

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

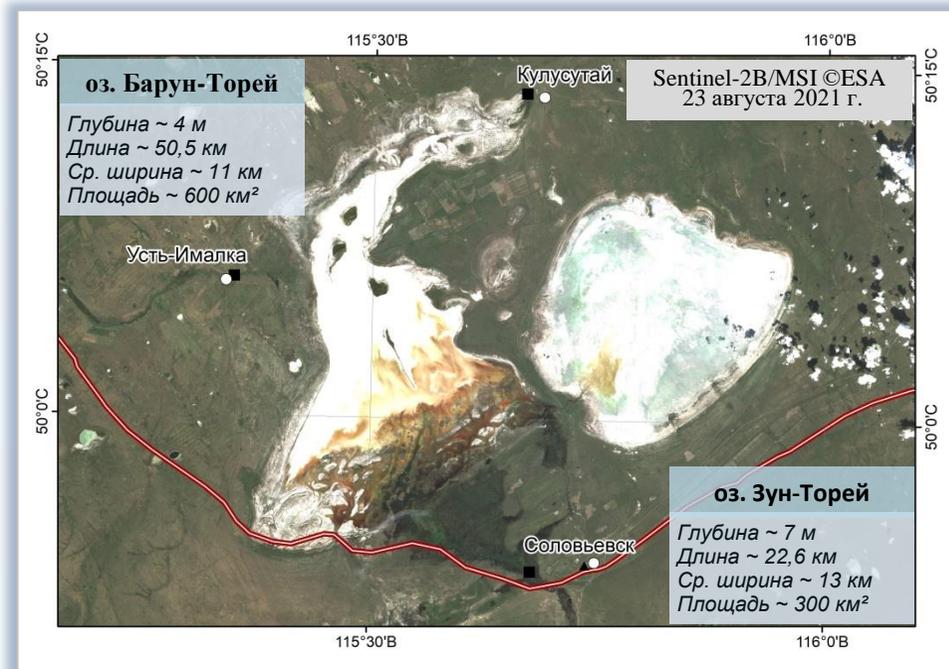
Кашницкая М.А., Болгов М.В.

14-18 ноября 2022 г.



# АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

## Территория исследования



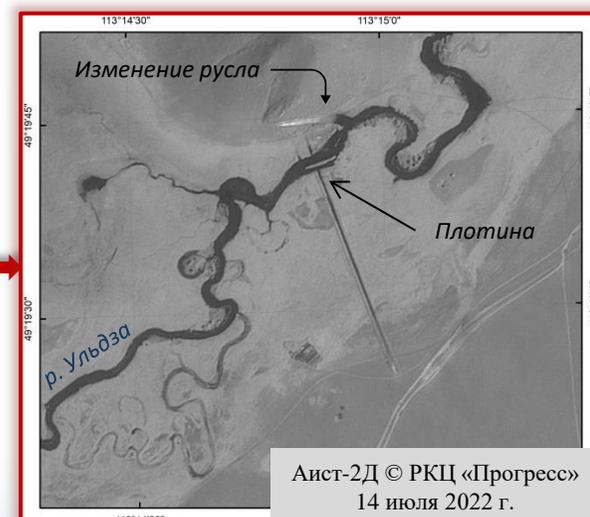
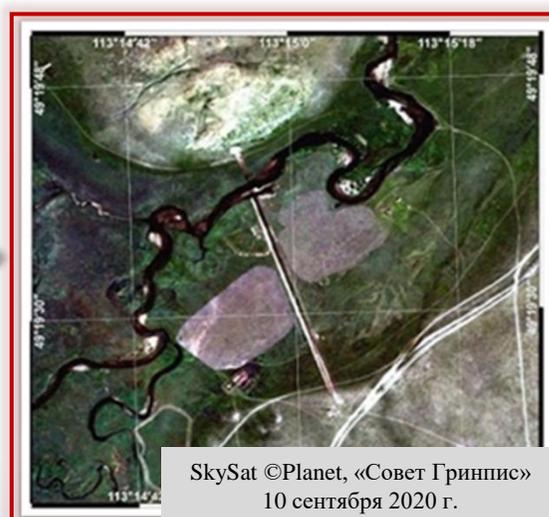
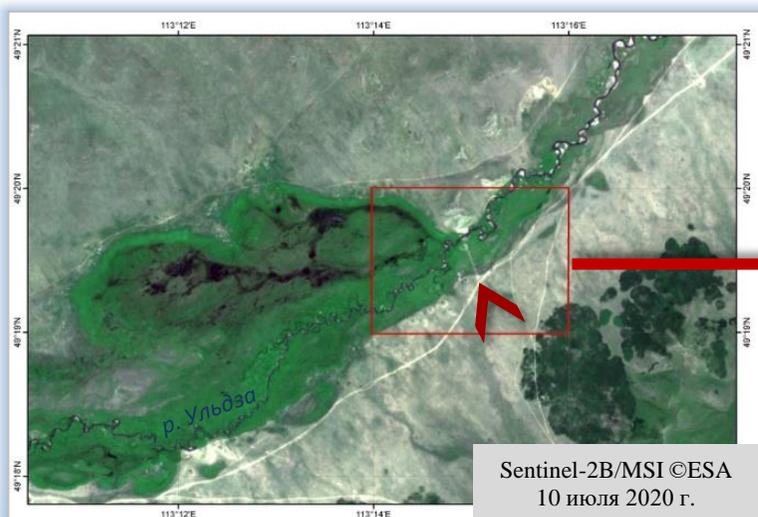
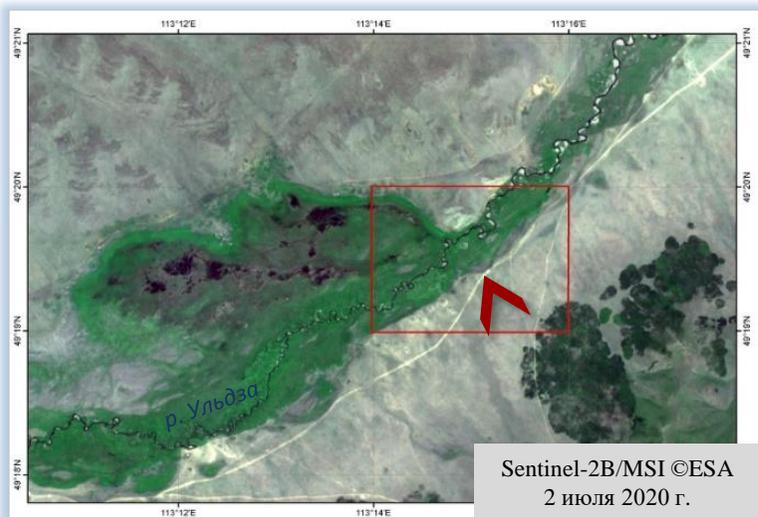
- Бессточные Торейские озера, соединенные протокой
- Непостоянный гидрологический режим, обусловленный изменениями климата
- Основа государственного природного биосферного заповедника «Даурский»
- Через Торейские озера проходит Восточно-Азиатско-Австралийский путь миграции десятков видов перелётных птиц
- 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

