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 82-88.

53. Кузнецов, Е.В. Водохозяйственные системы и водопользование: учеб. Пособие / Е.В. Кузнецов, Е.В. Дегтярева, К.В. Ященко. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – 75 с.
54. Куклин, А.П. Состояние водных экосистем озёр Онон-Торейской равнины за 1983-2011 годы (Восточное Забайкалье) / А.П. Куклин, Г.Ц. Цыбекмитова, Е.П. Горлачева // Аридные экосистемы. – 2013. – Т.19. №3 (56). – С. 16-26.
55. Кулаков, В.С. Рельеф / В.С. Кулаков // Энциклопедия Забайкалья. Читинская область. Т. 1. Общий очерк. – Новосибирск: Наука, 2000. – С. 37-40.
56. Курганович, К.А. Сравнение алгоритмов дешифрирования водных поверхностей по индексам NDWI и MNDWI на примере степных озёр Восточного Забайкалья / К.А. Курганович // Сб. тр. преподавателей и студентов кафедры водного хозяйства и инженерной экологии ЗабГУ «Водные ресурсы и водопользование» / под. ред. В.Н. Заслоновского и Л.Н. Зима. – Чита: ЗабГУ, 2015. – Вып. 7. – С. 18-26
57. Курганович, К.А. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озёр юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования / К.А. Курганович, Е.В. Носкова // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2015. – №. 6 (121). – С. 16-24.
58. Ландшафты Даурии. Потенциально серийный трансграничный объект Всемирного наследия (Российская Федерация и Монголия) / О.К. Кириллук, В.Е. Кириллук, Н.В. Максаковский и др. / под ред. А.А. Буторина. – М.: Энни, 2014. – 61 с.
59. Лукашов, А.А., Смоктунович Т.Л. Трёхвековой мониторинг состояния уникального природного объекта – Торейских озёр (Даурия) / А.А. Лукашов, Т.Л. Смоктунович // Геология, геоэкология, эволюционная география. – 2018. – С. 191-198.
60. Лупян, Е.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е.А. Лупян, М.А. Бурцев, И.В.

- Балашов, С.А. Барталев, В.Ю. Ефремов, А.В. Кашницкий, А.А. Мазуров, А.М. Матвеев, О.А. Суднева, И.Г. Сычугов, В.А. Толпин, И.А. Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т.12. № 5. – С.263-284.
61. Лупян, Е.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев, А.В. Кашницкий, И.В. Балашов, С.А. Барталев, А.М. Константинова, Д.А. Кобец, А.А. Мазуров, В.В. Марченков, А.М. Матвеев, М.В. Радченко, И.Г. Сычугов, В.А. Толпин, И.А.Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. № 3. – С. 151-170.
62. Магидович, И.П. Очерки по истории географических открытий. Т.3 / И.П. Магидович, В.И. Магидович. – М.: Просвещение, 1984. – 320 с.
63. Малаева, Е.М. Симонов Ю.Г. Условия существования озер Юго-Восточного Забайкалья в позднем кайнозое / Е.М. Малаева, Ю.Г. Симонов // Вопросы озерного морфолитогенеза. Записки Забайкальского отдела географического общества СССР. Вып. XXXI. – Чита, 1969. – С. 15-21.
64. Махинов, А.Н. Озеро Ханка: подъем уровня воды, его масштабы и последствия / А.Н. Махинов // Природа. – 2020. – №. 11 (1263). – С. 37-45.
65. Махинов, А.Н. Антропогенное воздействие как фактор обострения трансграничных экологических проблем в бассейне реки Амур / А.Н. Махинов, Ш. Лю, В.И. Ким, А.Ф. Махинова // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018» под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. – 2018. – С. 772-774.
66. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик / под ред. Шмидта Т.С. – Л: Гидрометеиздат, 1984. – 247 с.
67. Морозова, В.А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования / В.А.

