

# **Оптимизационный подход к управлению Ангаро- Енисейским каскадом**

**Бубер А.Л.<sup>1</sup>, Болгов М.В.<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова**

**<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН,  
buber49@yandex.ru ; bolgovmv@mail.ru**

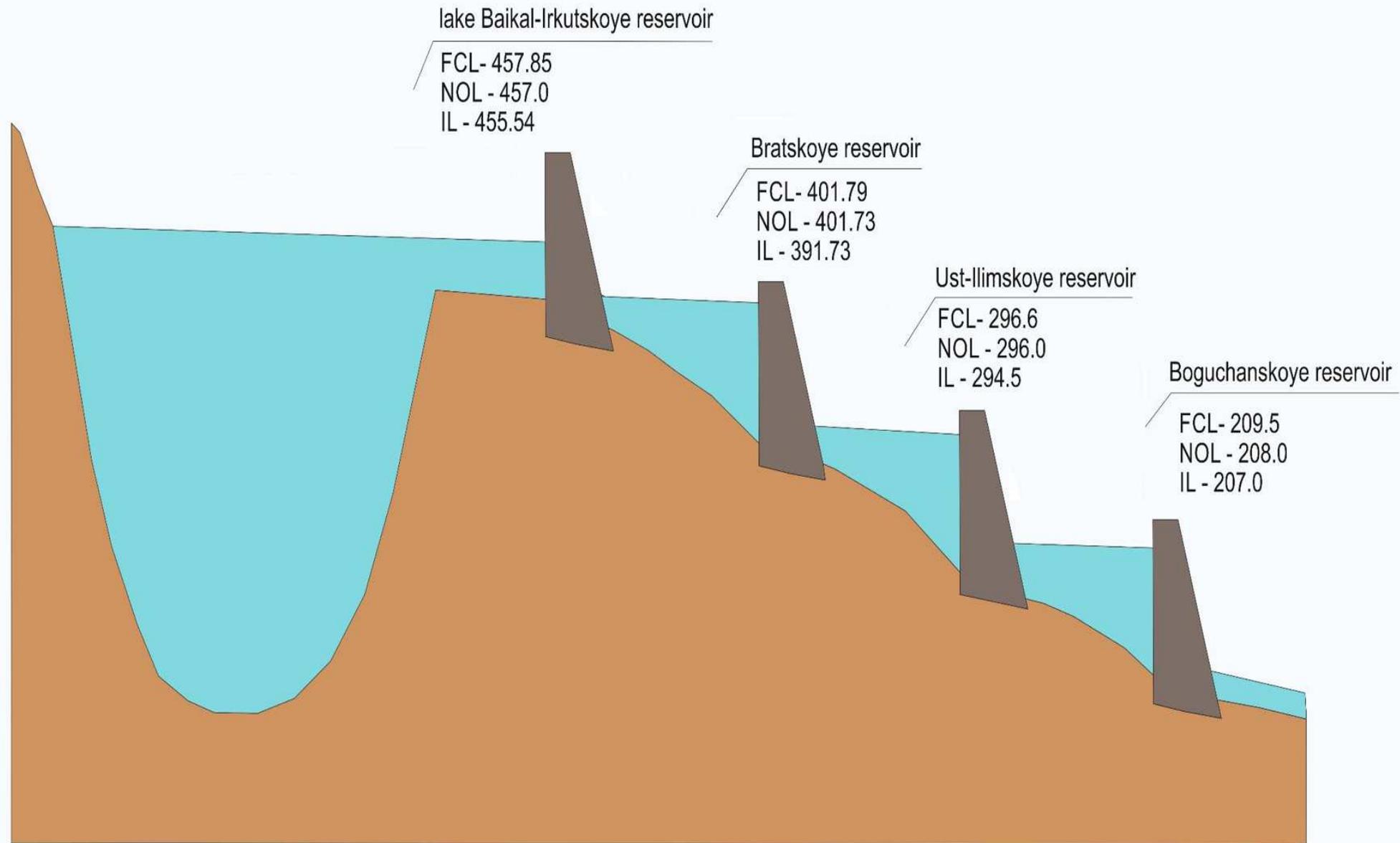
# **Содержание**

- 1. Будут рассмотрены методы построения оптимальных правил сброса, обеспечивающих безопасную эксплуатацию объектов и устойчивое функционирование водохозяйственных систем.**
- 2. Построение оптимальных компромиссных правил управления основано на методах многокритериального анализа и теории компромиссов и должно учитывать зачастую противоречивые требования водопользователей.**
- 3. Для оценки качества правил управления используются критерии статистической достоверности, которые формируются в результате выполнения водохозяйственных расчетов для многолетних гидрологических рядов наблюдаемого притока.**

# **ВВЕДЕНИЕ И ЦЕЛИ**

- 1. Не допускать повышения уровней в водоемах выше уровня контроля паводка до полного исчерпания пропускной способности водосбросов;**
- 2. При проведении различных мероприятий соблюдать предельные уровни наполнения водохранилищ.**
- 3. Предотвращать сбросы в нижележащее водохранилище, приводящие к ущербу от затопления освоенных пойменных земель.**
- 4. Удовлетворять потребности водопользователей: энергетики, судоходства, коммунального строительства, экологии, сельского и рыбного хозяйства и других - в размерах, определенных правилами;**
- 5. Поддерживать промысловые попуски в период нереста, не допуская при этом даже кратковременных понижений уровня воды в водохранилищах;**
- 6. Поддерживать сельскохозяйственные попуски в течение вегетационного периода (апрель-сентябрь);**
- 7. Обеспечивать надежность водопользования с нормативной обеспеченностью.**