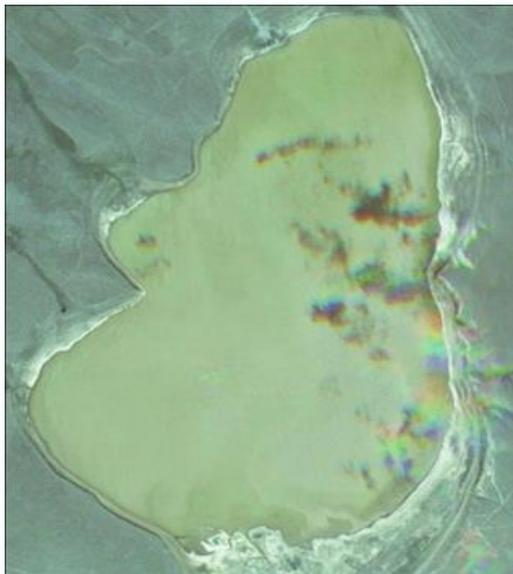
- р. Ульдза – ст. Соловьевск, р. Ималка – н.п. Красная Ималка, мст. Соловьевск
- **1965-2018 гг.**



# 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



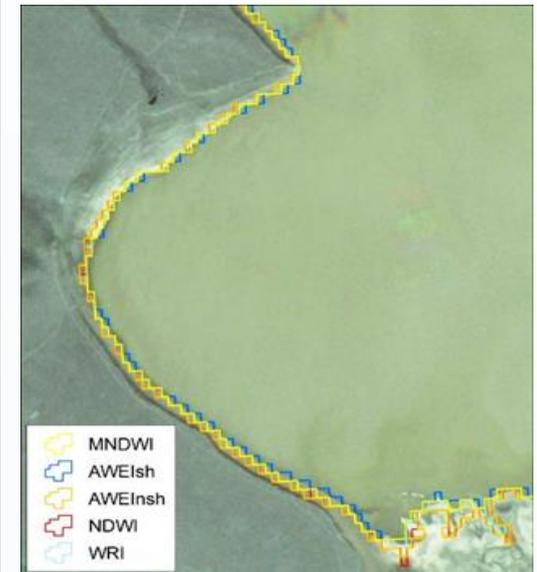
Автоматизированное  
дешифрирование  
(вычисление  
спектральных индексов)



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 <sup>2</sup>					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 <sub>sh</sub>	10,36	9,35	8,96	8,92	8,80	0,59
AWEI <sub>nsh</sub>	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
<b>MNDWI</b>	<b>10,37</b>	<b>9,33</b>	<b>8,99</b>	<b>8,99</b>	<b>8,54</b>	<b>1,07</b>
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

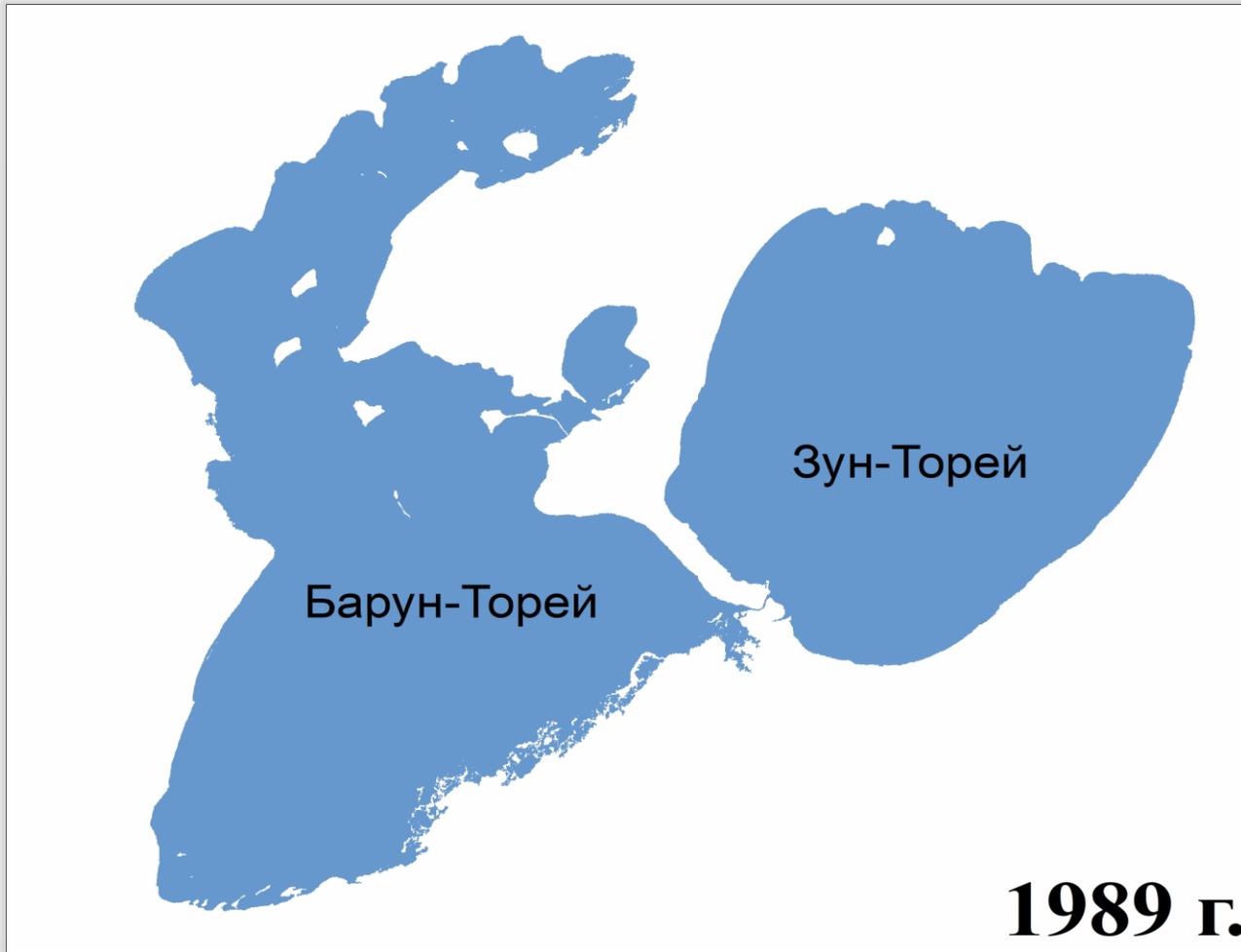
Оценка точности дешифрирования спутниковых изображений производилась с использованием величины погрешности измерений:

