

Использование спутниковой информации для оценки антропогенного воздействия на гидрологический режим бессточных водоемов (на примере Торейских озер)

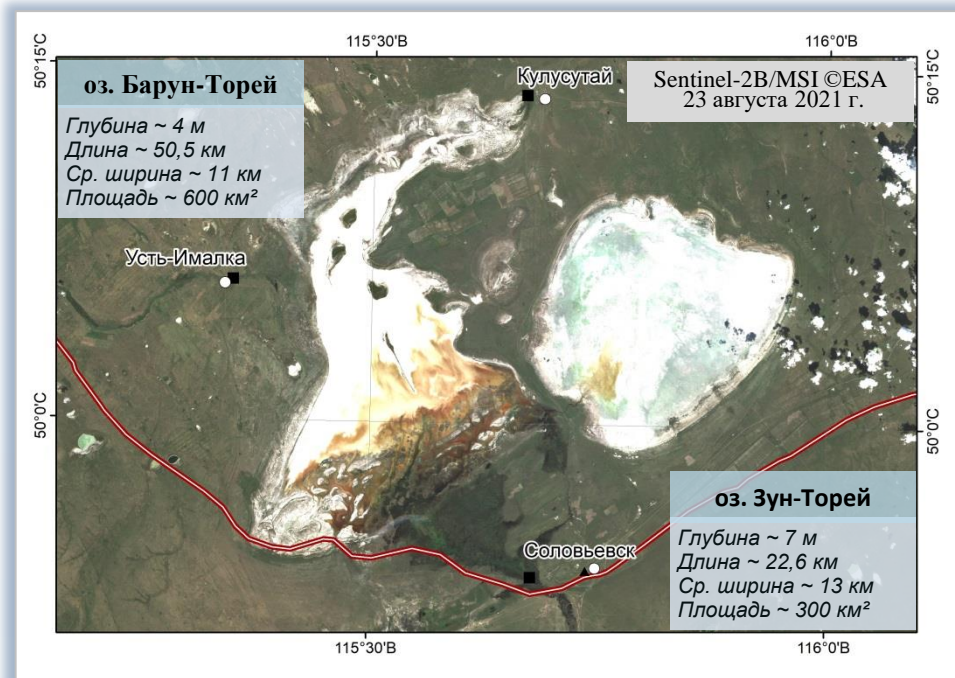
Кашницкая М.А., Болгов М.В.

14-18 ноября 2022 г.



АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория исследования



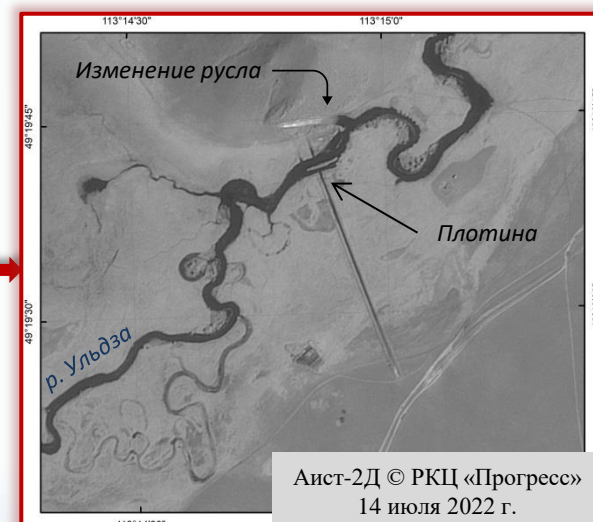
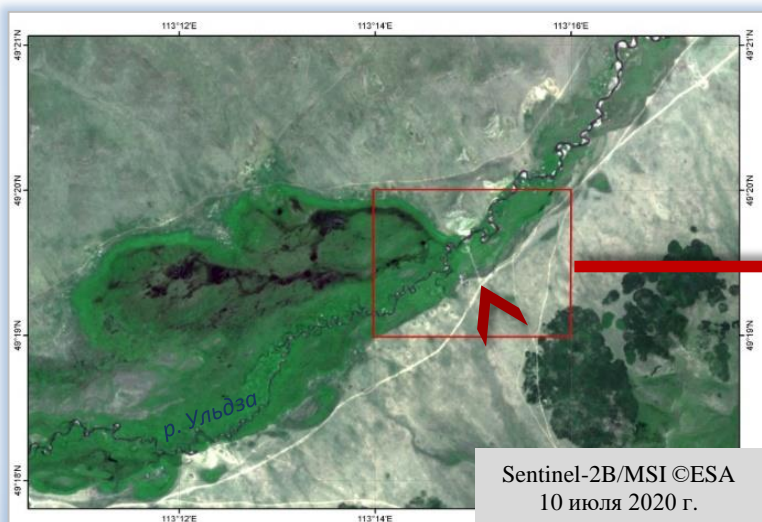
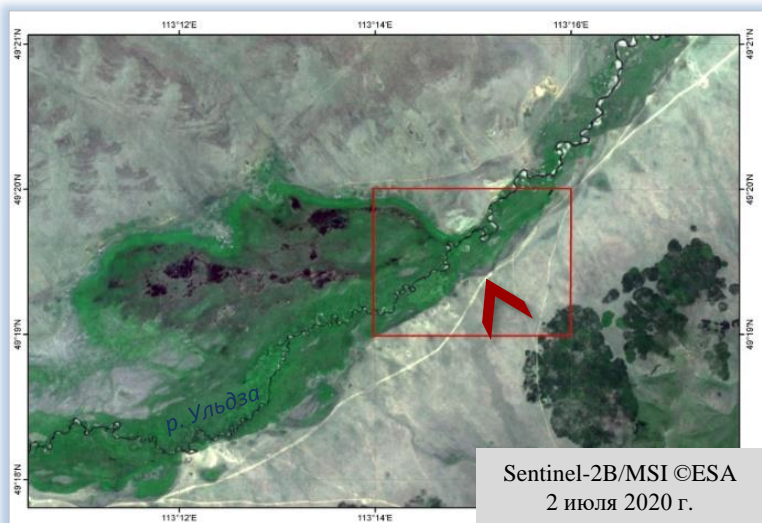
- Бессточные Торейские озера, соединенные протокой
- Непостоянный гидрологический режим, обусловленный изменениями климата
- Основа государственного природного биосферного заповедника «Даурский»
- Через Торейские озера проходит Восточно-Азиатско-Австралийский путь миграции десятков видов перелётных птиц
- Являются местообитанием большого количества редких птиц, занесенных в Красную книгу
- Включены в список Всемирного наследия ЮНЕСКО и имеют статус водно-болотных угодий международного значения в соответствии с Рамсарской конвенцией



АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Строительство водохранилища на территории монгольской части бассейна р. Ульдза

В июле 2020 г. в бассейне Торейских озер, на монгольской части реки Ульдза, обнаружено гидротехническое сооружение в начальной стадии строительства. Строительство предусмотрено проектом «План управления бассейном реки Ульдза-Гол», в результате которого планируется создание каскада водохранилищ в бассейне реки, регулирующих ее сток. Создание водохранилища началось без согласования с российской стороной.





АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Доступные сведения об уровненом режиме Торейских озер



Гидрологические наблюдения за уровнем озер

- оз. Барун-Торей – с. Кулусутай
- **1965-1978 гг.**



Спутниковый мониторинг Земли

- Данные космических аппаратов серий Landsat, Sentinel-2
- **1989-2020 гг.**



Гидрометеорологические наблюдения

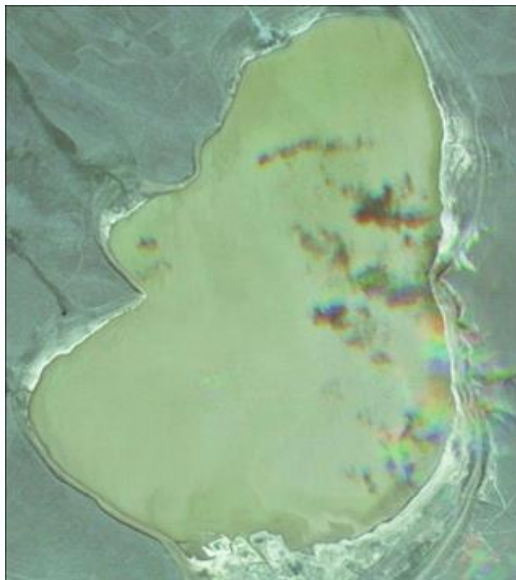
- р. Ульдза – ст. Соловьевск, р. Ималка – н.п. Красная Ималка, мст. Соловьевск
- **1965-2018 гг.**



Восстановление уровенного режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных измерений

Выбор оптимального метода дешифрирования границ водной поверхности Торейских озер с использованием данных ДЗЗ

Эталонные данные
(визуальное
дешифрирование водной
поверхности)



КА Канопус-В №1
(разрешение 2,1 м)
13.06.2019



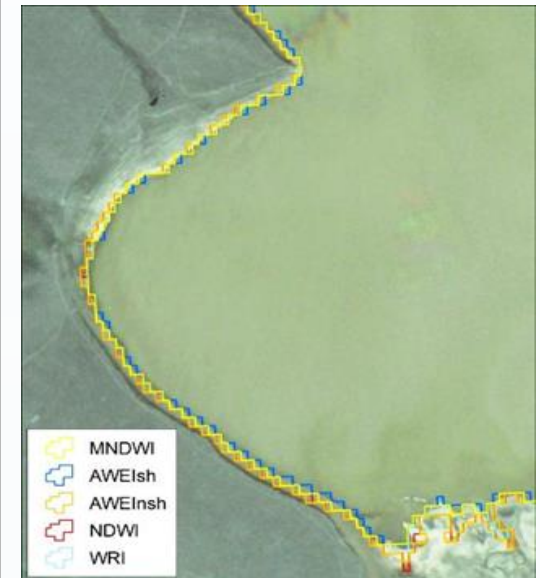
Автоматизированное
дешифрирование
(вычисление
спектральных индексов)



КА Landsat 8
(разрешение 30 м)
10.06.2019



Сопоставление границ
«суша-вода», полученных
по данным спектральных
индексов и эталонных
данных





Восстановление уровня режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных измерений

Выбор оптимального метода дешифрирования границ водной поверхности Торейских озер с использованием данных ДЗЗ

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

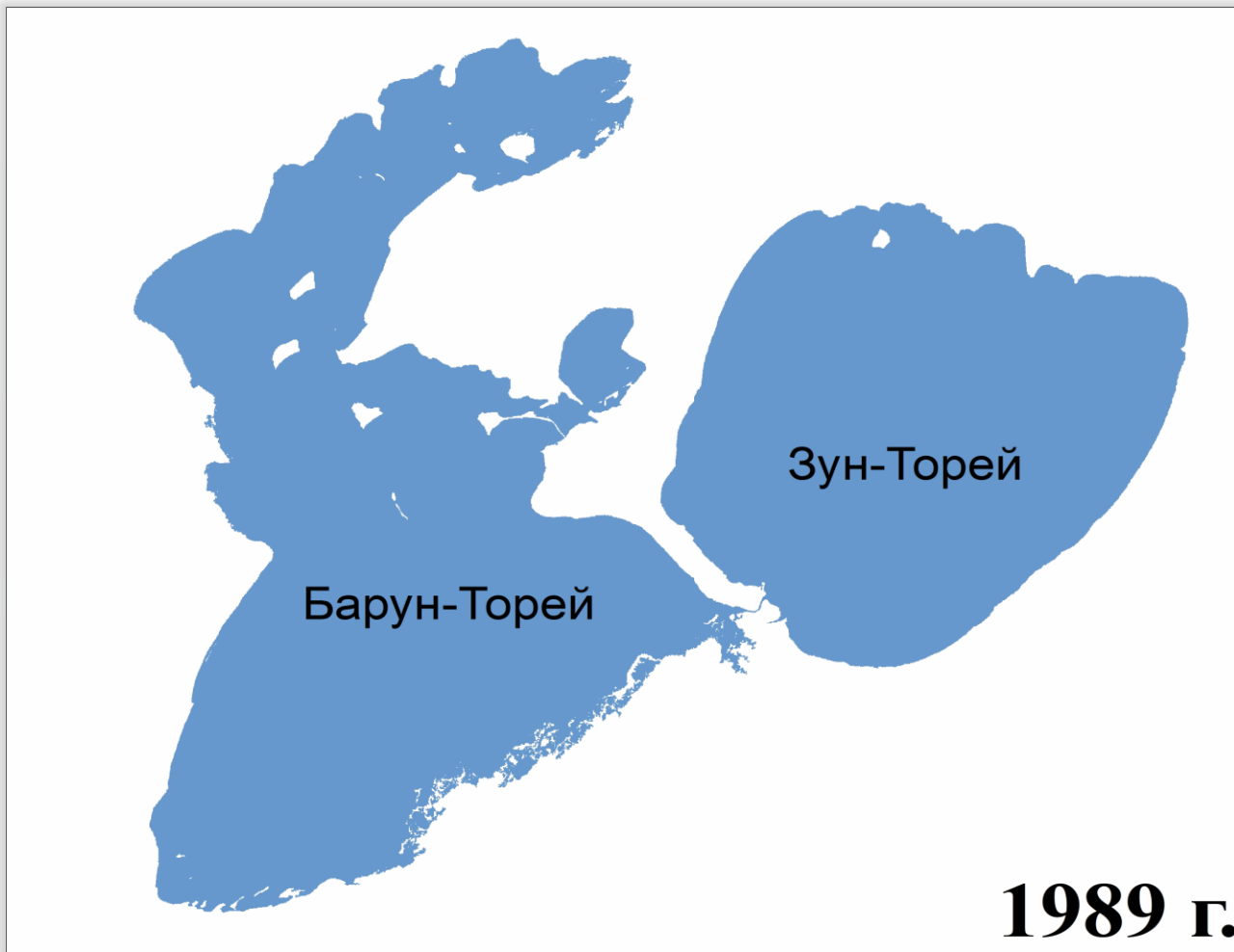
Оценка точности дешифрирования спутниковых изображений производилась с использованием величины погрешности измерений:

$$\Delta S = \frac{S_{i,э} - S_{i,д}}{S_{i,э}} \times 100$$



Восстановление уровенного режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных измерений

Пространственно-временная изменчивость Торейских озер за период с 1989 по 2020 гг.



По спутниковым изображениям Земли определена площадь водного зеркала Торейских озер на основе наиболее точно определяющего поверхность водного зеркала спектрального индекса MNDWI, рассчитываемого по формуле:

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

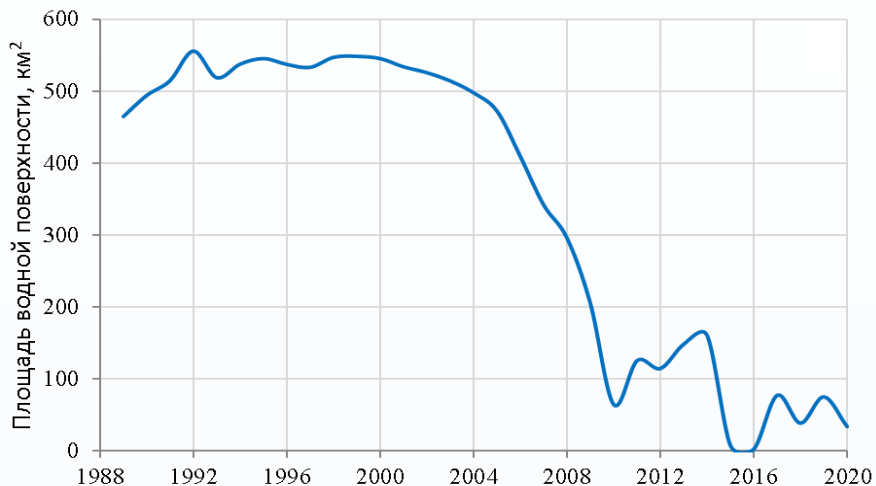
green – отражение в зеленом участке спектра;
swir – отражение в коротковолновом инфракрасном участке спектра.