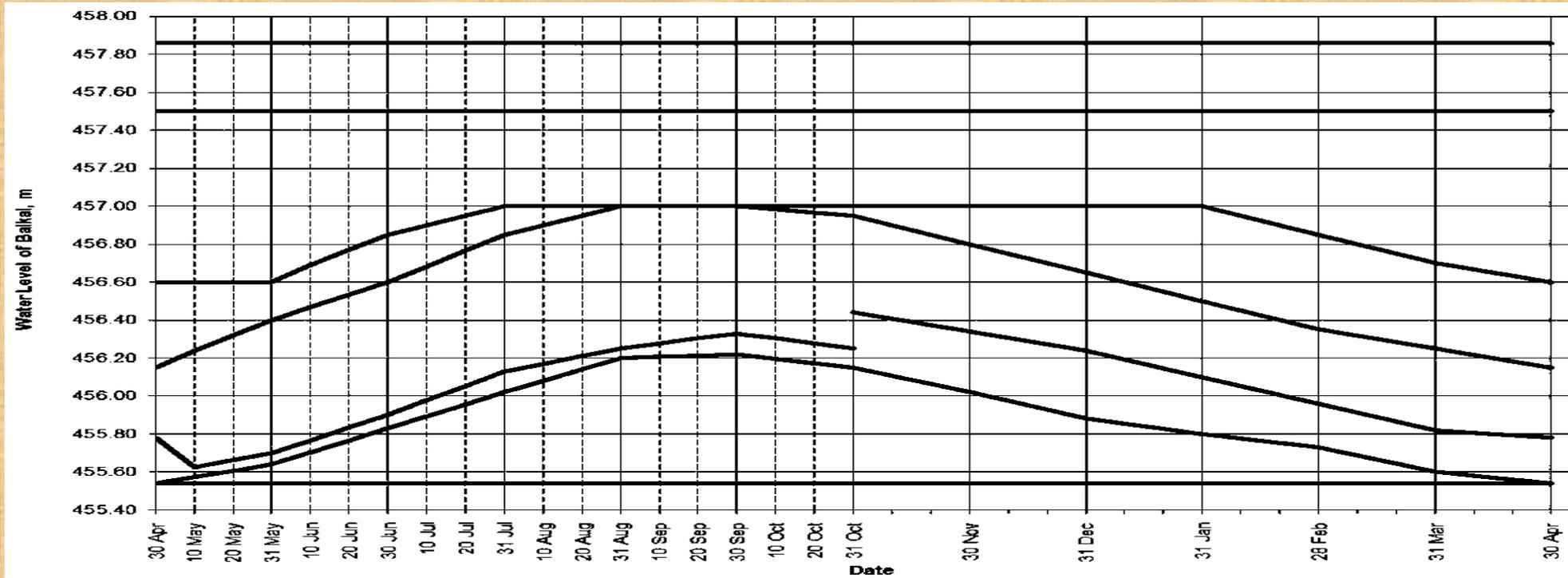
# Каскад водохранилищ на реке Ангара



FCL- Flood control level  
NOL - Normal operating level  
IL - Inactive level

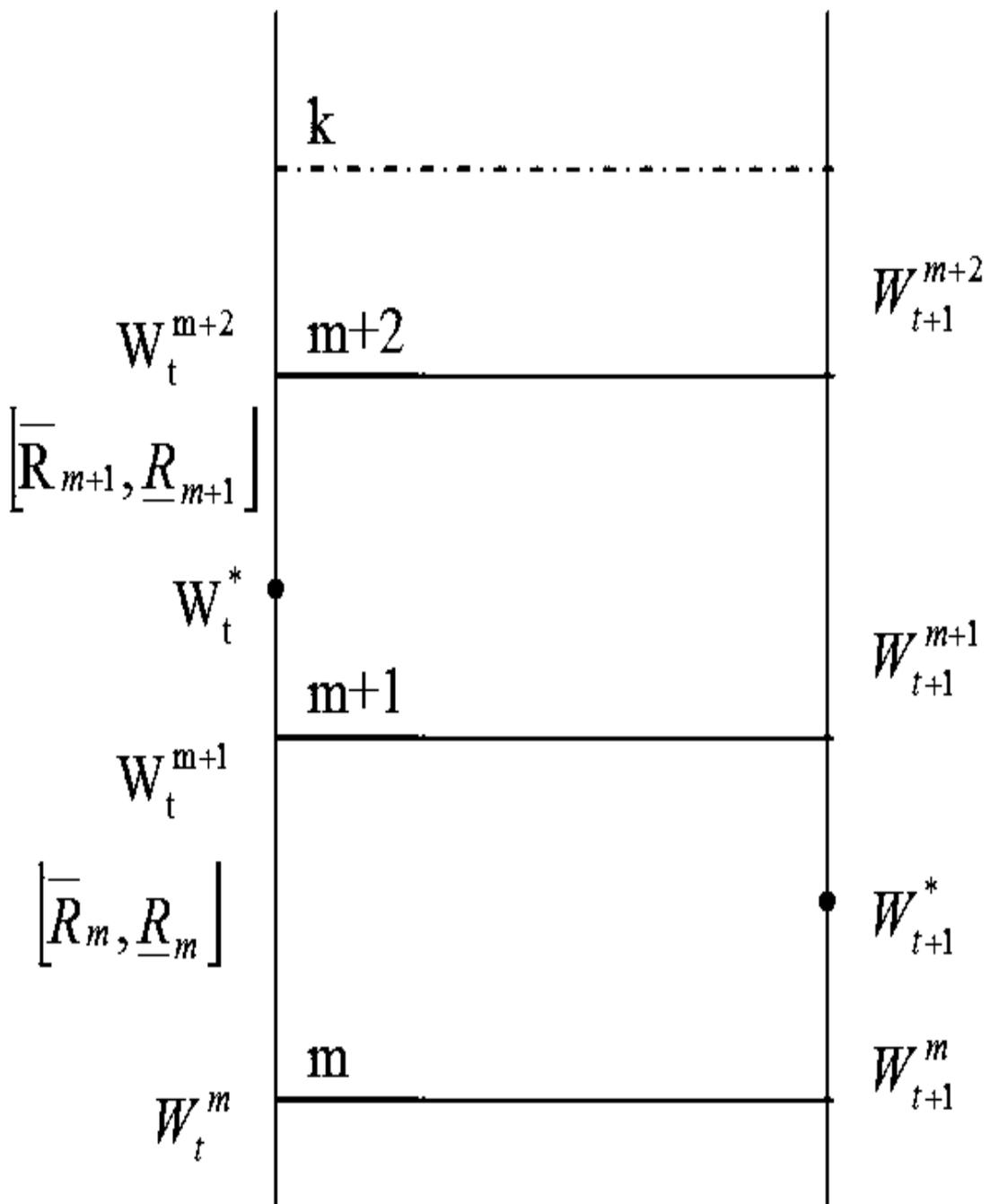
Байкал: общий объём – 23600 куб.км, глубина – 1642 м, среднегодовой приток – 60 куб.км.