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



# 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:

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

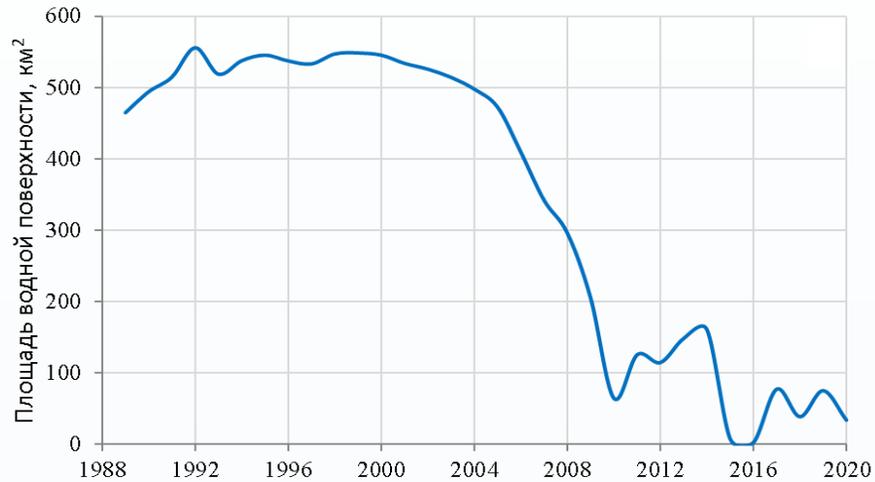
**green** – отражение в зеленом участке спектра;  
**swir** – отражение в коротковолновом инфракрасном участке спектра.



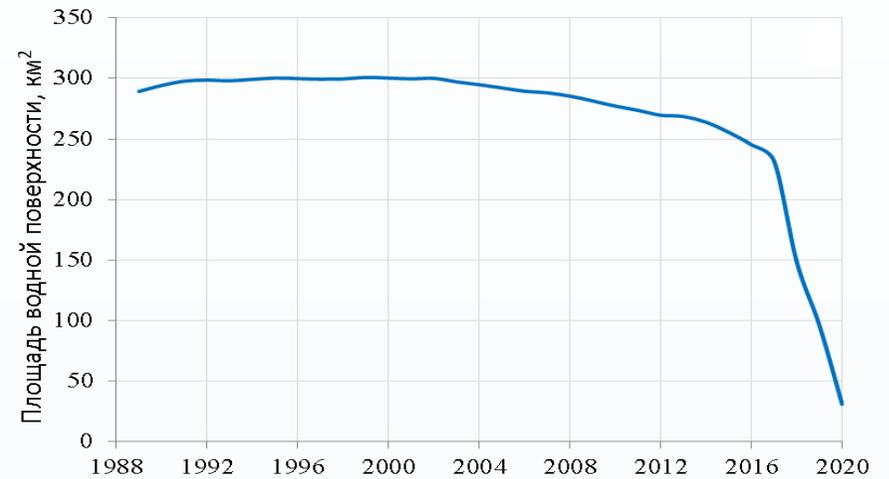
# Восстановление уровня режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных измерений

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

оз. Барун-Торей



оз. Зун-Торей



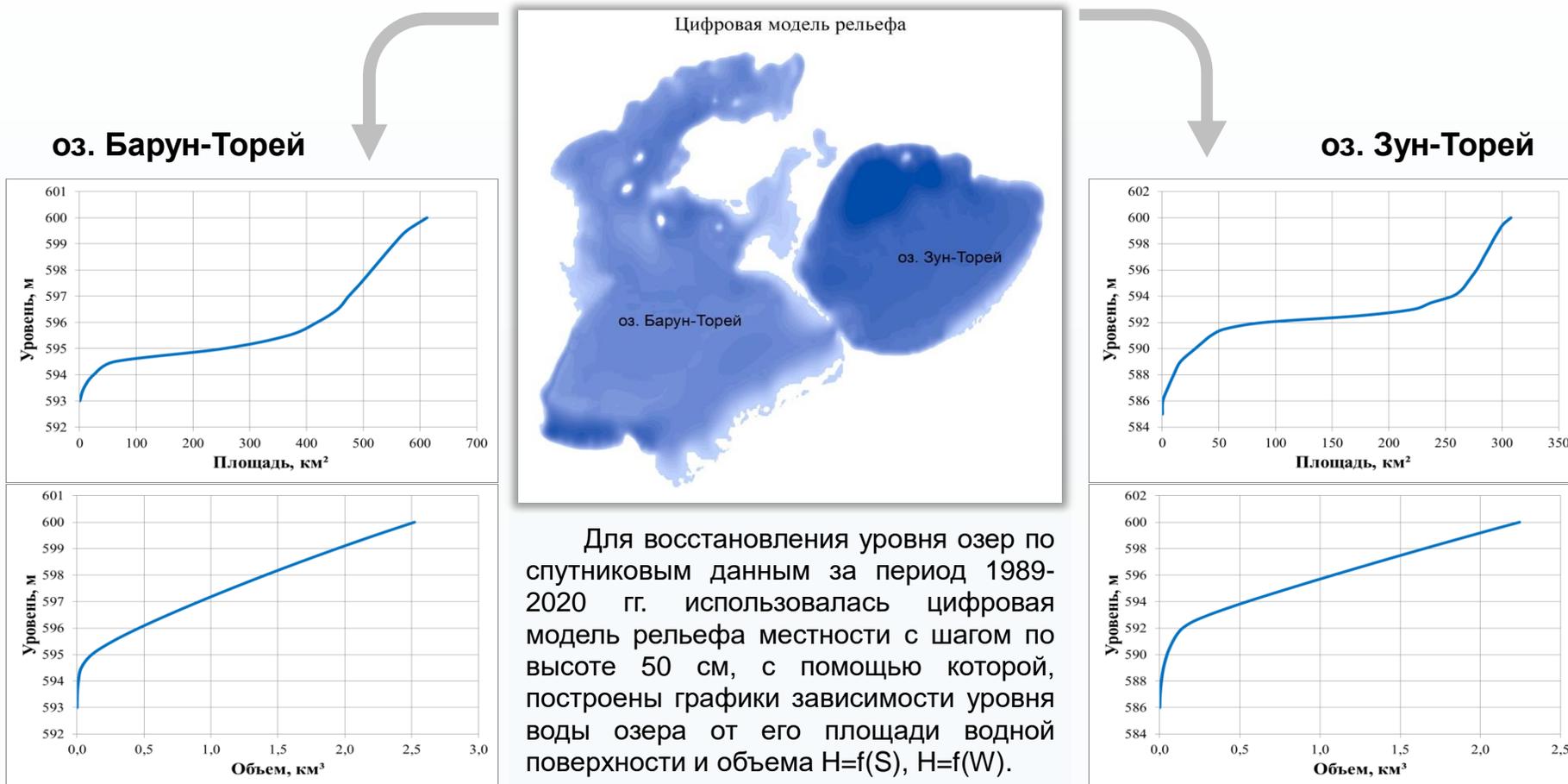
## Высокая сезонная изменчивость водности озер