- Морозова // Современные проблемы территориального развития. – 2019. – №. 2. – С. 1-12.
68. Музылев, С.В. Стохастические модели в инженерной гидрологии / С.В. Музылев, В.Н. Привальский, Д.Я. Раткович. – М.: Наука, 1982. – 184 с.
69. Мурзаев, Э.М. Монгольская Народная Республика / Э.М. Мурзаев. – М.: Географгиз, 1952. – 472 с.
70. На российско-монгольской границе может возникнуть зона экологического бедствия [Электронный ресурс]. Сайт Института географии РАН, 2021. – Режим доступа: <http://www.igras.ru/news/2864> (дата обращения 15.05.2021)
71. Национальное статистическое управление Монголии [Электронный ресурс]. Статистическая база данных, 2021. – Режим доступа: <https://www.1212.mn/> (дата обращения: 20.12.2021).
72. Некипелов, Н.В. Климат Юго-Восточного Забайкалья и исторический обзор чумных эпизоотий на фоне климатических изменений / Н.В. Некипелов // Известия Иркутского государственного научно-исследовательского противочумного института Сибири и Дальнего Востока. – 1957. – Т. XV. – С. 19-56.
73. Новлянская М.Г. Даниил Готлиб Мессершмидт / М.Г. Новлянская. – Л.: Наука, 1970. – 184 с.
74. Ведомственные нормы технологического проектирования: ВНТП-Н-97. Нормы расходов воды потребителей систем сельскохозяйственного водоснабжения. – М.:Союзводпроект, 1997.
75. Носкова, Е.В. Характеристика увлажненности территории бессточных озер Торейской равнины с использованием метеорологических данных / Е.В. Носкова, И.Л. Вахнина, К.А. Курганович // Вестн. Забайкал. Гос. Ун-та. – 2019. – Т. 25. №3. – С. 22-30.
- 76.Обязов, В.А. Закономерности увлажнения степной зоны Забайкалья и их проявления в режиме озер (на примере Торейских озер): автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07 / Обязов Виктор Афанасьевич. – Чита, 1996, – 21 с.

77. Обязов, В.А. Изменение климата в междуречье Аргуни и Онона в контексте глобального потепления / В.А. Обязов // Вестник ЧитГУ. – 2011. – №7 (74). – С. 78-85.
78. Обязов, В.А. Изменения климата и гидрологический режим рек и озер в Даурском экорегионе / В.А. Обязов // Проблема адаптации к изменению климата в бассейне рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. – Чита: Экспресс-издательство, 2012. – С. 24-45.
79. Обязов, В.А. Торейские озера как индикатор многолетних изменений увлажненности Юго-Восточного Забайкалья и Северо-Восточной Монголии / В.А. Обязов, В.Е. Кириллюк, А.В. Кириллюк // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2021. – Т.3. Вып.3. – С. 204–232.
80. Паллас, П.С. Путешествие по разным провинциям Российского государства / П.С. Паллас. – Ч.3. Половина первая. 1772 и 1773 гг. – СПб, 1788. – 623 с.
81. Поздняков, Ш.Р., Измайлова А.В., Расулова А.М. Уникальные озера как объект научного интереса / Ш.Р. Поздняков, А.В. Измайлова, А.М. Расулова // Известия Русского географического общества. – 2020. – Т. 152. №. 3. – С. 17-31.
82. Постников, А.Н. Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России / А.Н. Постников // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – №. 42. – С. 55-63.
83. Потанин, Г.Н. Путешествие по Монголии / Г.Н. Потанин. – М.: ОГИЗ, 1948. – 484 с.
84. Прасолов, Л.И. Южное Забайкалье. Почвенно-географический очерк /Л.И. Прасолов. – Л.: Изд-во АН СССР, 1927. – 422 с.
85. Предварительная заявка «Степи Даурии» [Электронный ресурс] Фонд «Охрана природного наследия», 2005. – Режим доступа: <http://www.nhpfund.ru/tentative-list-submissions/daurian-steppes-tentative-list.html> (дата обращения 28.12.2020)

86. Радде, Г.И. Дауро-Монгольская граница Забайкалья / Г.И. Радде // Вестник ИРГО, 1858. – Ч.22. Кн.4. – С. 117-142.
87. Румянцев, В.А. Водные ресурсы рек и водоемов России и антропогенные воздействия на них / В.А. Румянцев, Н.И. Коронкевич, А.В. Измайлова, А.Г. Георгиади, И.С. Зайцева, Е.А. Барабанова, В.Г. Драбкова, Н.Ю. Корнеенкова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2021. – Т. 85. №. 1. – С. 120-135.
88. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022612620. «Water balance model of the Torey lakes»: № 2022612170 : заявл. 17.02.2022 / Кашницкая М.А., Болгов М.В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-Исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета».
89. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик (СП 33-101-2003). – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 73 с.
90. Сикан, А.В. Вероятностные распределения в гидрологии. Специальные главы теории и практики гидрологических расчетов: учебник / А.В. Сикан. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 386 с.
91. Симонов, Е.А. Ход «Синим конем»: трансграничные риски стратегий климатической адаптации и «климатических обязательств» на примере Монголии / Е.А. Симонов, В.Е. Кирилюк // Материалы международной конференции СВО ВЕКЦА «Опыт развития трансграничного водного сотрудничества в странах ВЕКЦА». – 2021. – С. 45-61
92. Симонов, Ю.Г. Озерный морфолитогенез в условиях Забайкалья / Ю.Г. Симонов // Вопросы озерного морфолитогенеза. Записки Забайкальского отдела географического общества СССР. – Чита, 1969. – Вып. XXXI. – С. 3-15.
93. Соколов, А.А. Методы расчета водных балансов / А.А. Соколов, Т.Г. Чапмен // Международное руководство по исследованиям и практике. – Л. Гидрометиздат, 1976. – 120 с.