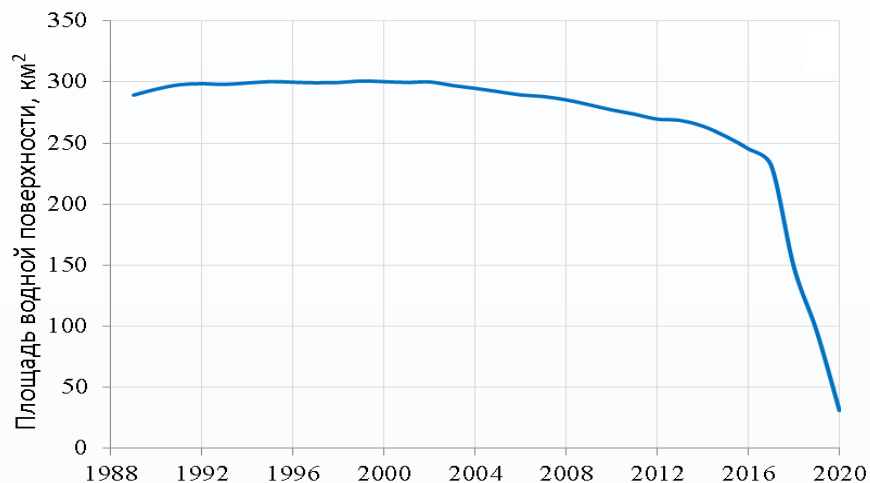
Восстановление уровня режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных измерений

Изменение площади водного зеркала Торейских озер за период с 1989 по 2020 гг.

оз. Барун-Торей



оз. Зун-Торей



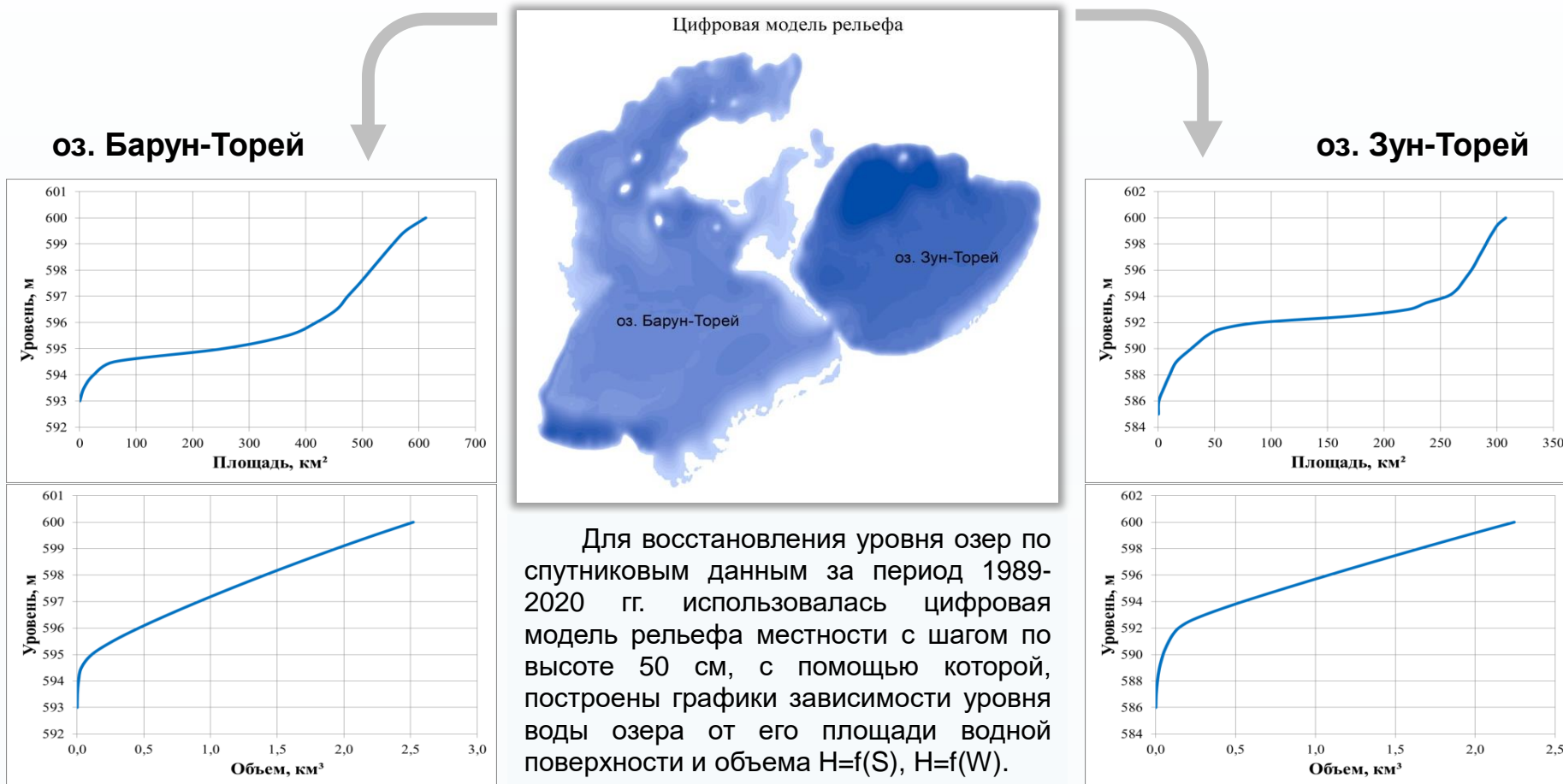
Высокая сезонная изменчивость водности озер





Восстановление уровенного режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных измерений

Построение морфометрических зависимостей

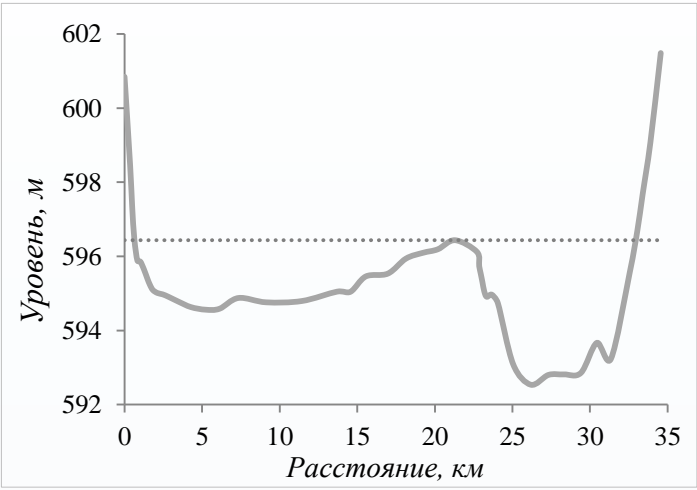
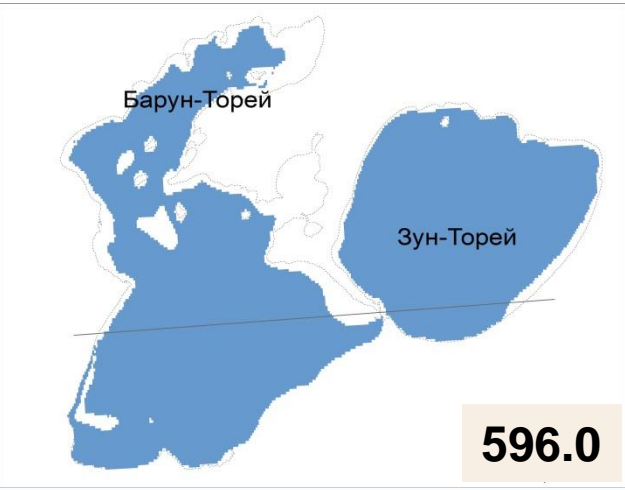