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

## Построение морфометрических зависимостей

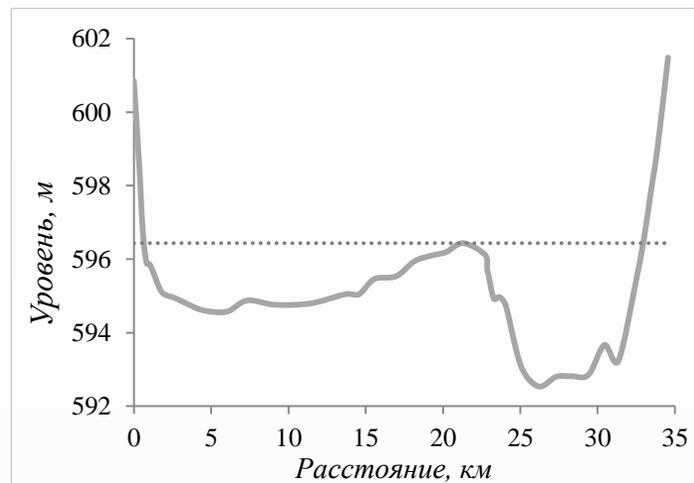


Оценка точности восстановления уровней озер данным методом составила в среднем 4,2 см



# 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

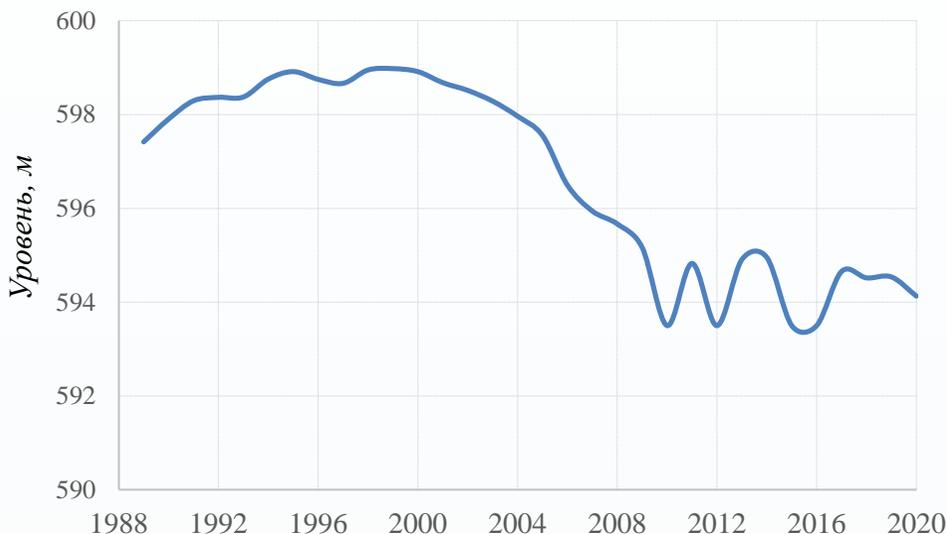
При уровнях ниже 595 м для оз. Барун-Торей и 593 м для оз. Зун-Торей в котловинах озер наблюдается мелководье, озера могут считаться высохшими.



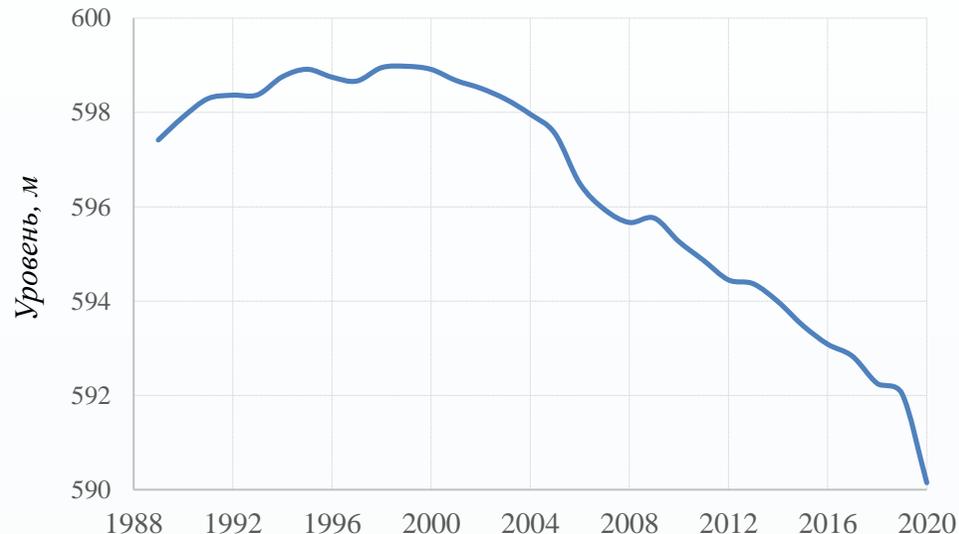
# Восстановление уровня режима Торейских озер по данным ДЗЗ в условиях отсутствия наземных измерений