94. Соколова, Г.В. Статистический анализ водного режима реки Амур для целей прогноза / Г.В. Соколова // Региональные проблемы. – 2022. – Т. 25. №. 1. – С. 49-61.
95. **Соснина, М.А.** Оценка изменения площадей водного зеркала оз. Барун-Торей за период 1976-2014 гг. с использованием данных дистанционного зондирования Landsat / М.А. Соснина, К.А. Курганович // Сб. тр. преподавателей и студентов кафедры водного хозяйства и инженерной экологии Забайкальского государственного университета «Водные ресурсы и водопользование». – Чита: ЗабГУ, 2015. Вып. 7. – С. 23-31.
96. Сутырина, Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: Учебное пособие / Е. Н. Сутырина. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013.–165 с.
97. Ткачук, Т.Е. Результаты мониторинга растительности на стационарном геоботаническом профиле в Даурском заповеднике / Т.Е. Ткачук, О.В. Жукова // Природоохранное сотрудничество: Россия, Монголия, Китай. – 2010. – №1. – С. 290-294.
98. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. – Л., 1969. – 85 с.
99. Укрупненные нормы водопотребности для орошения по природно климатическим зонам СССР. – М., 1984. – 346 с.
100. Улз голын урсцыг нэмэгдүүлэх "Онон-Улз" [Электронный ресурс]. Система государственных закупок Монголии, 2021. – Режим доступа: <https://www.tender.gov.mn/en/invitation/detail/1570643029346> (дата обращения 15.05.2021)
101. Уфимцев, Г.Ф. Некоторые данные по неотектонике района Торейских озер / Г.Ф. Уфимцев // Вопросы геологии Прибайкалья и Забайкалья. Записки Забайкальского филиала географического общества СССР. Вып. 3(5). – Чита, 1968. – С. 198-201.
102. Уфимцев, Г.Ф. Новейшая тектоника юга Забайкалья / Г.Ф. Уфимцев // Известия Забайкальского филиала географического общества СССР. Т.VI. Вып.3. – Чита, 1970. – С. 3-17.

103. Флоренсов, Н.А. Некоторые особенности котловин крупных озёр Южной Сибири и Монголии / Н.А. Флоренсов // Мезозойские и Кайнозойские озера Сибири. – М.: Наука, 1968. С. 59-73.
104. Фриш, В.А. Торейский эксперимент / В.А. Фриш // Природа. – 1972. – №2. – С. 60-66.
105. Чечель, А.П. Динамика уровня режима озёр / А.П. Чечель // Содовые озера Забайкалья. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 12-15.
106. Шамсутдинов, В.Х. Геологическая история Торейской котловины / В.Х. Шамсутдинов // Содовые озера Забайкалья. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 4-12.
107. Шамсутдинов, В.Х. История геологического развития района Торейских озёр антропогене (Юго-Восточное Забайкалье): автореф. дис. ...канд. геол.-минерал. наук. / Шамсутдинов Виль Халимович. – Чита. 1971. – 22 с.
108. Шамсутдинов, В.Х. Особенности водного режима Торейских озёр / В.Х. Шамсутдинов // Природа Цасучейско-Торейского заказника (Материал седьмых Павловских чтений). – Чита: Забайкальский филиал географ. общества СССР, 1983. – С. 7-11.
109. Шихов, А.Н. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению «Картография и геоинформатика» / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова. – Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2020. – 191 с.
110. Шмакова, В.Ю. Сравнение морфометрических характеристик озёр для различных водных индексов / В.Ю. Шмакова // Сборник трудов XVII Конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Сер. "Механика, управление, информатика". – 2020. – С. 161-169.
111. Bazarova, V.B. Long-term fluctuations of the aquatic ecosystems in the Onon-Torey plain (Russia) / V.B. Bazarova, N.A. Tashlykova, E.Yu. Afonina, A.P.