Оценка точности восстановления уровней озер данным методом составила в среднем 4,2 см

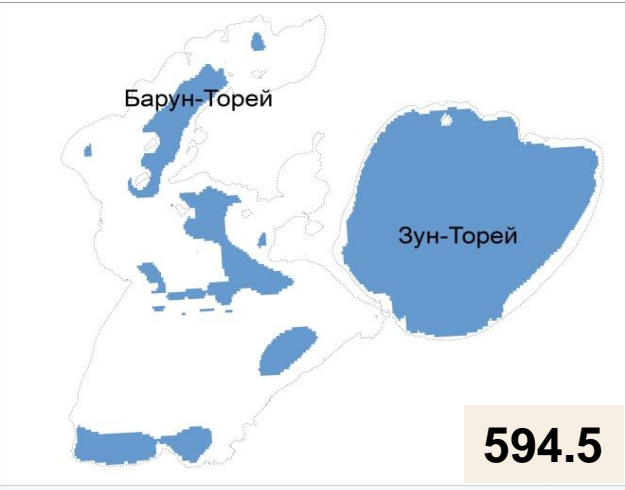
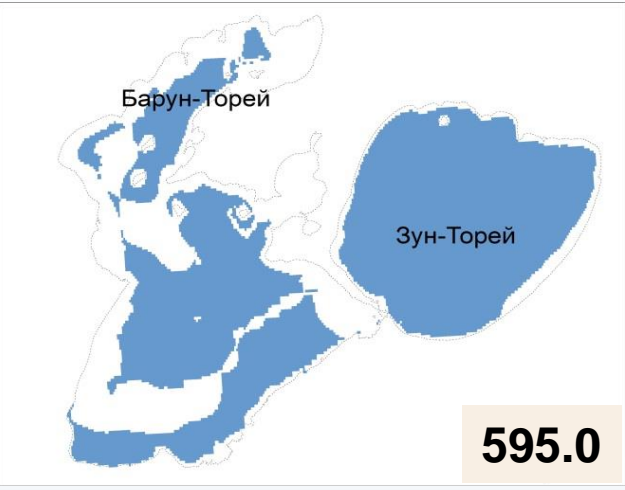


Восстановление уровенного режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных измерений

Особенности котловины Торейских озер при различных уровнях воды (м БС)



Поперечный профиль рельефа Торейских озер



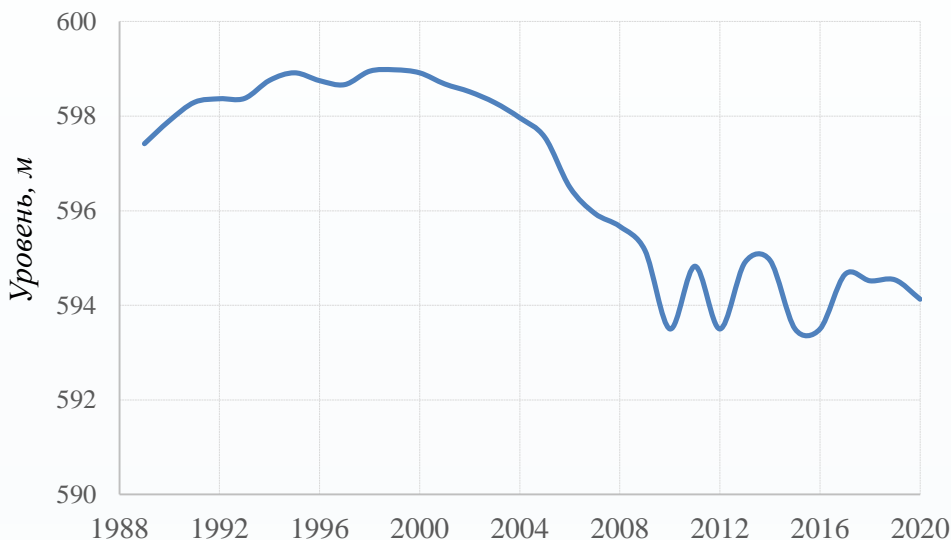
При уровнях ниже 595 м для оз. Барун-Торей и 593 м для оз. Зун-Торей в котловинах озер наблюдается мелководье, озера могут считаться высохшими.



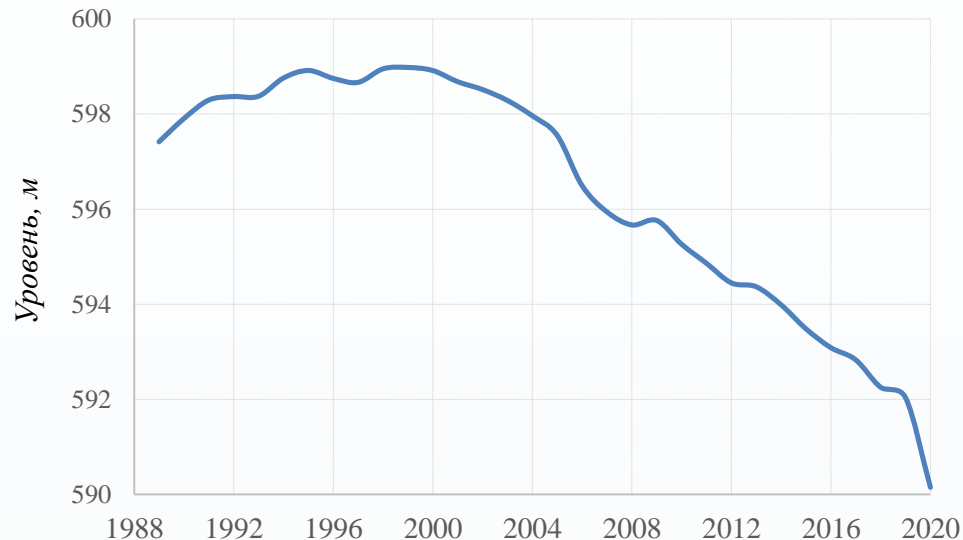
Восстановление уровня режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных измерений

Многолетнее изменение уровня воды Торейских озер за период с 1989 по 2020 гг.

оз. Барун-Торей



оз. Зун-Торей



По спутниковой информации наблюдается рост уровня озера Барун-Торей в период с 1989 по 1999-2000 гг. Период с 2001 по 2020 гг. характеризуется понижением уровня озера, вплоть до полного высыхания котловины водоема в 2015-2016 гг.

Озеро Зун-Торей в этот период наполнялось до 1999 г., затем до 2020 г. наблюдается уменьшение уровня озера. Полное пересыхание озера отмечено в 2016-2020 году.



Модель водного баланса Торейских озер

Автоматизированная программа «Water balance model of the Torey lakes»

Уравнение водного баланса для бессточных водоемов за годовой интервал времени:

$$P + Y - E - Z = \Delta H$$

P – осадки на водную поверхность
(по мст. Соловьевск);

Y – суммарный приток рек Ималка и Ульдза;

E – испарение, рассчитанное по формуле ГГИ;