## 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;

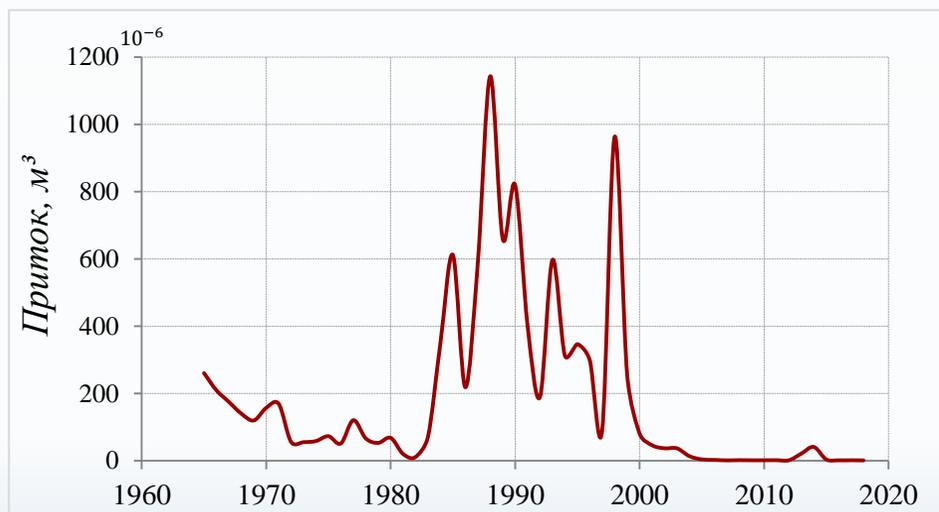
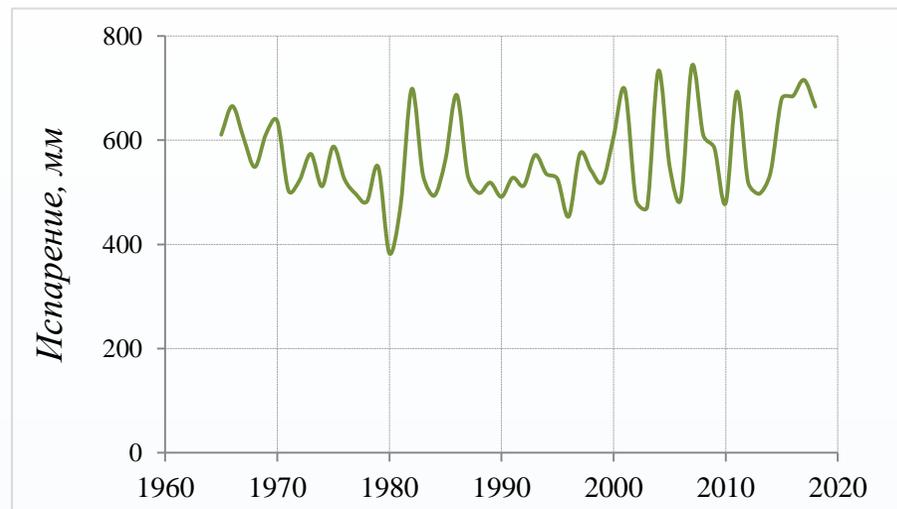
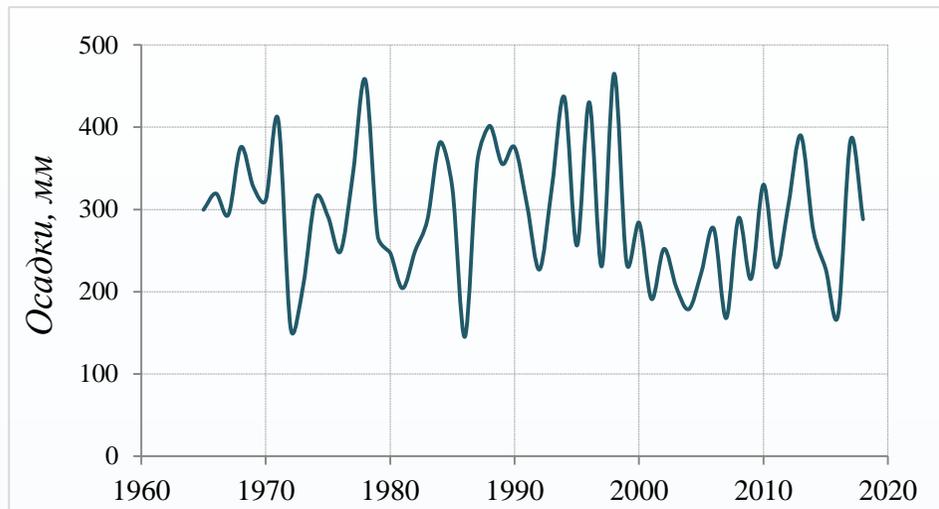
**Z** – дополнительные потери, учитывающие рассеивание стока.





# 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;

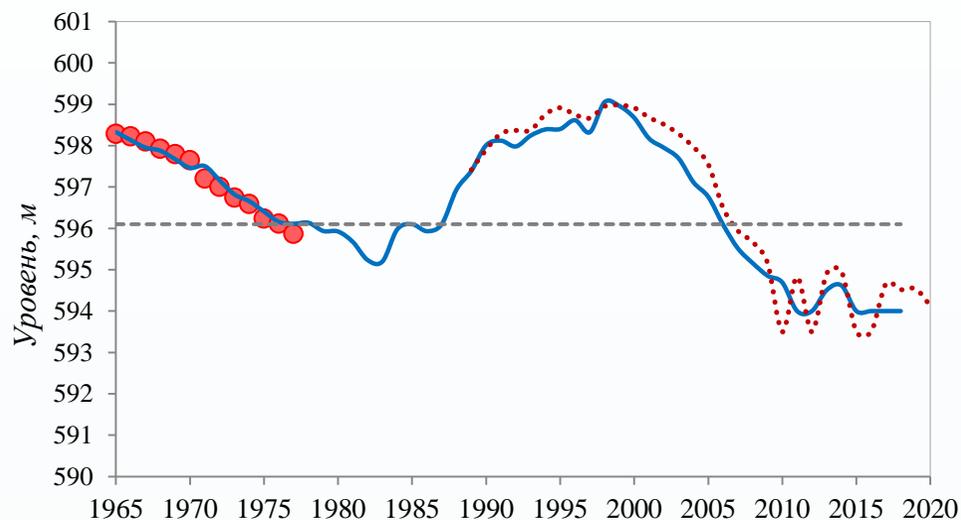
$u_{200}$  – среднее значение скорости ветра над водоемом на высоте 200 см.



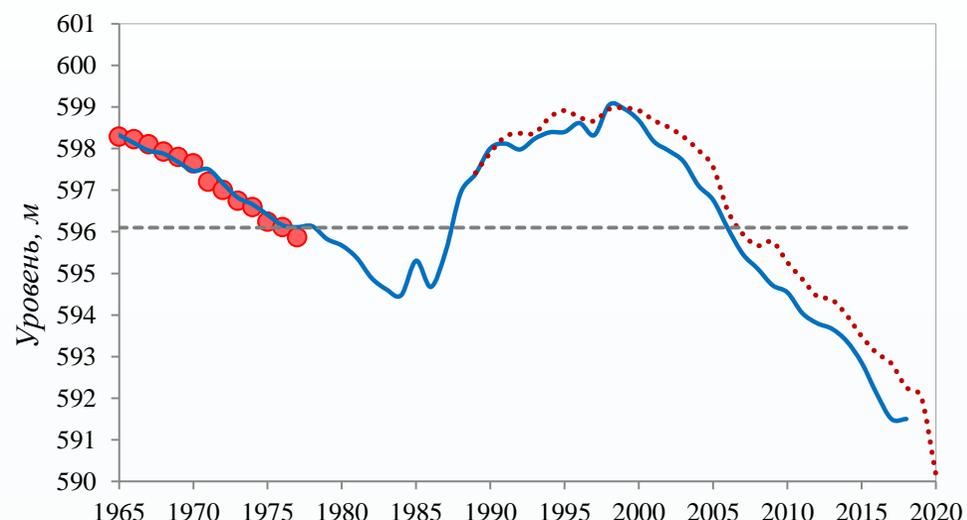
# Модель водного баланса Торейских озер

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 <sup>6</sup> м <sup>3</sup>	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