# Диспетчерский график “Озеро Байкал – Иркутское водохранилище” в графическом и табличном виде



апрель	01-10 май	11-20 май	21-31 май	01-10 июнь	11-20 июнь	21-30 июнь	01-10 июль	11-20 июль	21-31 июль	01-10 авг	11-20 авг	21-31 авг	01-10 сен	11-20 сен	21-30 сен	01-10 окт	11-20 окт	21-31 окт	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200	7 200
457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86
6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000
6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000
457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50	457.50
6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000
4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000
456.60	456.60	456.60	456.60	456.69	456.77	456.85	456.90	456.95	457.00	457.00	457.00	457.00	457.00	457.00	457.00	457.00	457.00	457.00	457.00	457.00	457.00	456.85	456.70	456.60
3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200
2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900	2 900
456.15	456.24	456.32	456.40	456.47	456.53	456.60	456.68	456.77	456.85	456.90	456.95	457.00	457.00	457.00	457.00	456.98	456.97	456.95	456.80	456.65	456.50	456.35	456.25	456.15
3 100	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	3 100
1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
455.78	455.63	455.66	455.70	455.77	455.83	455.90	455.98	456.05	456.13	456.17	456.21	456.25	456.28	456.30	456.33	456.30	456.28	456.25	456.34	456.24	456.10	455.96	455.82	455.78
1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400
1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400
455.54	455.57	455.61	455.64	455.70	455.77	455.83	455.89	455.96	456.02	456.08	456.14	456.20	456.21	456.21	456.22	456.20	456.17	456.15	456.02	455.88	455.80	455.73	455.60	455.54
1 500	1 300	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300
455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54	455.54
1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050

# Принципы управления режимом работы водохранилища



1. Уровень воды у плотины в конце расчетного периода времени определяется уровнем на начало периода, прогнозируемым притоком и диапазоном допустимых попусков, для зоны, в которой уровень находился в начале периода.

2. Уравнение баланса:

$$W_{t+1}^* = W_t^* + P_{t+1} - R_{t+1},$$

где  $W_t^*$ ,  $W_{t+1}^*$  — начальный и конечный объемы водохранилища, приток  $P_{t+1}$ , попуск  $R_{t+1}$  за  $t+1$  период,  $R_{t+1} \in [R_m, R_m]$

# Водохозяйственные расчеты в среде Excel

Time intervals			Lake Baikal						Irkutsk reservoir (HPP)				
years	Intervals	Beginning of interval	Volume mln.m <sup>3</sup>	Level m	Inflow for an interval		Release for an interval		US Level (av.) m	DS Level m	Turbine flow m <sup>3</sup> /s	Power MW	Electricity generation billion kWh
					m <sup>3</sup> /s	mln.m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /s	mln.m <sup>3</sup>					
<i>Initial volume</i>			20 709	455.66									
2016 - 2017	V 1-10	01.05.2016	16 622	455.53	2 123	1 834	1 300	1 123	454.42	425.83	1 296	313.0	75.1
	V 11-20	11.05.2016	17 333	455.55	2 123	1 834	1 300	1 123	454.50	425.83	1 296	313.9	75.3
	V 21-31	21.05.2016	18 044	455.57	2 123	2 018	1 300	1 236	454.59	425.83	1 296	314.8	83.1
	VI 1-10	01.06.2016	18 826	455.60	3 990	3 447	1 300	1 123	454.75	425.83	1 296	316.7	76.0
	VI 11-20	11.06.2016	21 151	455.67	3 990	3 447	1 300	1 123	454.98	425.83	1 296	319.1	76.6
	VI 21-30	21.06.2016	23 475	455.75	3 990	3 447	1 300	1 123	455.15	425.83	1 296	321.1	77.1
	VII 1-10	01.07.2016	25 799	455.82	2 947	2 546	1 300	1 123	455.27	425.83	1 296	322.4	77.4
	VII 11-20	11.07.2016	27 222	455.86	2 947	2 546	1 300	1 123	455.37	425.83	1 296	323.4	77.6
	VII 21-31	21.07.2016	28 645	455.91	2 947	2 801	1 300	1 236	455.46	425.83	1 296	324.5	85.7
	VIII 1-10	01.08.2016	30 210	455.96	4 123	3 562	1 300	1 123	455.57	425.83	1 296	325.7	78.2
	VIII 11-20	11.08.2016	32 649	456.04	4 123	3 562	1 300	1 123	455.70	425.83	1 296	327.1	78.5
	VIII 21-31	21.08.2016	35 088	456.11	4 123	3 918	1 300	1 236	455.83	425.83	1 296	328.6	86.7
	IX 1-10	01.09.2016	37 771	456.20	2 290	1 979	1 400	1 210	455.87	426.01	1 396	352.2	84.5
	IX 11-20	11.09.2016	38 540	456.22	2 290	1 979	1 400	1 210	455.91	426.01	1 396	352.7	84.6
	IX 21-30	21.09.2016	39 309	456.25	2 290	1 979	1 400	1 210	455.95	426.01	1 396	353.2	84.8
	X 1-10	01.10.2016	40 078	456.27	242	209	1 400	1 210	455.94	426.01	1 396	353.1	84.7
	X 11-20	11.10.2016	39 078	456.24	242	209	1 400	1 210	455.89	426.01	1 396	352.5	84.6
	X 21-31	21.10.2016	38 077	456.21	242	230	1 400	1 331	455.84	426.01	1 396	351.8	92.9
	XI	01.11.2016	36 977	456.17	-30	-78	1 400	3 629	455.71	426.01	1 396	350.3	252.2
	XII	01.12.2016	33 270	456.06	-111	-297	1 400	3 750	455.49	426.01	1 396	347.8	258.7
I	01.01.2017	29 223	455.93	359	962	1 400	3 750	455.28	426.01	1 396	345.2	256.8	
II	01.02.2017	26 435	455.84	469	1 135	1 400	3 387	455.11	426.01	1 396	343.1	230.6	
III	01.03.2017	24 182	455.77	316	846	1 400	3 750	454.87	426.01	1 396	340.3	253.2	
IV	01.04.2017	21 279	455.68	1 180	3 059	1 400	3 629	454.67	426.01	1 396	338.0	243.4	

- Даты начала периодов
- Объемы в озере Байкал на начало периода
- Полезный объем притока в озеро Байкал
- Попуски из Иркутского водохранилища
- Уровень ВБ Иркутского водохранилища, зависит от уровня озера Байкал и сброса воды
- Уровень нижнего бьефа Иркутского водохранилища рассчитывается на основе существующей кривой зависимости уровня от сброса воды
- Для Иркутской ГЭС напор рассчитывается как разница между уровнями верхнего и нижнего бьефа. Производительность и мощность турбины определяются эксплуатационными характеристиками ГЭС.

**Надежность требования каждого водопользователя рассчитывается по формуле:**

$$P = 100 * M / (N + 1);$$

**M - количество расчетных лет (периодов) без нарушений требований,**

**N – общее количество лет (периодов) в многолетнем гидрологическом ряду.**

**Нормативы надежности при нормальном потреблении воды по количеству лет без нарушений, в процентах:**

**97- 99**

**Санитарные попуски**

**95 - 99**

**Водоснабжение (питьевое, бытовое, промышленное)**

**85 - 95**

**Гидроэнергетика**

**85 - 90**

**Навигация (для поддержания глубины)**

**75 - 90**

**Орошение и сельскохозяйственные наводнения**

**75 - 90**

**Рыболовство**

# ОБСУЖДЕНИЕ

1. Правильно ли выбраны координаты ДГ, то есть допустимое решение существует, но разработчик его не нашел.
2. Возможно ли использование такой ДГ в режиме реального времени?
3. Позволяет ли водохранилище удовлетворить потребности водопользователей?
4. Является ли управление по ДГ оптимальным или можно добиться лучших результатов, используя другие инструменты управления?