- Kuklin, P.V. Matafonov, G.Ts. Tsybekmitova, E.P. Gorlacheva, M.Ts. Itigilova, A.V. Afonin, M.N. Butenko // *Acta Ecologica Sinica*. – 2019. – Vol. 39, №2. – P. 157-165.
112. Bazhenov, Yu.A. Population of Small Mammals in the Vicinity of the Torey Lakes (Southeast Transbaikalia) during the Dry Climatic Phase: Dynamics and Connection with Precipitation / Yu.A. Bazhenov // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2019. – Vol. 12. №1. – P. 23-33.
113. Feyisa, G.L. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery / G.L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt, S.R. Proud // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – № 140. – P. 23-35.
114. Kirilyuk, V.E. Influence of climate change on vegetation and wildlife in the Daurian Eco-region / V.E. Kirilyuk, V.A Obyazov, T.E. Tkachuk, O.K. Kirilyuk // *Eurasian steppes. Ecological problems and livelihoods in a changing world*. – 2012, – P. 397-424.
115. Loupian, E.A. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System / E.A. Loupian, M.A. Bourtsev, A.A. Proshin, A.V. Kashnitskii, I.V. Balashov, S.A. Bartalev, A.M. Konstantinova, D.A. Kobets, M.V. Radchenko, V.A. Tolpin, I.A. Uvarov // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol.14. №1. – P. 77.
116. McFeeters, S.K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features / S.K. McFeeters // *International Journal of Remote Sensing*. – 1996. – № 17. – P. 1425-1432.
117. Sun, F. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery / F. Sun, W. Sun, J. Chen, P. Gong // *International Journal of Remote Sensing*. — 2012. — Vol. 33, No. 21. — P. 6854— 6875.
118. Torey Lakes [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rsis.ramsar.org/ris/683> (дата обращения: 16.04.2021).
119. Vakhnina, I.L. Climatogenic Dynamics of Lakes in the Russian Part of Daur Steppe According to Earth's Remote Sensing Data / I.L. Vakhnina, **M.A. Goliatina**, E.V. Noskova // *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated*

to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)AER-Advances in Engineering.– Atlantis Highlights in Materials Science and Technology, 2019. P. 646-650

120. Xu, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery / H. Xu // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – № 27. – P. 3025-3033.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Изменение объема и площади озер Барун-Торей и Зун-Торей за период с 1965 по 2018 гг.

Приложение 2. Кривые обеспеченностей уровней озер Барун-Торей и Зун-Торей в период многоводной фазы гидрологического цикла водности.

Приложение 3. Кривые обеспеченностей объемов озер Барун-Торей и Зун-Торей в периоды маловодной, многоводной фаз и полного гидрологического цикла водности.

Приложение 4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Приложение 5. Акт внедрения.