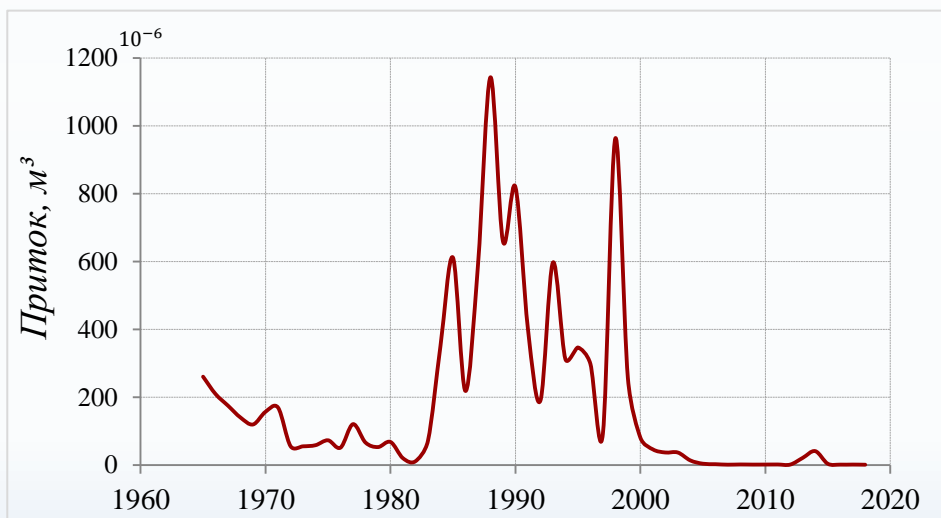
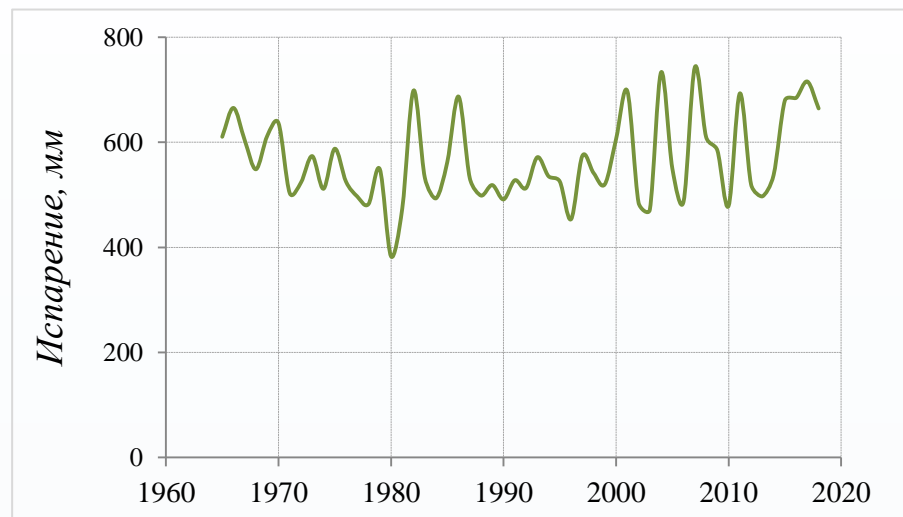
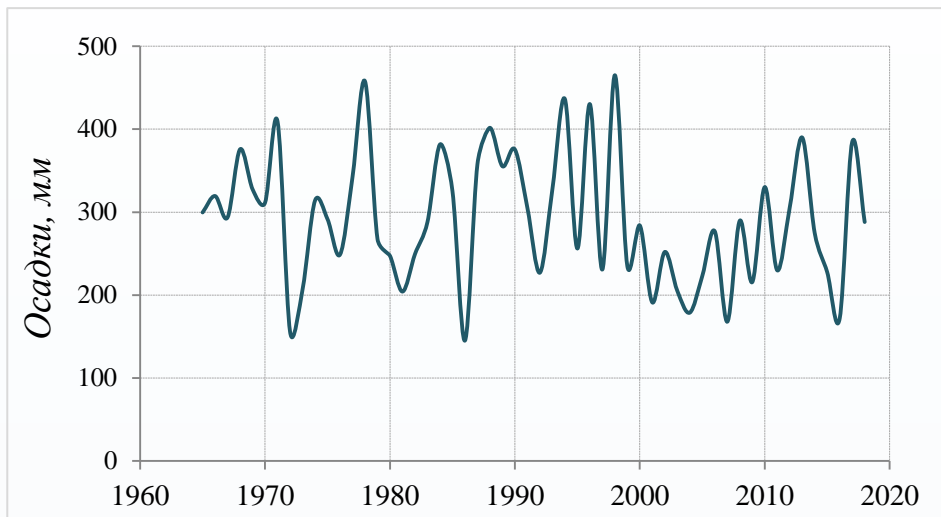
Z – дополнительные потери, учитывающие рассеивание стока.





Модель водного баланса Торейских озер

Материалы гидрометеорологических наблюдений в бассейне Торейских озер



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

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

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

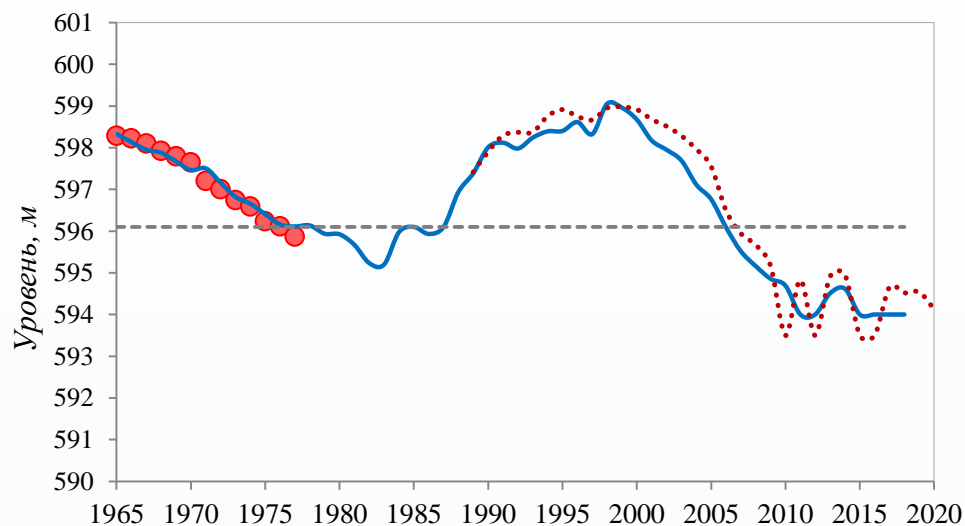
u_{200} – среднее значение скорости ветра над водоемом на высоте 200 см.



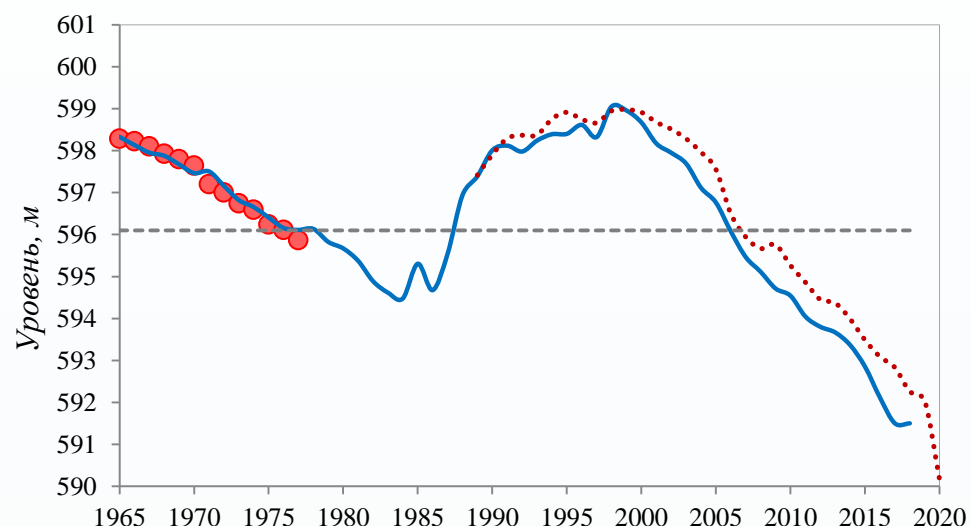
Модель водного баланса Торейских озер

Многолетнее изменение уровня режима Торейских озер за период с 1965 по 2018 гг.

оз. Барун-Торей



оз. Зун-Торей



● данные наземных измерений

..... восстановленные по данным ДЗЗ

— восстановленные методом водного баланса

----- уровень протоки

В процессе калибровки модели установлены поправочные коэффициенты, которые заключаются в увеличении испарения на 5 % и уменьшении притока на 28 %, что хорошо объясняется характерной для исследуемой территории потерей воды на рассеивание стока.