Первые две задачи решаются на основе методов поиска оптимальных координат ДГ. Возникает сложная нелинейная задача дискретной оптимизации малой размерности (168 независимых переменных). Третья и четвертая задачи связаны с решением достаточно сложной оптимизационной задачи большой размерности (1056 независимых переменных), требующей разработки специальных методов оптимизации.

# Озеро Байкал – Иркутское водохранилище

$$W^{t+1} = W^t + Q^t - R^t$$

Уравнения баланса

$$\nabla H^t = F(W^t)$$

Батиграфическая функция «уровень озера Байкал – объем воды»

$$\overline{\nabla H^t} = F(\nabla H^t, R^t)$$

Зависимость УВБ иркутской ГЭС от уровня Байкала и сброса в НБ

$$\underline{\nabla H^t} = F(R^t)$$

Зависимость уровня нижнего бьефа от сброса Иркутского водохранилища

$$N^t = F(\overline{\nabla H^t}, \underline{\nabla H^t}, R^t)$$

Гидроэнергетика

Здесь: t - интервал времени, W - объем Байкала, Q - приток, R - сброс.

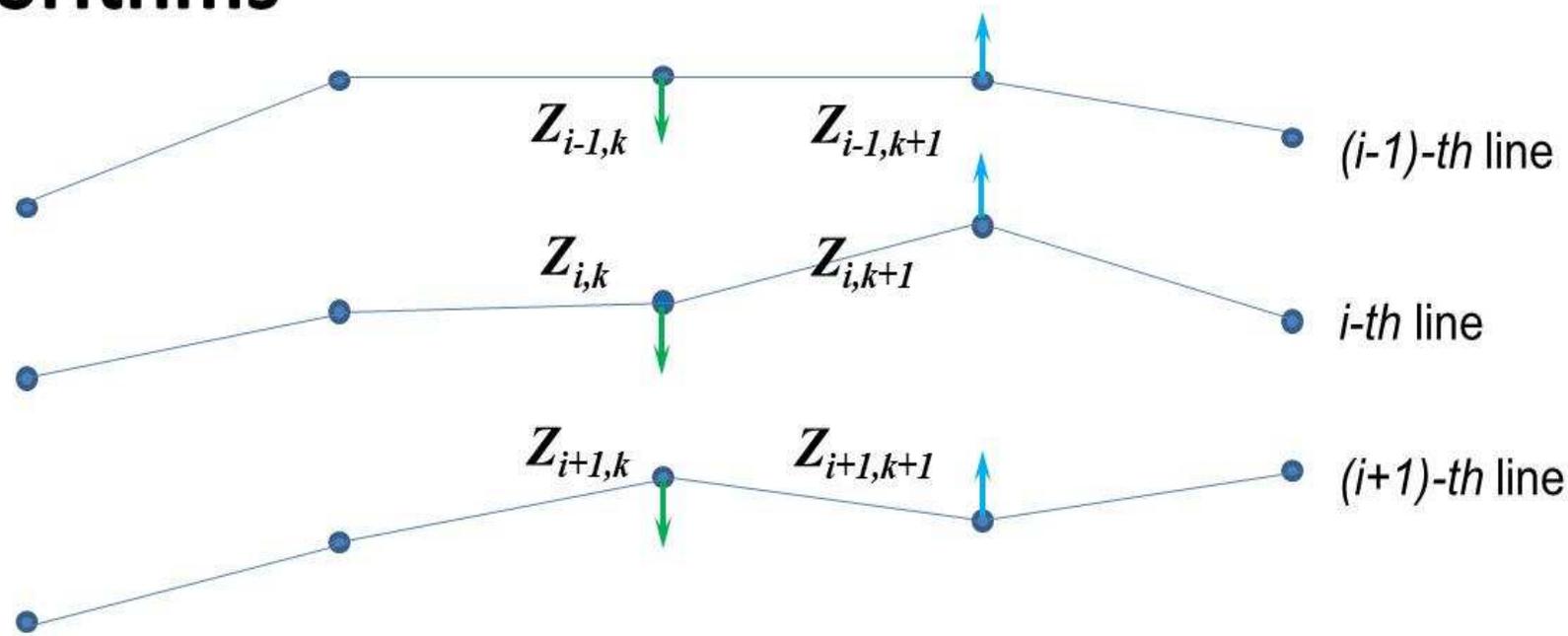
# **Требования водопользователей формируют 12 критериев**

1. Уровень озера Байкал должен находиться в пределах (455,54, 457,5) м;
2. Уровень озера Байкал должен быть  $\geq 456$  м [25];
3. Уровень озера Байкал должен быть  $\leq 457$  м [25];
4. Максимальный сброс зимой должен быть менее 2500 м<sup>3</sup>/с;
5. Транспортный попуск в период навигации должен составлять более 1500 м<sup>3</sup>/с;
6. Попуски на водоснабжение должны находиться в пределах (1250, 1300) м<sup>3</sup>/с;
7. Противопаводковый попуск должен составлять менее 3200 м<sup>3</sup>/с;
8. Гарантированная зимняя мощность должна составлять более 347 МВт;
9. Уровень ВБ Иркутского водохранилища для работы водозаборов должен быть более 454 м;
10. Напор на плотине для работы ГЭС должен быть более 26 м;
11. Уровень озера Байкал на 1 мая для нормального нереста рыб должен быть 456,15 м;
12. Уровень озера Байкал в сентябре для нормального нереста рыбы должен быть 457 м