Приложение 1

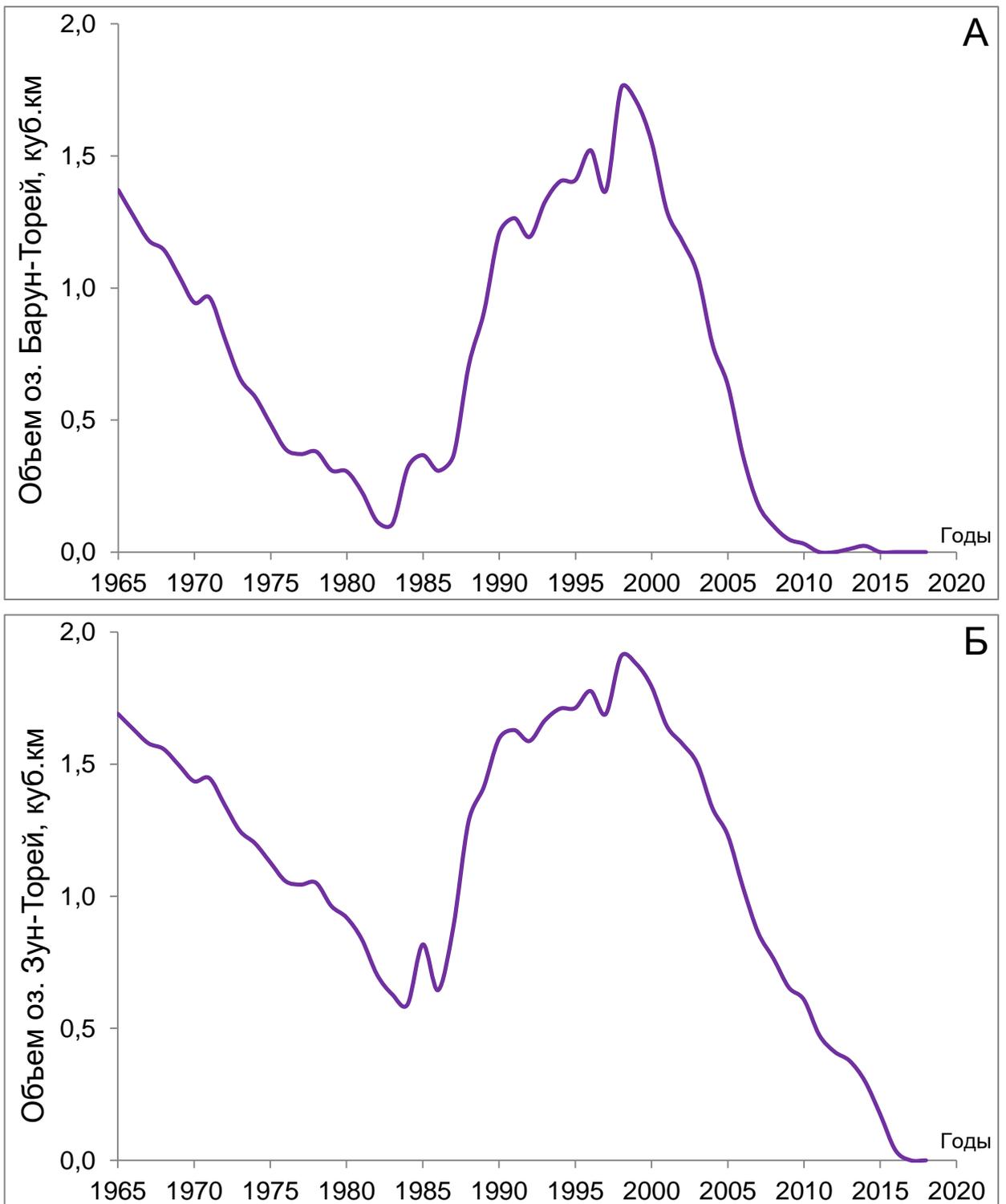


Рисунок 1. Изменение объема Торейских озер за период с 1965 по 2018 гг.:
А – Барун-Торей, Б – Зун-Торей

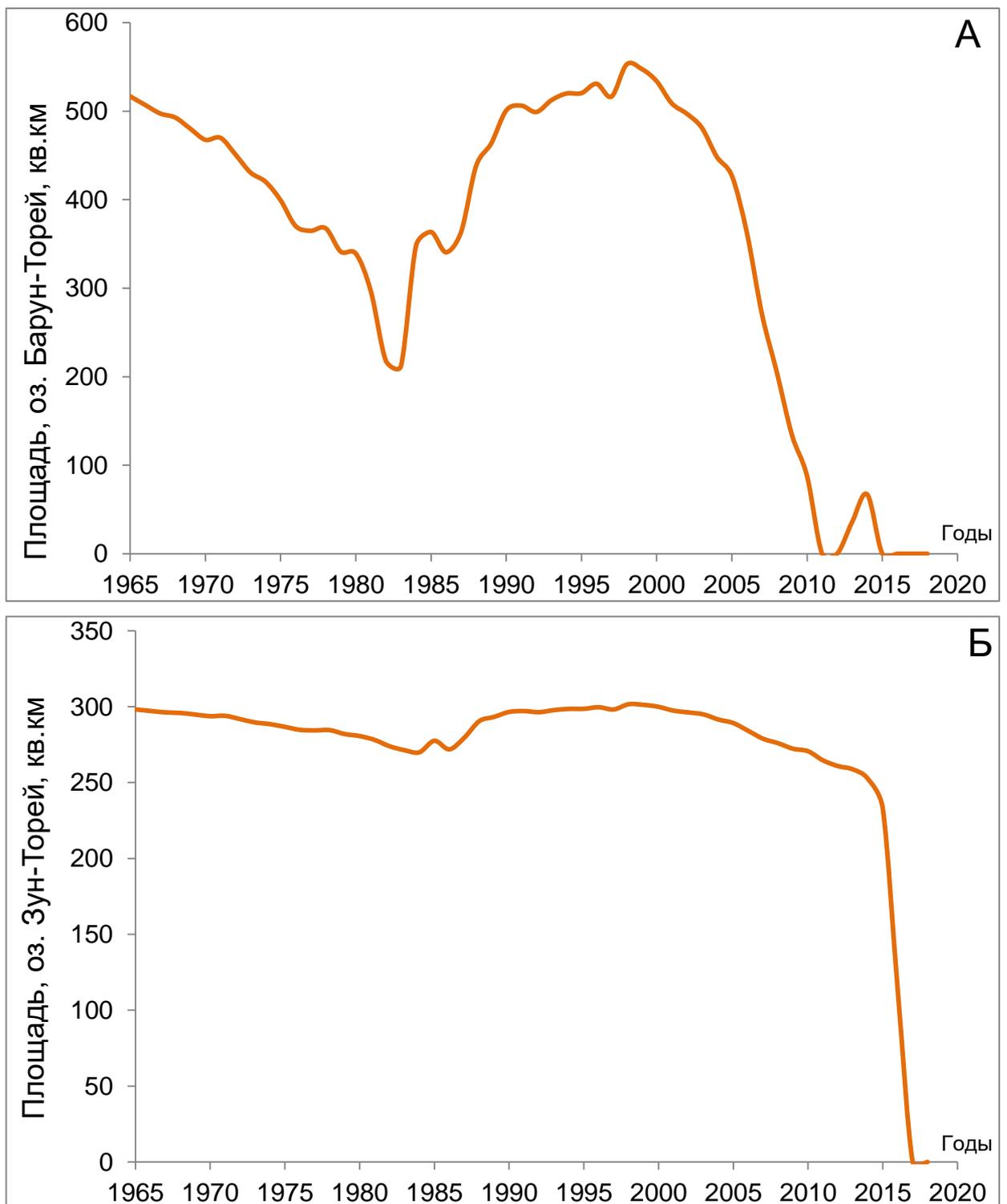


Рисунок 2. Изменение площади Торейских озер за период с 1965 по 2018 гг.:
А – Барун-Торей, Б – Зун-Торей