Гидрологический режим Торейских озер в естественных и нарушенных условиях

Моделирование составляющих уравнение водного баланса Торейских озер

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

Параметры распределения вероятностей основных гидрологических характеристик за период 1965-2018 гг. в бассейне Торейских озер

Гидрологическая характеристика	Параметры распределения			
	Среднее	Cv	Cs	r(1)
Приток к Торейским озерам	186,4 *10 ⁶ м ³	1,39	2,02	0,61
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

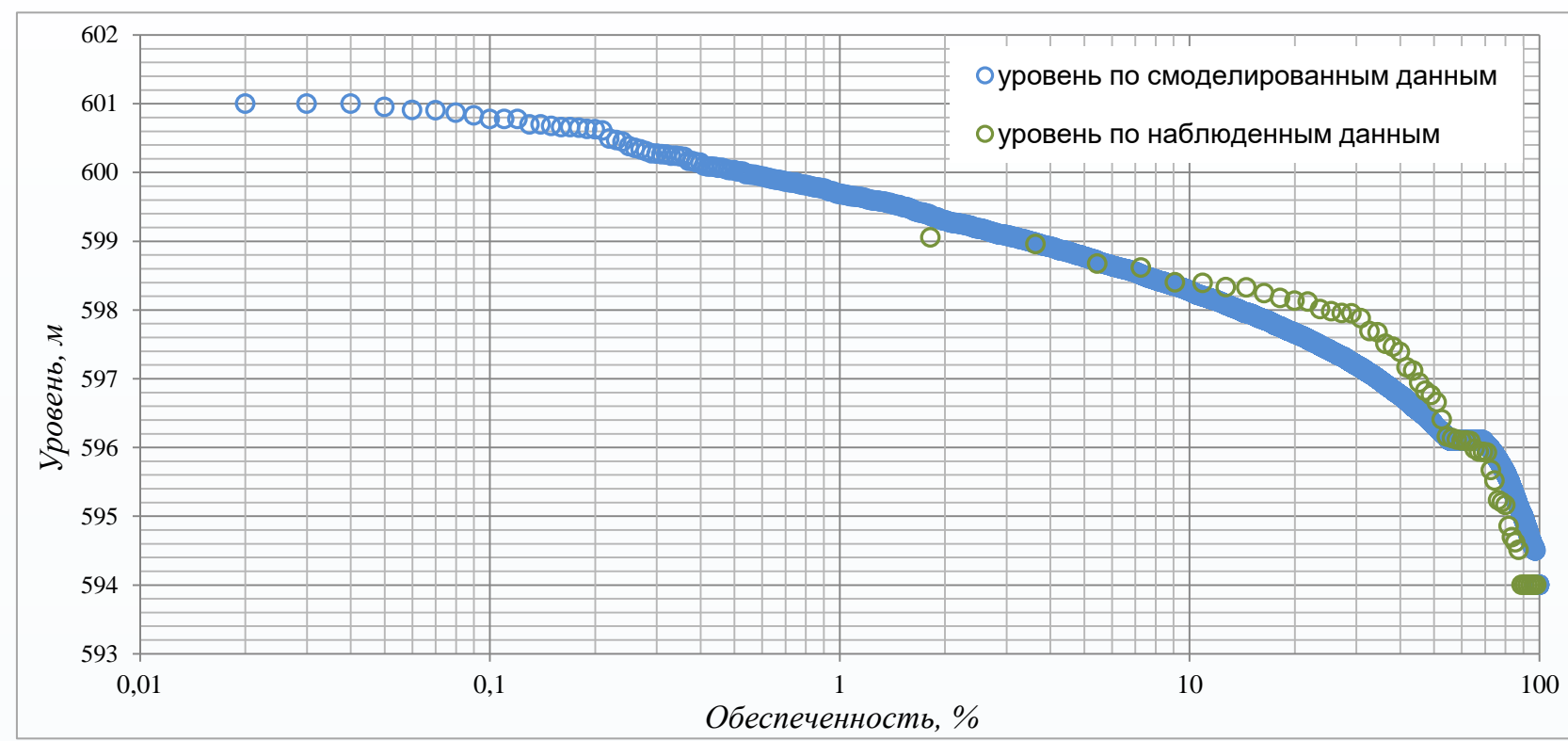
Параметры распределения вероятностей рядов годового притока Торейских озер за разные фазы цикла водности

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



Гидрологический режим Торейских озер в естественных и нарушенных условиях

Совмещенные кривые обеспеченности по наблюдаемым, восстановленным и смоделированным данным уровней воды озера Барун-Торей

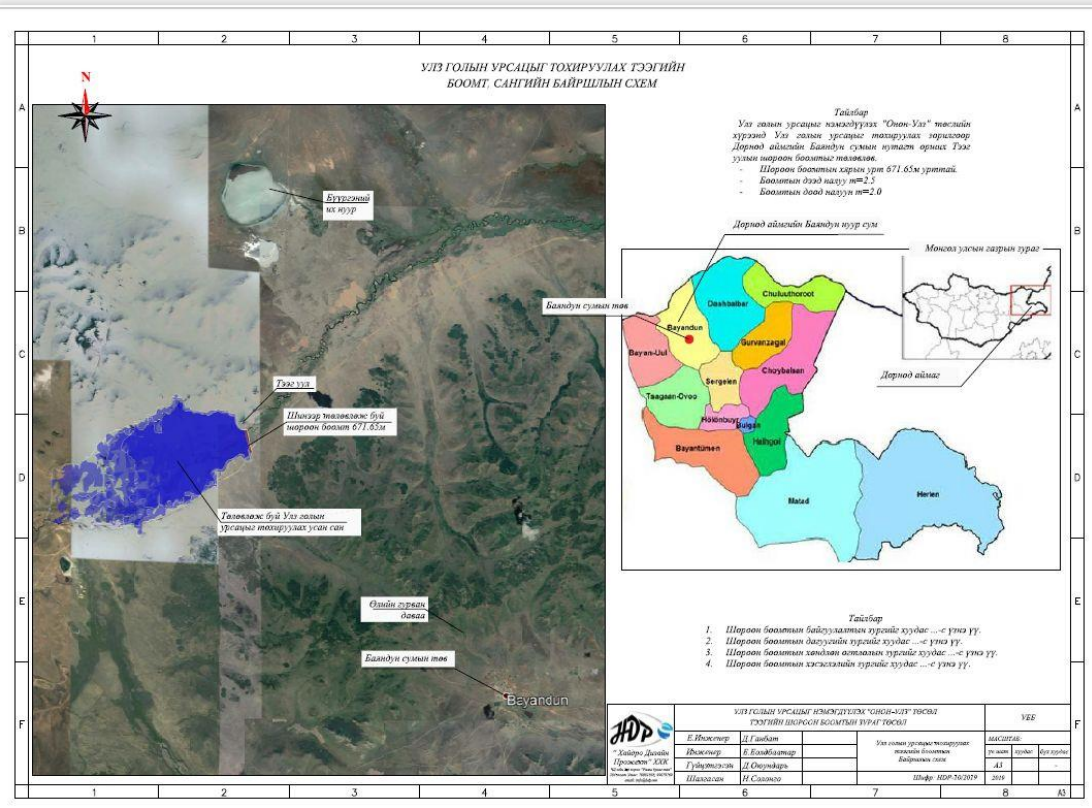


Предложенная имитационная модель хорошо воспроизводит распределение уровней воды в диапазоне, охваченном наблюдениями. Хорошее качество модели позволяет использовать ее для различных гидрологических расчетов, а также выполнения исследований по оценке антропогенного влияния на составляющие водного баланса озер.



Гидрологический режим Торейских озер в естественных и нарушенных условиях

Антропогенная нагрузка на бассейн Торейских озер



Технические характеристики водохранилища:

- ✓ высота ~ 12 м,
- ✓ длина ~ 700 м,
- ✓ объем ~ 27 млн. куб.м,
- ✓ площадь до 10 кв.км.

Цель строительства водохранилища:

- ✓ экологическое восстановление реки Ульдза путем стабилизации стока

В результате строительства водохранилища планируются изъятия водных ресурсов для обеспечения 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.