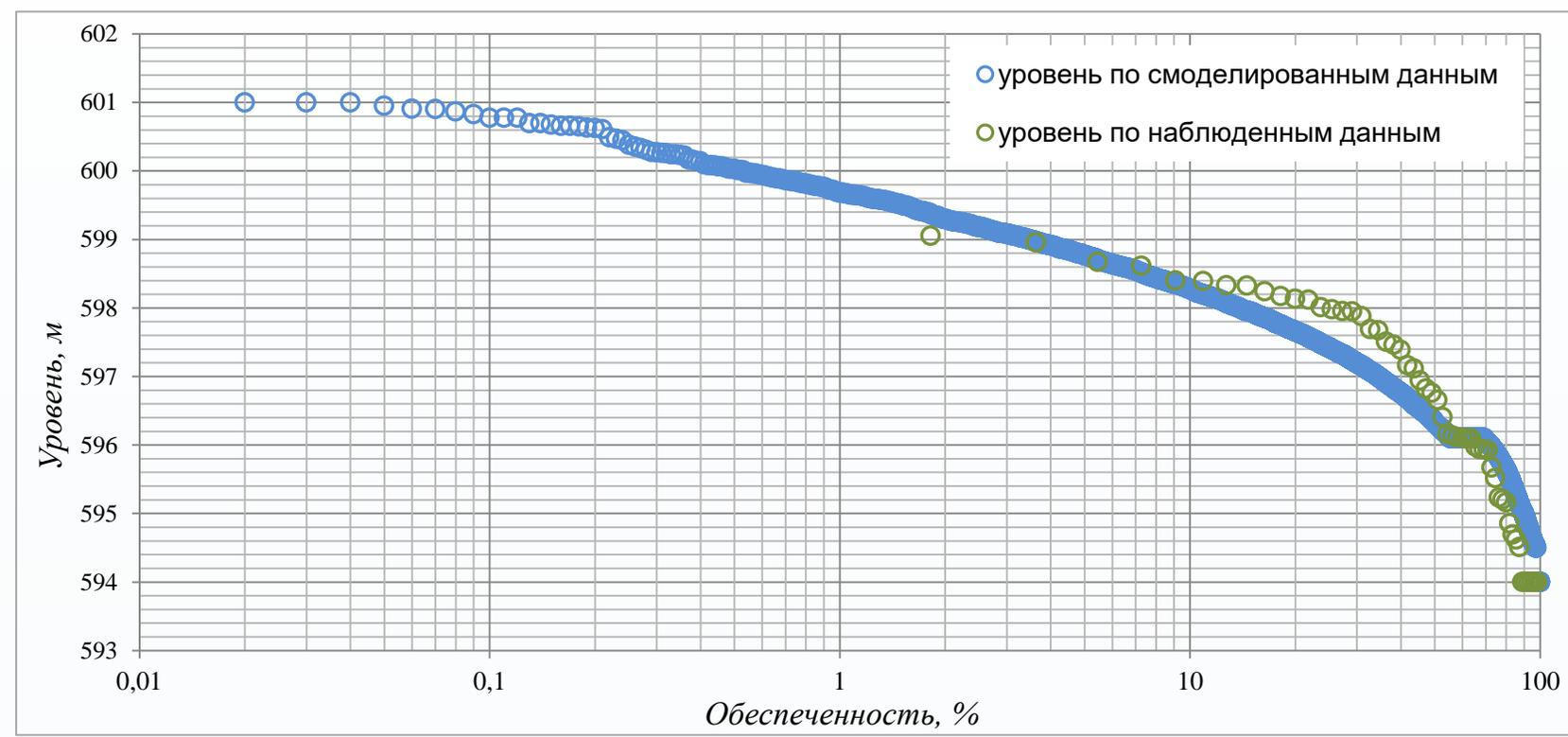
Параметры распределения вероятностей рядов годового притока Торейских озер за разные фазы цикла водности

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

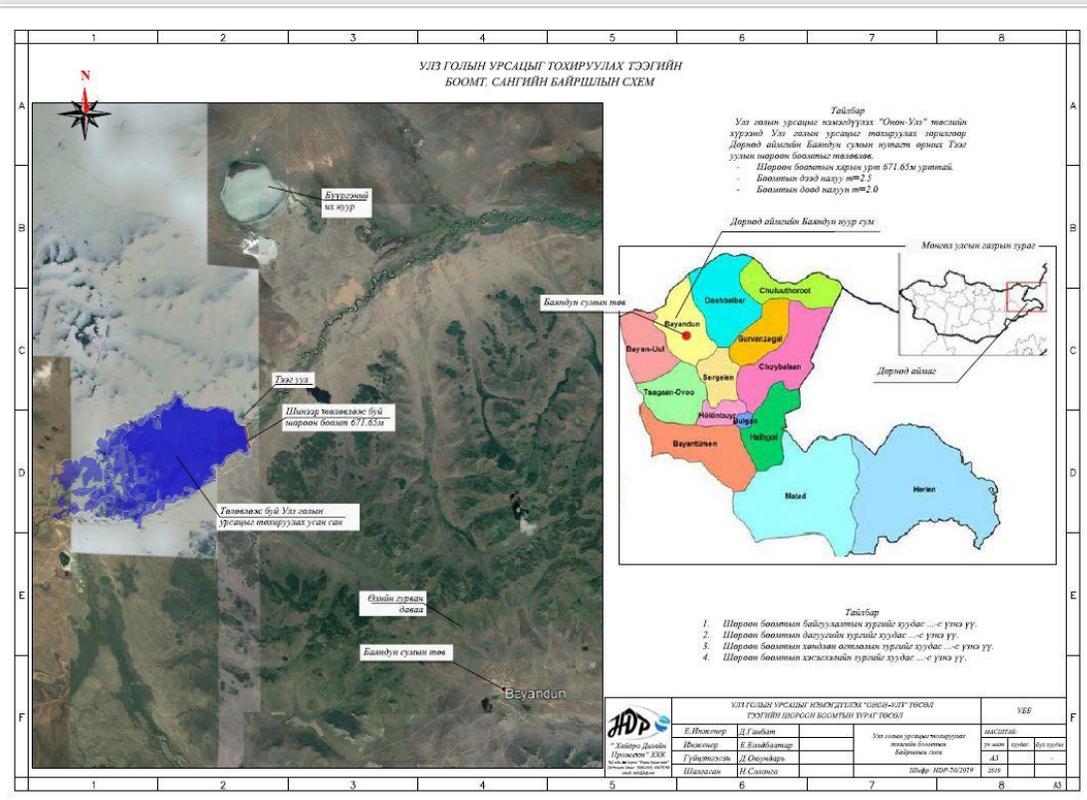


Предложенная имитационная модель хорошо воспроизводит распределение уровней воды в диапазоне, охваченном наблюдениями. Хорошее качество модели позволяет использовать ее для различных гидрологических расчетов, а также выполнения исследований по оценке антропогенного влияния на составляющие водного баланса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