Приложение 2

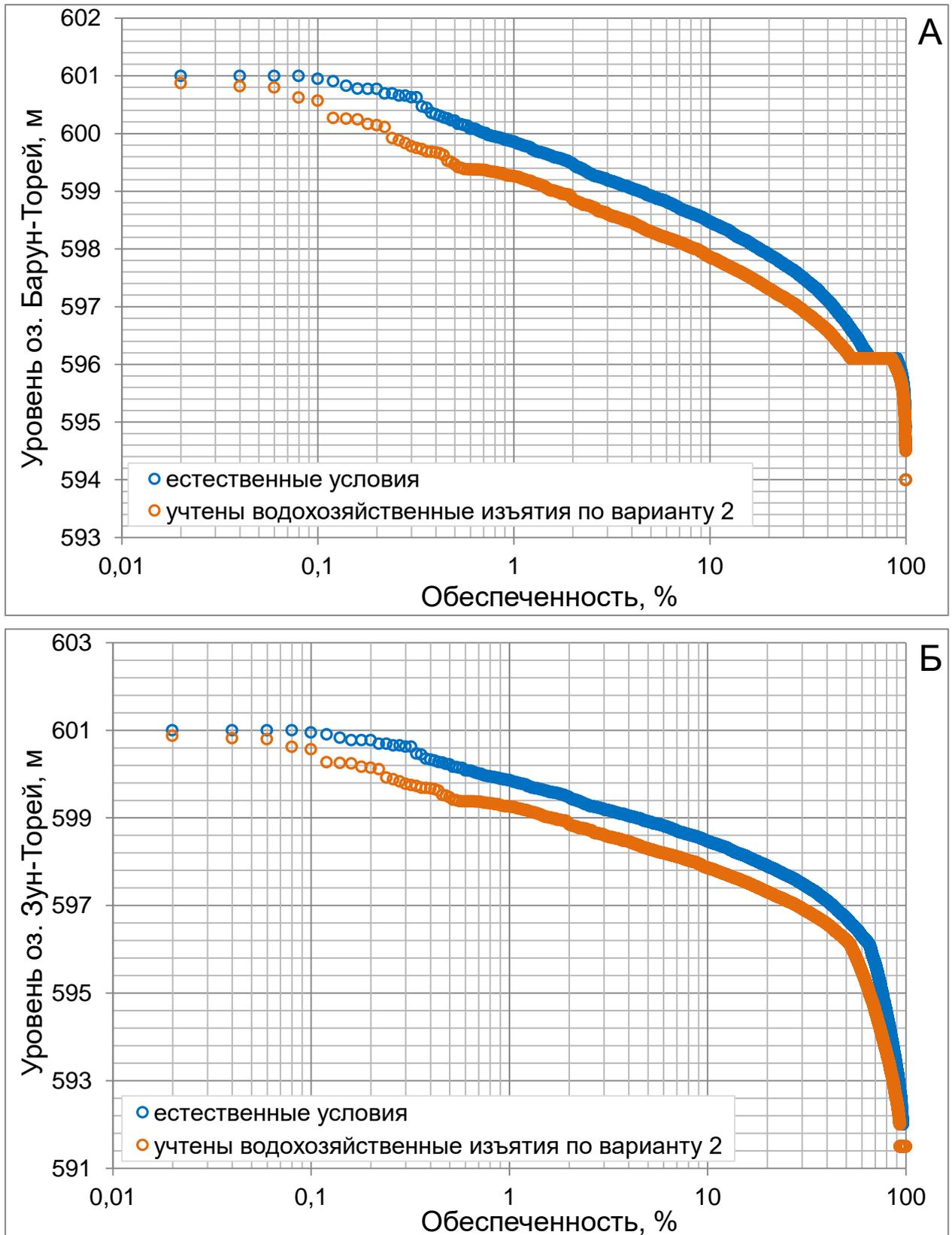


Рисунок 1. Кривые обеспеченностей уровней Торейских в период многоводной фазы гидрологического цикла водности: А – Барун-Торей, Б – Зун-Торей