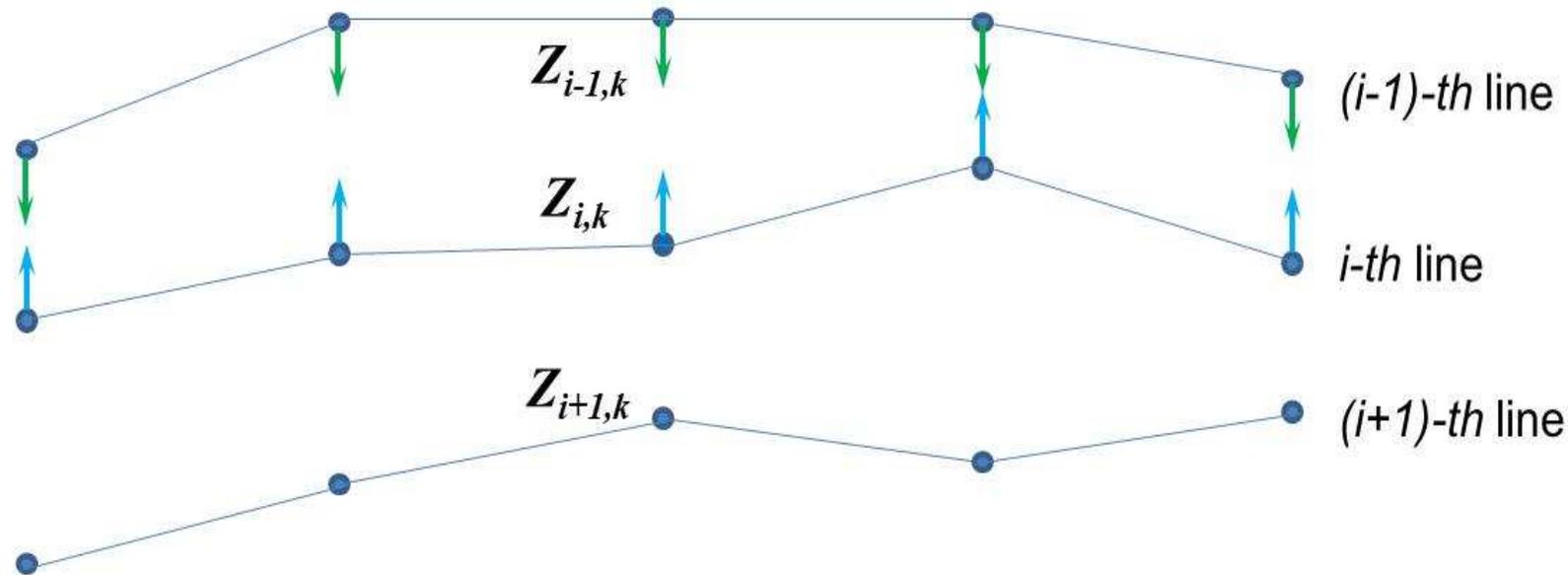
# Поиск оптимальных координат ДГ

## V and H optimization algorithms

V - "Vertical"



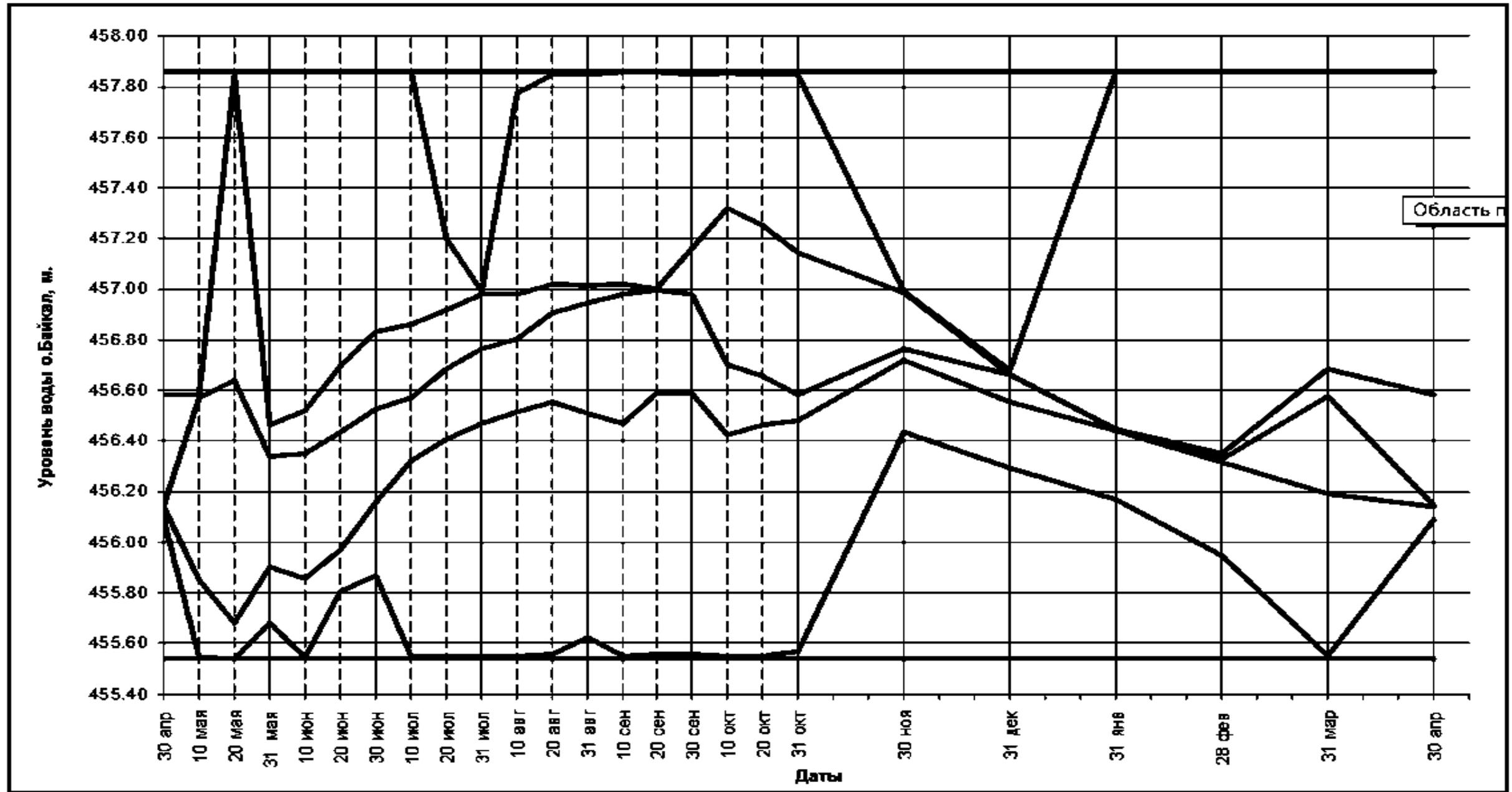
H - "Horizontal"



# Operating Dispatch Schedule 1988

Optimal trade-offs with geometry similar to the current 1988

Optimal trade-offs with arbitrary configuration



# Блок-схема алгоритма поиска оптимальных попусков для формирования режимов работы Иркутского водохранилища

## Формирование исходных данных

- Гидрологический ряд приточности длиной T лет
- Требования водопользователей (thresholds)
- Начальный для первого интервала ряда и конечный для последнего интервала ряда объемы водохранилища

Формирование с помощью DS начальных объемов и releases для всех интервалов

Получен локальный минимум?

