

*Институт водных проблем,
гидроэнергетики и экологии АН РТ*

д.т.н., проф., чл.-корр. АН РТ Кобулиев З.В.

**МЕЖДУНАРОДНОЕ ДЕСЯТИЛЕТИЕ
ДЕЙСТВИЙ «ВОДА ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО
РАЗВИТИЯ, 2018-2028 ГГ.» И РАЦИОНАЛЬНОЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
РЕСУРСОВ РЕГИОНА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**

Посвящается
началу Международного десятилетия действий
«Вода для устойчивого развития, 2018-2018»
Таджикистан, г.Душанбе

18 апреля 2018 года

Ситуация в водно-энергетическом секторе Центральной Азии

1. Основные виды использования:
 - орошаемое земледелие (ирригация),
 - гидроэнергетика
2. Ресурсы ирригации исчерпаны, гидроэнергетика в начале пути развития
3. Конфликт интересов между отраслями приобрел межгосударственный характер

Основная цель – разработка стратегии эффективного использования водных ресурсов трансграничных рек, оптимизирующей интересы существующей ирригации и развитие гидроэнергетики

Основные положения, выносимые на обсуждение

- Комплекс оптимизационных и имитационных математических моделей управления работой гидроузлов и регулирования стока в интересах ирригации и гидроэнергетики.
- Методика расчета стоимости услуг по регулированию водного стока и межгосударственный механизм взаимоотношений между ирригацией и гидроэнергетикой - странами формирования и ирригационного использования водных ресурсов.
- Механизм регионального сотрудничества при совместном использовании водноэнергетических ресурсов трансграничных рек.
- Метод оперативного прогноза водного стока и математическая модель для его практического использования.
- Способ и математическая модель мониторинга полезного объема водохранилищ и динамики его изменения.
- Стратегия комплексного освоения водно-энергетических ресурсов (каскадного строительства гидроузлов), оптимизирующая регулирование стока в интересах ирригации и гидроэнергетики и обеспечивающая экономическую эффективность и экологическую безопасность.

Ирригация в Центральной Азии

	1960		1970		1980		1990		1999	
	Всего	Орошение	Всего	Орошение	Всего	Орошение	Всего	Орошение	Всего	Орошение
Ресурсы	116		116		116		116		116	
Использование	60.6	56.2	94.6	86.8	120.7	106.8	116.3	106.4	105.0	94.7

Гидроэнергетика в Центральной Азии, ТВт·ч в год

Ресурсы	Потенциальные	Технические	Освоенные
Таджикистан	527	300	17÷19
Кыргызстан	246	100	10÷14

ГЭС Таджикистана

	<i>Каскад</i>	<i>К-во ГЭС в каскаде</i>	<i>Мощность, мВт.</i>	<i>Выработка, ТВт.ч./год</i>	<i>Полезный объем в-ща, кмЗ</i>
1	на реке Пяндж	1*/14	18322,5	84,918	17,36
2	на реке Вахш	6*/3	9178	35,36	13,229
3	на реке Сырдарья	1*	126	0,6	2,5
4	на реке Обихингоу	5	3700	9,3	1,55
5	на реке Сурхоб	4	2100	8,7	1,45
6	на реке Зеравшан	6	640	3,01	1,64
7	на реке Фандарья	4	510	3,18	0,78
8	на реке Матча	5	500	3,02	1,21
9	на реке Кафирниган	6	1570	4,98	2,695
10	на реке Бартанг	5	581	5,04	3,85
11	на реке Варзоб	3	870	3,05	0,084
12	на реке Гунт	11*/11	284,4	1,758	0,212
ИТОГО		85	38366,5	162,916	46,56
из них:					
действующие		19	4713,4	18,858	7,104
строящиеся		2	4610	17,48	9,225

* - действующие, ** - строящиеся

ГЭС Кыргызстана

№	Каскад	количество ГЭС в каскаде	Установленная мощность МВт	Выработка эл. энергии млн кВт.ч	Полная емкость водохранилища млн м ³
1	Верхне-Нарынский	8	529.5	2121	1242.84
2	Куланакский	5	439	2667.8	48.06
3	Казарманский	4	1160	4661.6	3223.96
4	Средненарынский	1*/2	2430	6660	4724
5	Нижненарынский	5*	2870	10007	20107.5
6	Сусамыр- Кокамеренский	3	1305	3317	1099.5
7	Атбашинский	1*/6	277.2	1550	680.8
8	Алабугинский	4	414	1711	556.8
9	Чаткальский	2	1800	2650	3732
10	Сары-Джазский	6	1100	4764	1248
Итого		47	12324.7	40109.4	36663.46
из них:	действующие	7	3270	11320	20273.5
	намечаемые	40	9054.7	28789.4	16389.96