Приложение 3

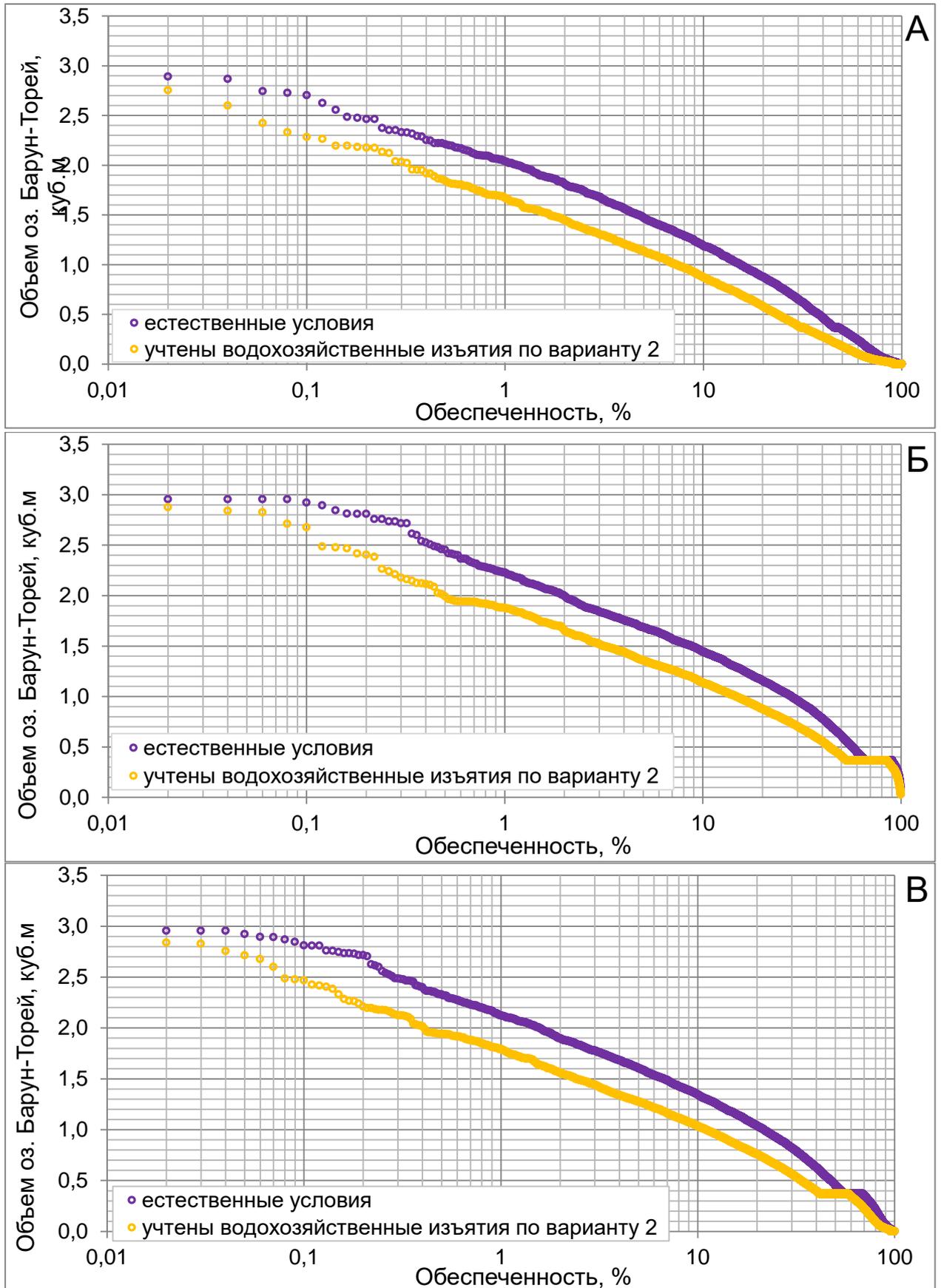


Рисунок 1. Кривые обеспеченностей объемов озера Барун-Торей в периоды: А – маловодной фазы, Б – многоводной фазы, В – полного цикла водности