да

Оценка статистическими критериями эффективности качества полученного решения

нет

Формирование последовательности T/2 нечетных двухлетних оптимизационных задач по гидрологическому ряду (нечетный проход) с заданным начальными и конечными объемами

Решение (может быть одновременное) последовательности T/2 задач методами NLP (например, Solver Excel)

Формирование последовательности T/2 четных двухлетних оптимизационных задач по гидрологическому ряду (четный проход) с заданным начальными и конечными объемами

Решение (может быть одновременное) последовательности T/2 задач методами NLP (например, Solver Excel)

The mathematical setting of the  $t$ th two-year task: minimize objective function (OF):

$$F_{2t-1,2t}(W,R) = \sum_{k=1,K} C_k \times (\sum_{m=1,M} \Delta^2_{2t-1mk}(W_{2t-1m}, R_{2t-1m}, W_{2t-1m+1}) + \sum_{m=1,M} \Delta^2_{2tmk}(W_{2tm}, R_{2tm}, W_{2tm+1}))$$

Under the following constraints on the variables W and R:

$$W_{2t-11} + P_{2t-11} - R_{2t-11} = W_{2t-12};$$

.....

$$W_{2t-1m} + P_{2t-1m} - R_{2t-1m} = W_{2t-1m+1};$$

.....

$$W_{2t-1M} + P_{2t-1M} - R_{2t-1M} = W_{2t-1};$$

$$W_{2t1} + P_{2t1} - R_{2t1} = W_{2t2};$$

.....

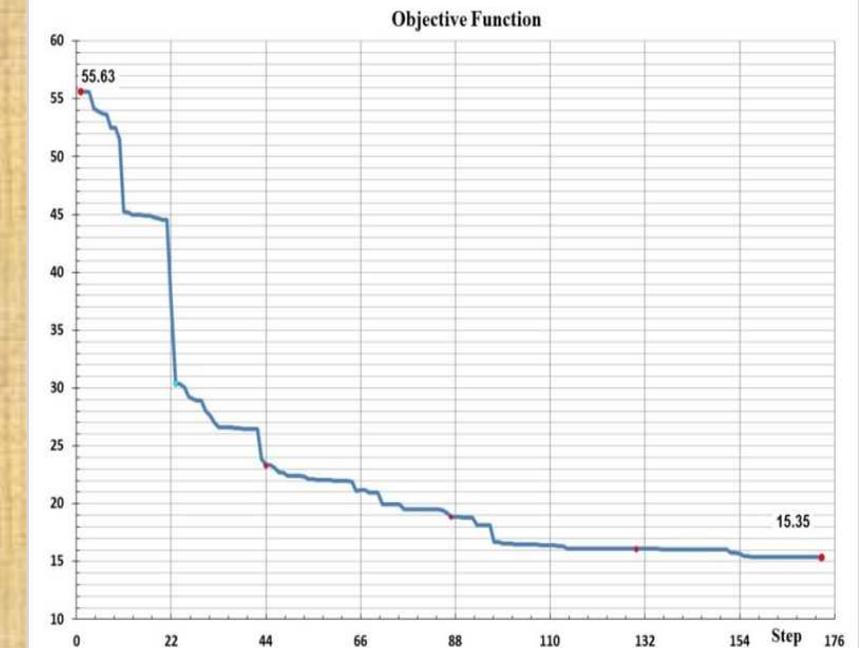
$$W_{2tm} + P_{2tm} - R_{2tm} = W_{2tm+1};$$

.....

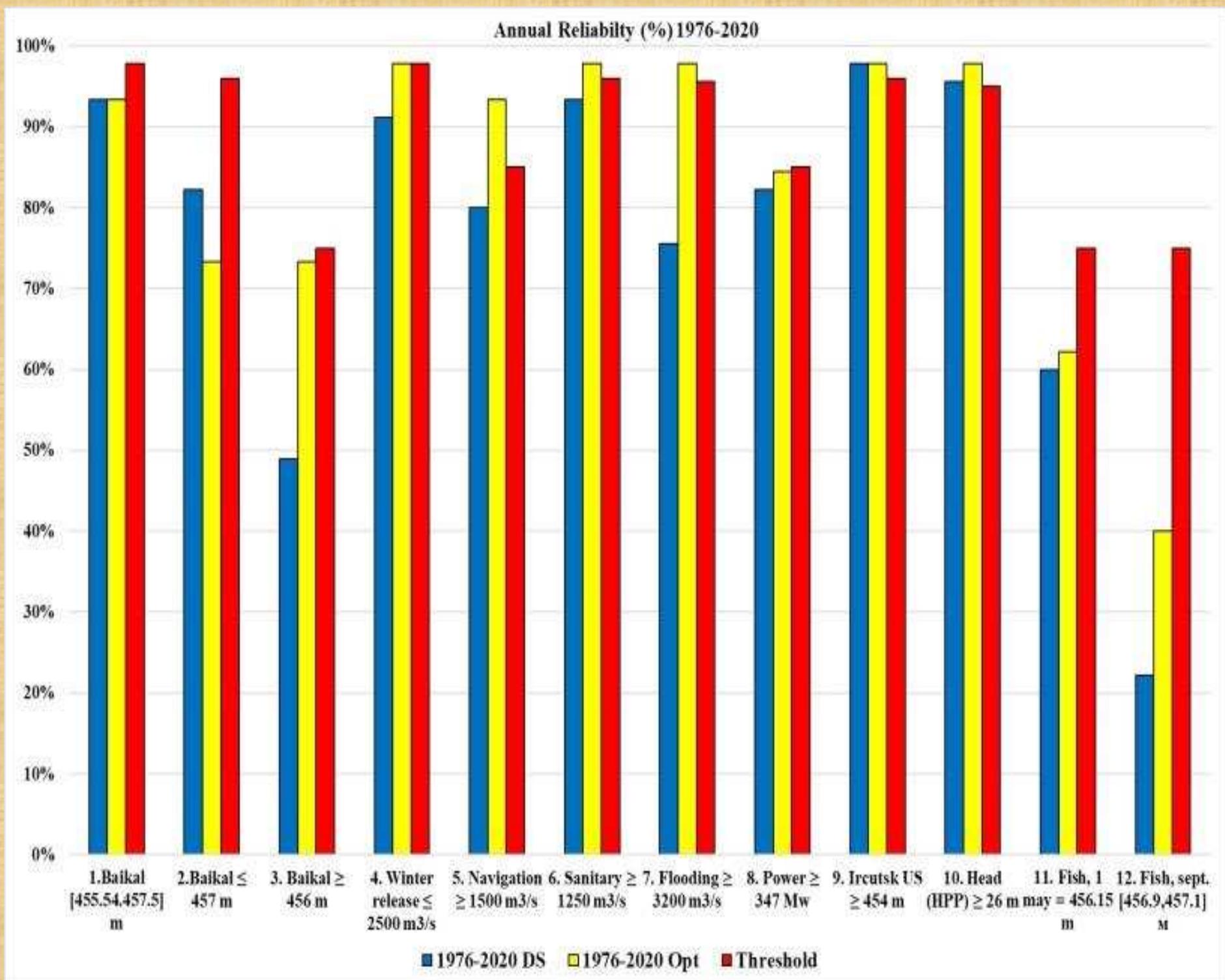
$$W_{2tM} + P_{2tM} - R_{2tM} = W_{2t+1};$$

$$W_{2t-11} = W^{(0)}_{2t-11}; W_{2t+11} = W^{(0)}_{2t+11};$$

$$W_{2t-1m} \geq 0, W_{2tm} \geq 0, R_{2t-1m} \geq 0, R_{2tm} \geq 0, \forall m = [1, M]$$