Гидрологический режим Торейских озер в естественных и нарушенных условиях

Оценка антропогенной нагрузки на бассейн Торейских озер

Безвозвратное водопотребление

$$W_{\text{безвоз}} = K_{\text{безвоз}} \times W_{\text{потр}}$$



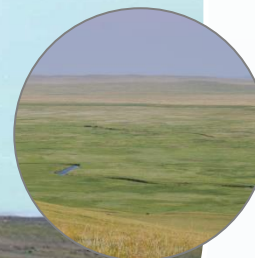
Орошение сельскохозяйственных полей

$$W_{\text{ор}} = q_{\text{ор}} \times F$$



Животноводство

$$W_{\text{ж}} = q_{\text{ж}} \times N$$



Экологический сток
р. Ульдза

0,018 куб. км/год



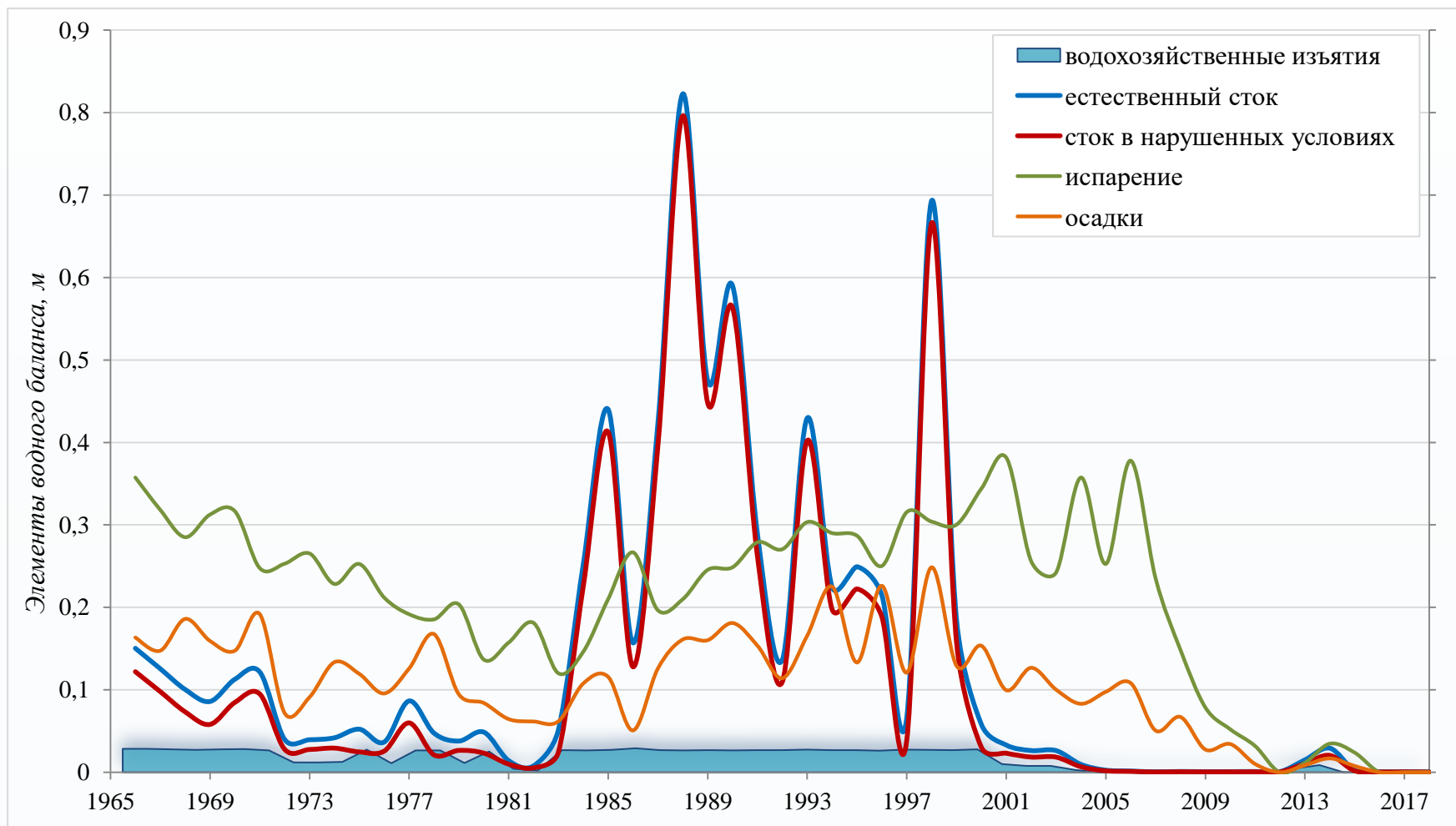
Торейское озеро,

© Официальная группа Даурского заповедника ВК



Гидрологический режим Торейских озер в естественных и нарушенных условиях

Изменение параметров водного баланса Торейских озер





Гидрологический режим Торейских озер в естественных и нарушенных условиях

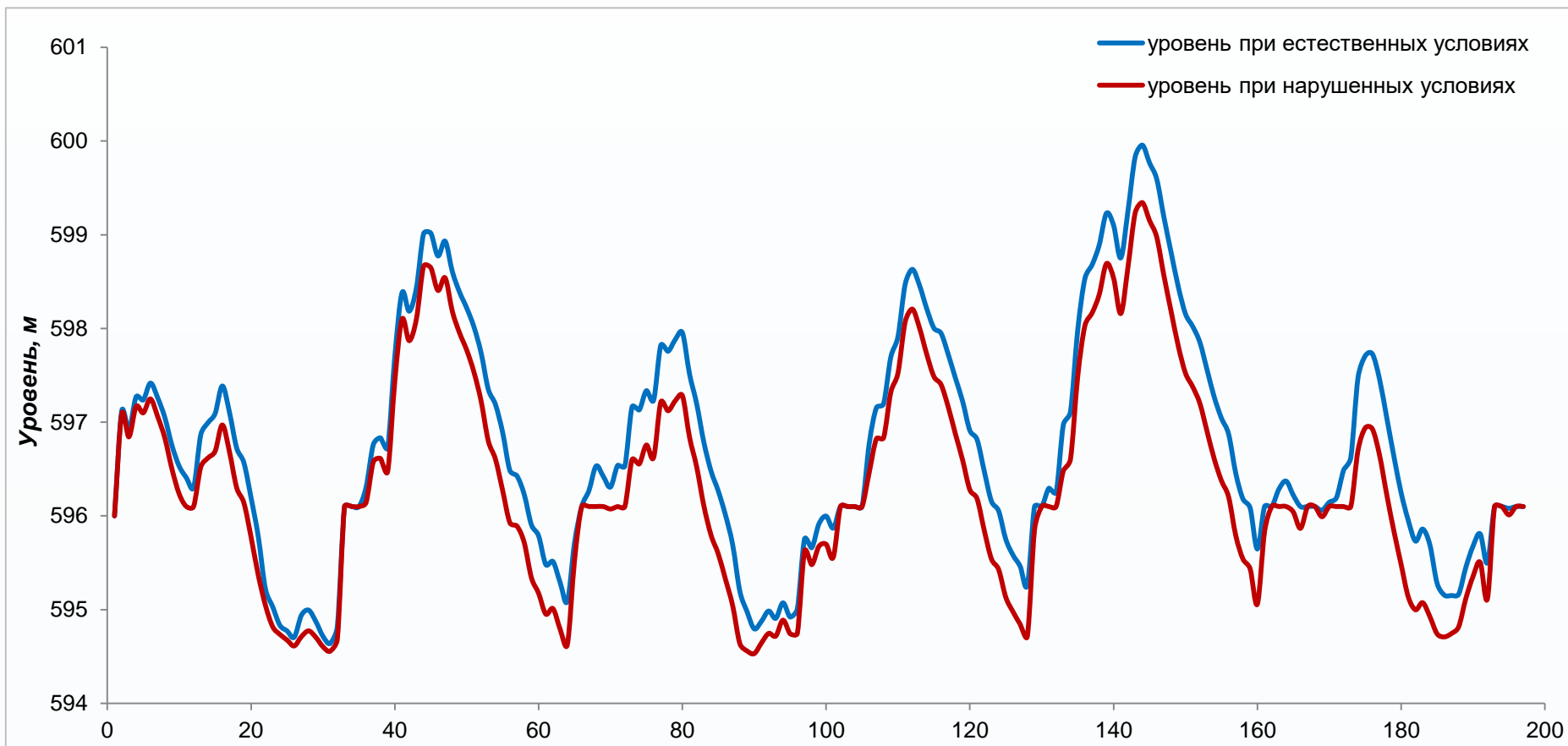
Сценарии изменения водохозяйственной обстановки в бассейне Торейских озер

Вариант расчета	Условия функционирования водохозяйственной системы
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 крупного рогатого скота при норме суточного потребления 51,3 л/сут.
вариант № 3	Расчет уровней производится для маловодной фазы цикла. Учитываются изъятия воды, предусмотренные во втором варианте.