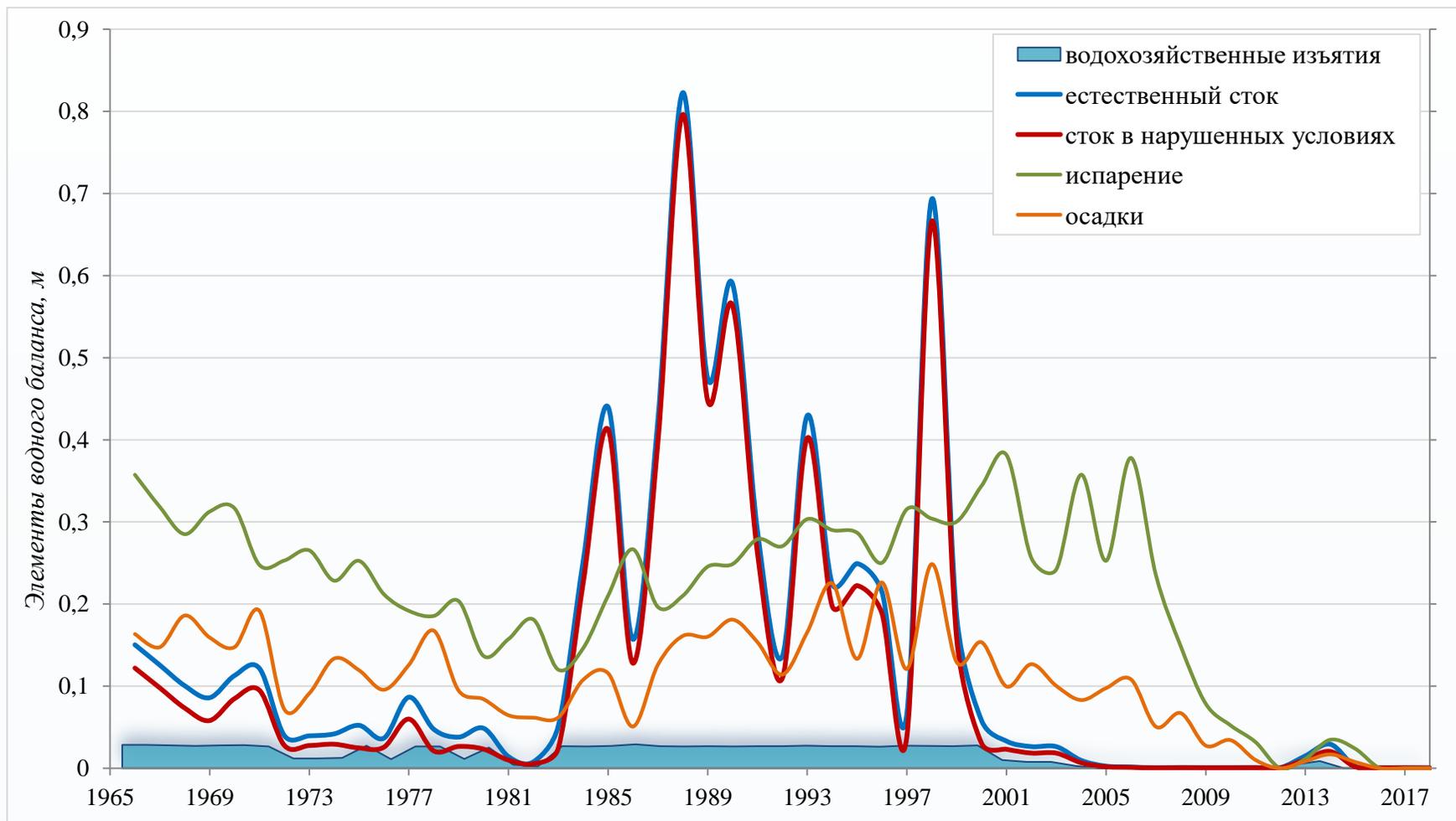
Торейское озеро,

© 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

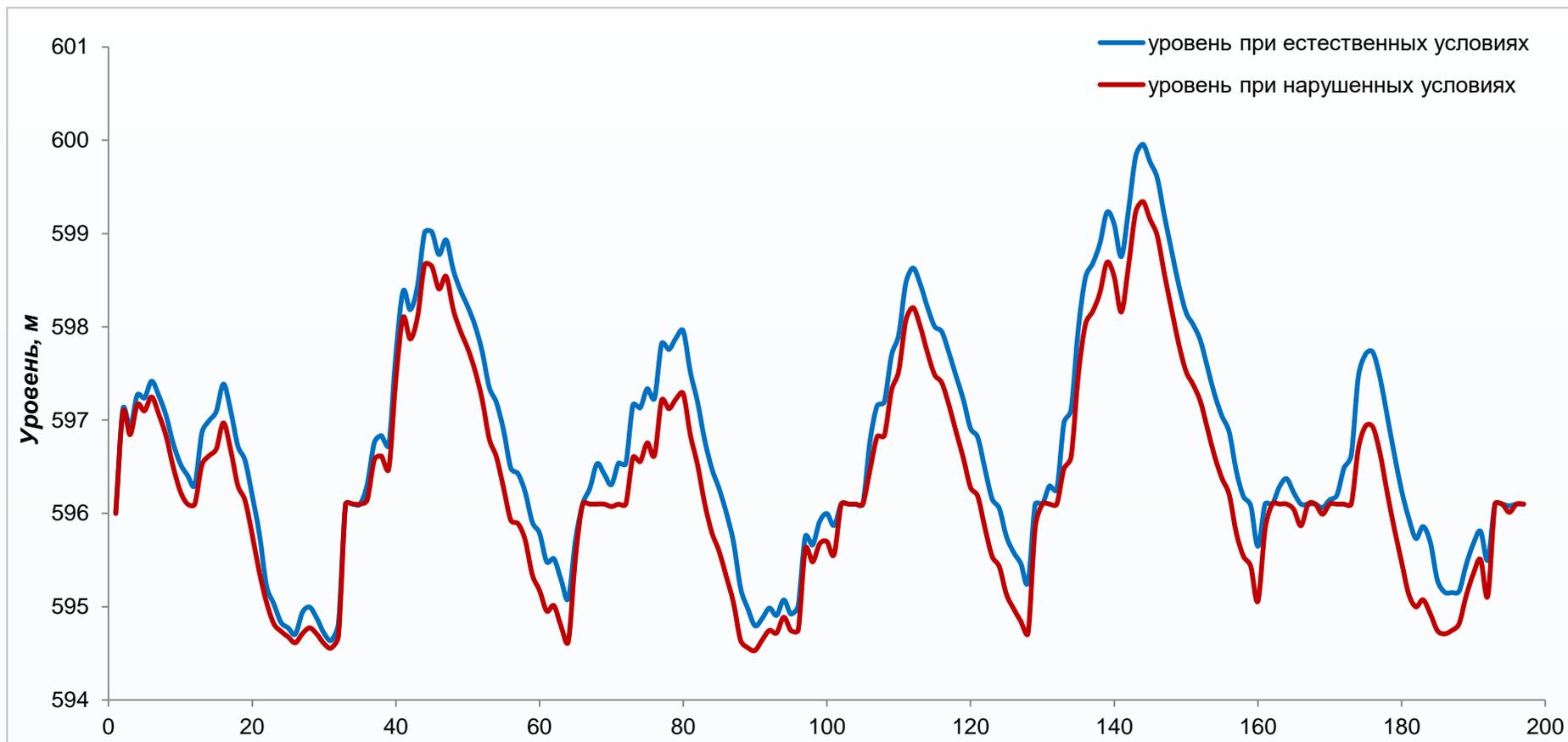
## Сценарии изменения водохозяйственной обстановки в бассейне Торейских озер