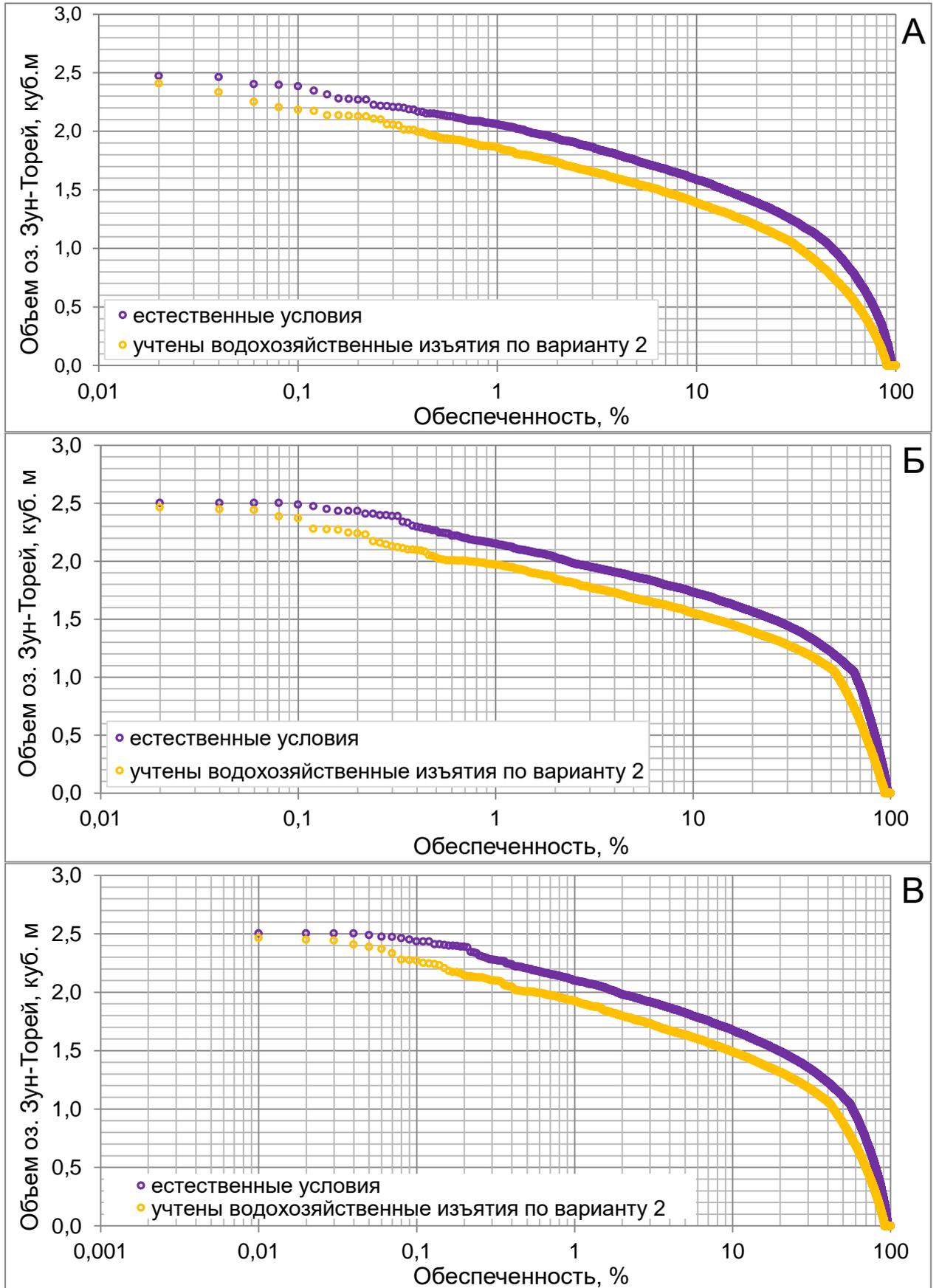


Рисунок 2. Кривые обеспеченностей объемов озера Зун-Торей в периоды: А – маловодной фазы, Б – многоводной фазы, В – полного цикла водности

Приложение 4

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022612620

Автоматизированная программа «Water balance model of the Torey lakes» для получения информации о гидрологическом режиме Торейских озер за многолетний период

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (RU)*

Авторы: *Кашиницкая Марина Алексеевна (RU), Болгов Михаил Васильевич (RU)*

Заявка № 2022612170

Дата поступления 17 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 февраля 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение 5

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «НИЦ «Планета»

В. В. Асмус
В. В. Асмус



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

№ 1_12/22 от 05.04.2022 г.

Настоящий акт составлен в том, что в ФГБУ «НИЦ «Планета» Кашницкой М.А. и Болговым М.В. разработана и внедрена в оперативную эксплуатацию отдела № 12 программа для ЭВМ «Water balance model of the Torey lakes», позволяющая в автоматизированном режиме производить расчет уровней воды Торейских озер за многолетний период.

Программа «Water balance model of the Torey lakes» написана на языке программирования Python. В основу расчета уровенного режима Торейских озер положено уравнение водного баланса для бессточных водоемов и знания о потерях воды в разные циклы водности, характерные для региона данных водоемов. В качестве исходной информации используются сведения об осадках, испарении и притоке. Выходной продукцией программы являются графики изменения уровенного режима Торейских озер за многолетний период, а также данные об их уровне воды, площади водной поверхности и объеме в формате таблиц Excel.

В ФГБУ НИЦ «Планета» успешно проведены испытания программы «Water balance model of the Torey lakes» на основе данных наземных измерений наблюдательной сети Росгидромета (МСТ. Соловьевск, ГП. р. Ульдза – с. Соловьевск.). В ходе эксплуатации данной программы подтверждено, что она обладает всеми заявленными возможностями.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Water balance model of the Torey lakes» для получения информации о гидрологическом - режиме Торейских озер за многолетний период, № 2022612620 от 28.02.2022 г. (авторы – Кашницкая М.А., Болгов М.В.).

Зав. отделом № 12

В.А. Кровотынцев

В.А. Кровотынцев

Зав. отделом № 18

Н.С. Екимов

Н. С. Екимов

Зав. отделом № 9

Т.Л. Кормашова

Т.Л. Кормашова

Младший науч. сотрудник

М.А. Кашницкая

М.А. Кашницкая