Гидрологический режим Торейских озер в естественных и нарушенных условиях

Изменение уровня воды в озере Барун-Торей



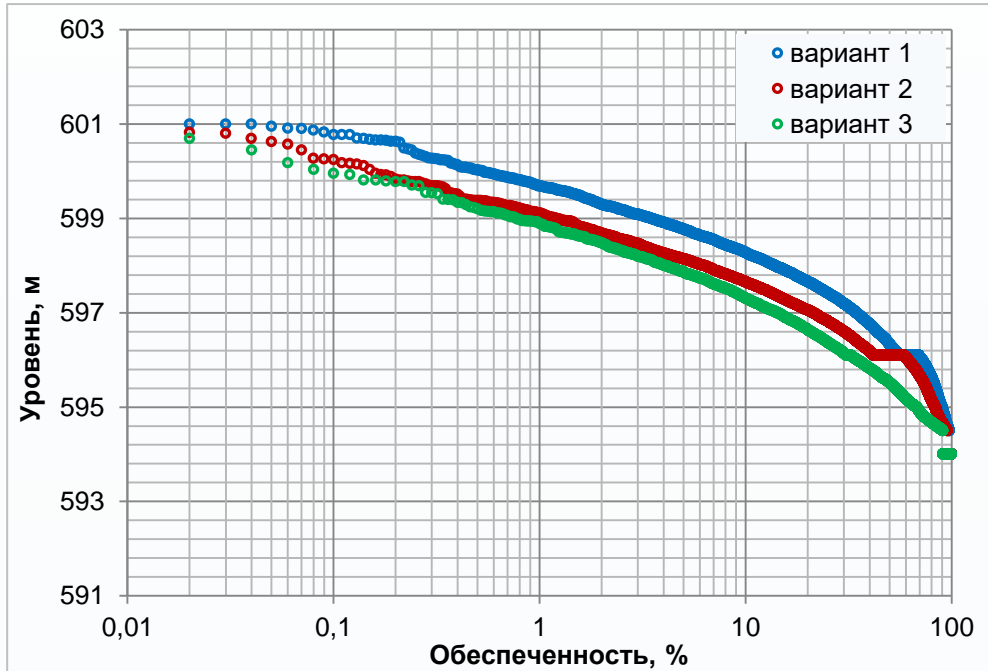
При реализации новых водохозяйственных проектов, сопровождаемых дополнительными безвозвратными потерями стока, уровень воды в Торейских озерах будет ниже, чем при естественных условиях.



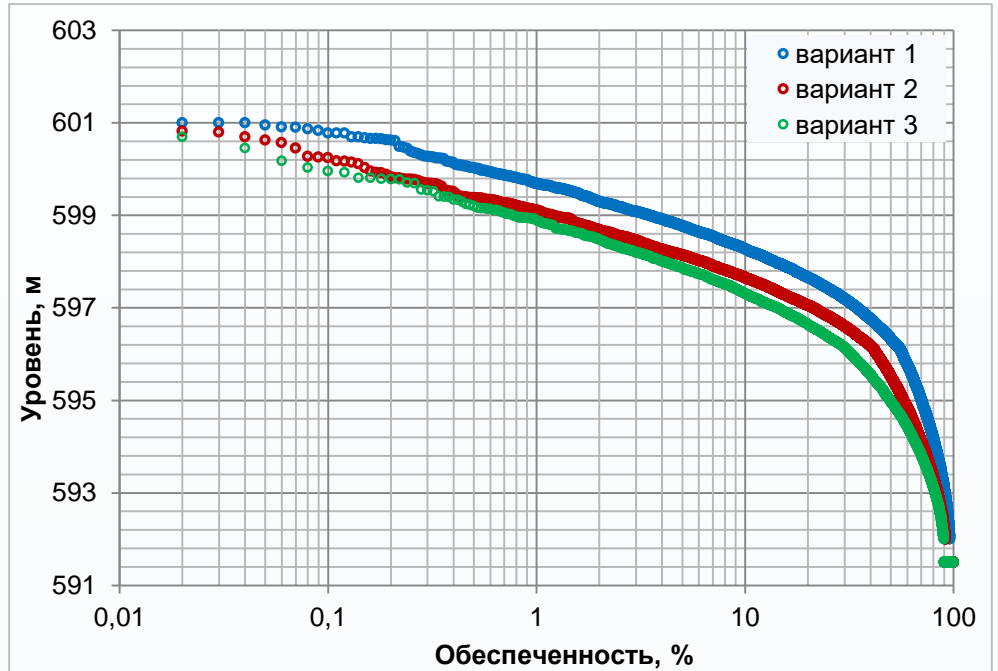
Антропогенная нагрузка на водные ресурсы бассейна Торейских озер

Кривые обеспеченностей уровня Торейских озер

оз. Барун-Торей



оз. Зун-Торей



Анализ результатов имитационных экспериментов показывает, что уменьшение уровня воды составит в озере Барун-Торей в среднем 0,4 м (составляет 8,5% от значений максимального уровня), в Зун-Торей – 0,5 м (7,7%). Наибольшее влияние изъятий воды будет проявляться в периоды малой фазы водности: в озере Барун-Торей понижение уровня составит в среднем 0,7 м (14,9%), в Зун-Торей – 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.



Антропогенная нагрузка на водные ресурсы бассейна Торейских озер

Сокращение площади водного зеркала Торейских озер в соответствии с предложенными сценариями изменения водохозяйственной обстановки на р. Ульдза

Обеспеченность 0,5-1,0 %



Обеспеченность 15 %



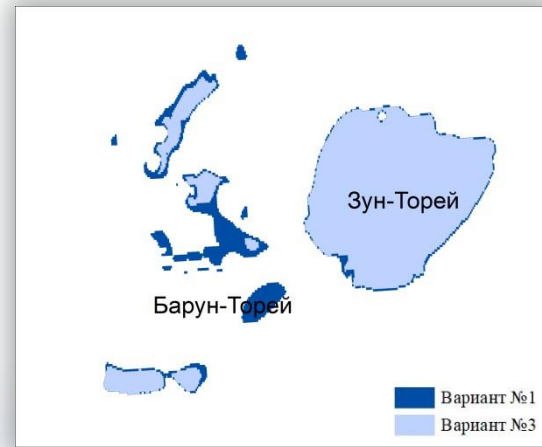
Обеспеченность 50 %



Обеспеченность 75 %



Обеспеченность 95 %





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. Точность определения уровня воды Торейских озер с использованием созданной в работе ЦМР составляет в среднем 4,2 см.
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. Многолетние изменения уровненого режима Торейских озер, полученные на основе созданной в работе модели, хорошо согласуются с данными гидрологических наблюдений и спутниковой информацией. Коэффициент корреляции между значениями уровня по модели и наземными и спутниковыми данными составляет 0,99 и 0,98, соответственно.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.
6. С помощью метода имитационного моделирования на основе цепи Маркова 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 озерах Барун-Торей в среднем 0,4 м (составляет 8,5 % от значений максимального уровня), в Зун-Торей – 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-Торей – 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.



Спасибо за внимание!