Вариант расчета	Условия функционирования водохозяйственной системы
<b>вариант № 1</b>	Естественные условия
<b>вариант № 2</b>	Водохранилище наполнено. Водные ресурсы затрачиваются на фильтрацию и испарение с поверхности водохранилища. Дополнительные расходы осуществляются для поддержания санитарных попусков в размере 0,018 км <sup>3</sup> /год; для орошения сельскохозяйственных полей площадью 2100 га с учетом нормы орошения равной 1630 м <sup>3</sup> /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.
<b>вариант № 3</b>	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



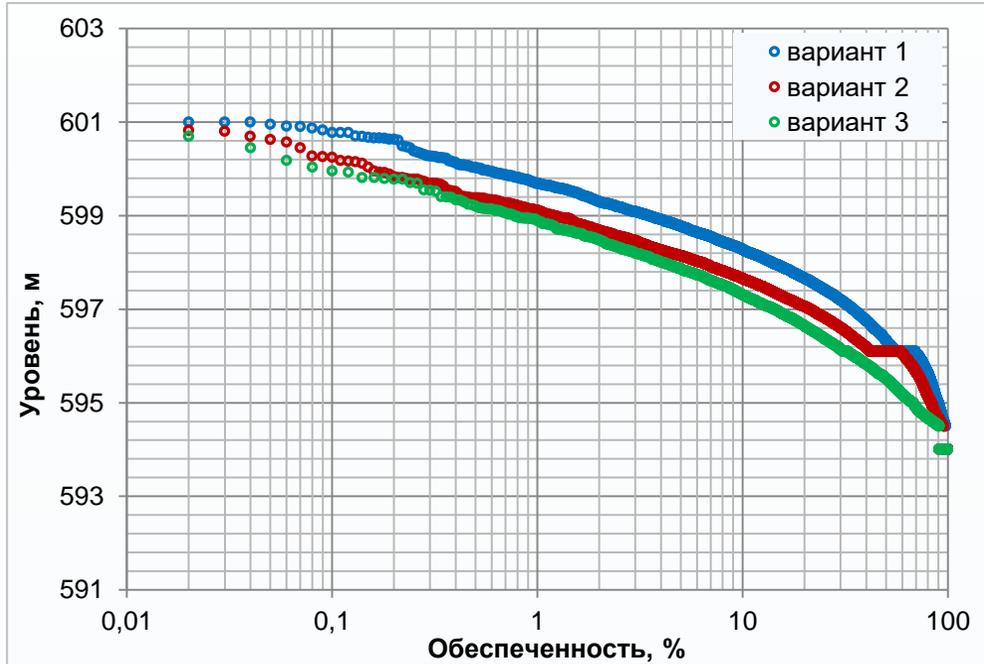
При реализации новых водохозяйственных проектов, сопровождаемых дополнительными безвозвратными потерями стока, уровень воды в Торейских озерах будет ниже, чем при естественных условиях.



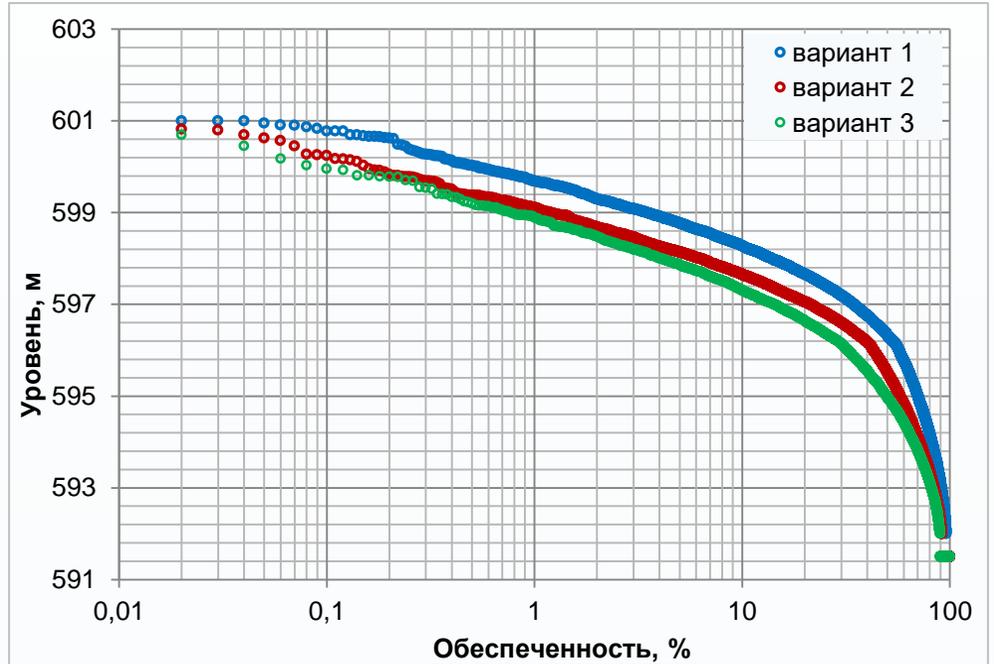
# Антропогенная нагрузка на водные ресурсы бассейна Торейских озер

## 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 %



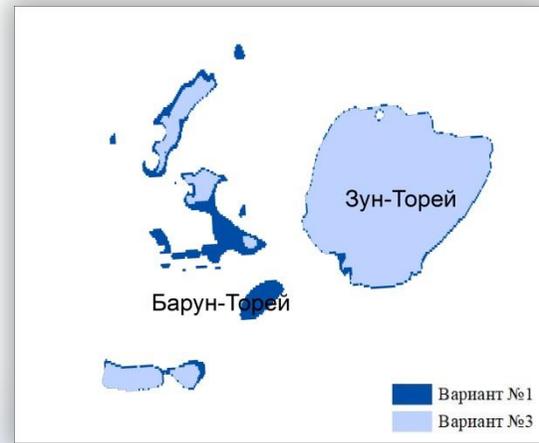
Обеспеченность 50 %



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!