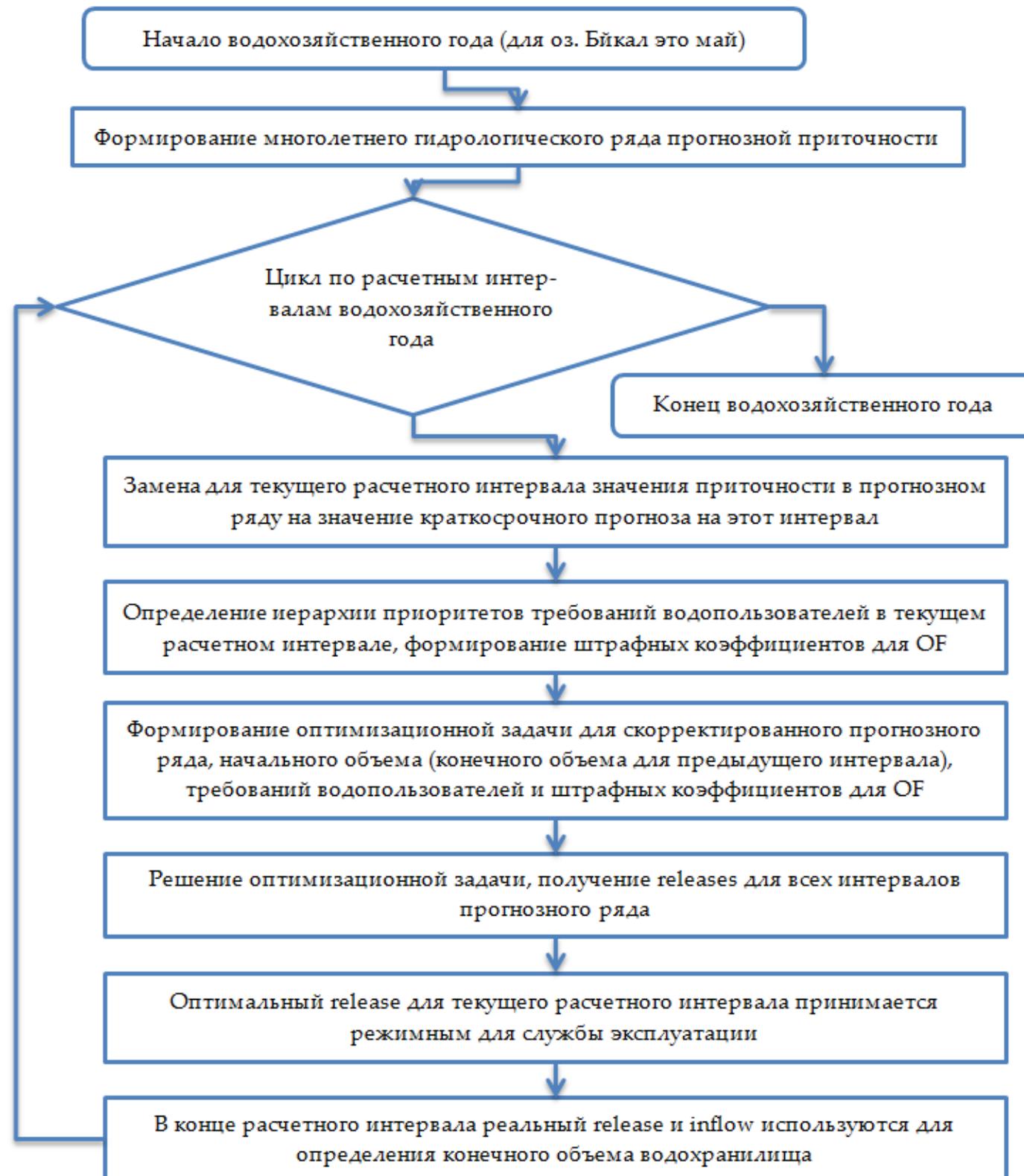


# Ежегодная обеспеченность: ВХР по ДГ и оптимизация (1976–2020 гг.)



# Блок-схема алгоритма управления попусками из водохранилища с использованием долгосрочного гидрологического прогноза и методов оптимизации

Buber, Alexander; Bolgov, Mikhail, Multi-Criteria Analysis of the "Lake Baikal-Irkutsk Reservoir" Operating Modes in a Changing Climate: Reliability, Resilience, Vulnerability, WATER, Volume: 13 Issue: 20, OCT 2021, DOI: 10.3390/w13202879



# Гидрологический ряд долгосрочного прогноза для оптимизационных расчетов

Years, NN	Time interval						
	1	2		j	j+1		m
T+1	$a_{T+1,1}, Q_{T+1,1}$			$a_{T+1,j}, Q_{T+1,j}$	$a_{T+1,j+1}, Q_{T+1,j+1}$		
T							
			$\alpha$				
T-10							
			$\gamma$				
$\tau$				$a_{\tau,j}, Q_{\tau,j}$			
$\tau-1$			$\beta$	$a_{\tau-1,j}, Q_{\tau-1,j}$			
$\tau-10$							
			$\delta$				
1							

1. An 11-year array  $\alpha$  in the initial hydrological series  $P$  is allocated, the final year of which is the year  $T$  of the  $P$  series, and the initial year is the year  $T-10$ , respectively.

2. We find the 11-year array  $\beta$  in the initial hydrological series  $P$  close to the 11-year-old array  $\alpha$  ( $\alpha \cong \beta$ ) in the accepted measure. At the same time, the last year  $\tau$  in the array  $\beta$  must satisfy the condition  $T-10 > \tau$  (the arrays  $\alpha$  and  $\beta$  are assumed to be disjoint). The proximity measure can be determined by the formula:

$$\|\alpha - \beta\| = \sum_{i=[0,10]} \sum_{j=[1,m]} \text{abs}(a_{T-i,j} - a_{\tau-i,j});$$

where  $a_{\tau,j}$  is the inflow in the year  $\tau$  and the interval  $j$  (Figure 1).

3. Let  $\gamma$  be the array separating  $\alpha$  and  $\beta$  (see figure 1). The number of years  $T_\gamma$  in the array  $\gamma$  obviously satisfies the condition  $T_\gamma \geq 0$  due to the disjointness of  $\alpha$  and  $\beta$ . Thus, the hydrological series  $P$  is divided into 4 arrays:  $P = \{\alpha + \gamma + \beta + \delta\}$  (Figure 1), where the array  $\delta$  is the set of remaining years below  $\tau-10$ .

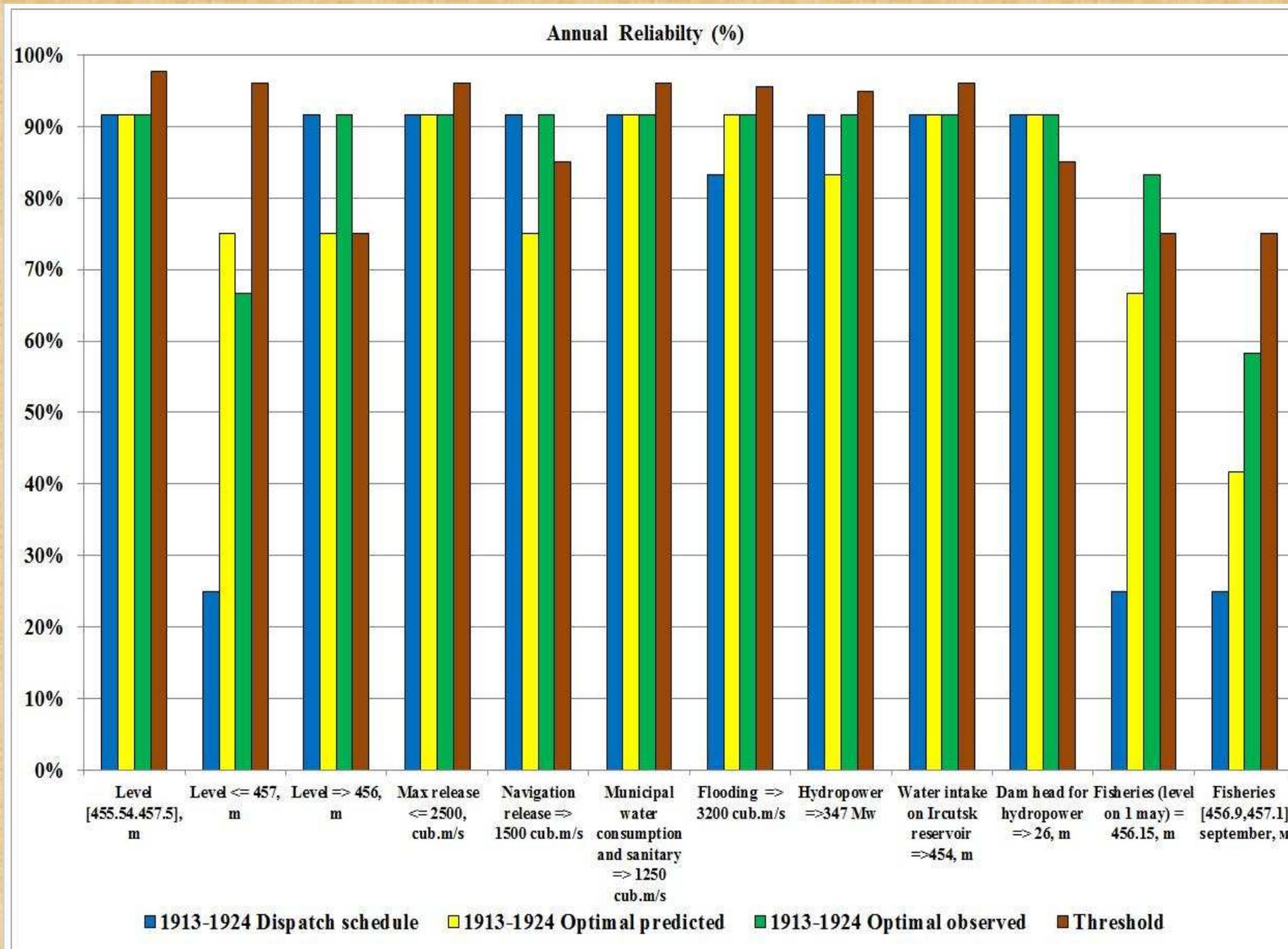
# Гидрологический ряд долгосрочного прогноза для оптимизационных расчетов

Years, NN	Time interval						
	1	2		j	j+1		m
P1			$\alpha$				
			$\gamma$				
	T+1	$a_{T+1}, Q_{T+1}$			$a_{T+j}, Q_{T+j}$	$a_{T+j+1}, Q_{T+j+1}$	

Ряд альфа+гамма будет использоваться для расчета сбросов методом оптимизации.

# Практическое подтверждение (верификация) предложенного алгоритма правил сброса из водохранилища

## Годовая надежность: ВХР по ДГ и с использованием оптимизации (1913-1924)



# Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Диспетчерский график 1988 г. не дает достоверных результатов при выполнении расчетов водных ресурсов по современным гидрологическим рядам, по сравнению с рядами притоков, на основе которых он построен.
2. Изменился генезис притока (произошло внутригодовое изменение стока), а среднегодовой приток существенно снизился за последние 44 года (на 13%).
3. Для нормальной эксплуатации Иркутского водохранилища необходимо разработать новый диспетчерский график, учитывающий современную гидрологию (последние 20–30 лет), современные требования водопользователей и современные приоритеты.
4. Водохозяйственные расчеты на основе методов оптимизации дают результаты по обеспеченности, устойчивости и уязвимости, значительно лучшие, чем при использовании ДГ.
5. Разработаны математическая модель, алгоритм и вычислительная технология формирования оптимальных компромиссных режимов работы водохранилища в реальном времени (на следующий временной интервал) на основе методов оптимизации.
6. Для реализации вычислительной технологии разработан уникальный алгоритм оптимизации, позволяющий быстро решать сложные нелинейные задачи больших размерностей.
7. Предложены методы комплексной оценки разработанных правил управления водохранилищами.

**Схема комплекса «Озеро Байкал – Иркутское водохранилище» и расположение гидростов**

**Спасибо за внимание!**



Условные обозначения	
▼	гидростовы
◆	гидроузлы
•	населенные пункты
—	границы водохозяйственных участков
16.01.01.004	коды водохозяйственных участков