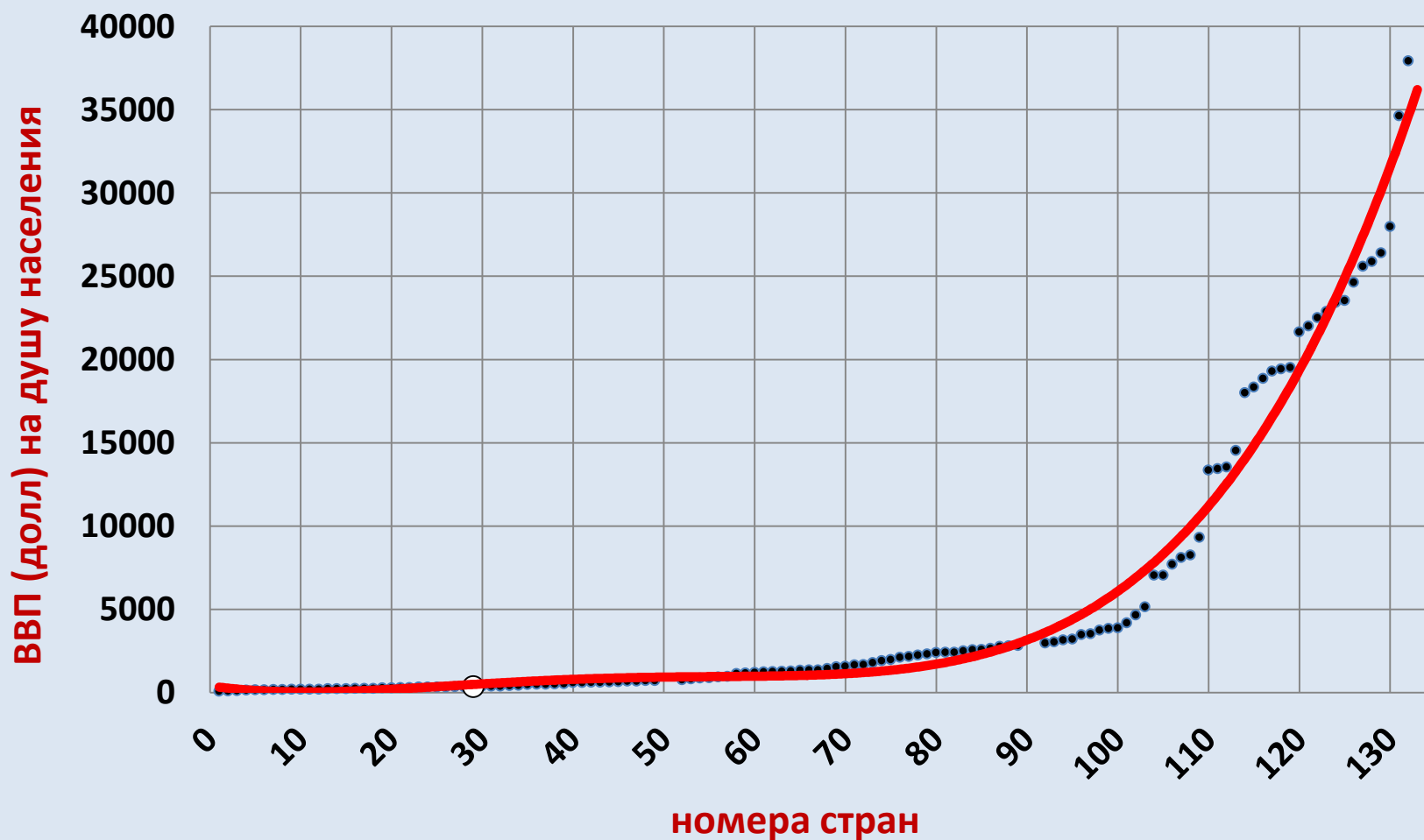
Запасы и экспортный потенциал гидроресурсов стран мира

№ п/п	СТРАНА	Потенциальные ресурсы, млн. кВт·ч	Численность населения, млн. человек	Собственное потребление, млн. кВт·ч	Экспортный потенциал, млн. кВт·ч/г.
1.	К и т а й	1 923 304	1 200	6 000 000	-4 076 696
2(1)	Р о с с и я	1 670 000	148,0	740 000	930 000
3.	С Ш А	1 285 092	260,0	1 300 000	-14 908
4.	Б р а з и л и я	1 166 600	159,0	795 000	371 600
5(2)	З а и р	774 000	39,0	195 000	579 000
6.	И н д и я	736 225	915,0	4 575 000	-3 838 775
7(4)	К а н а д а	631 713	27,3	136 500	495 213
8(3)	Таджикистан	527 000	7.2	30 000	497 000

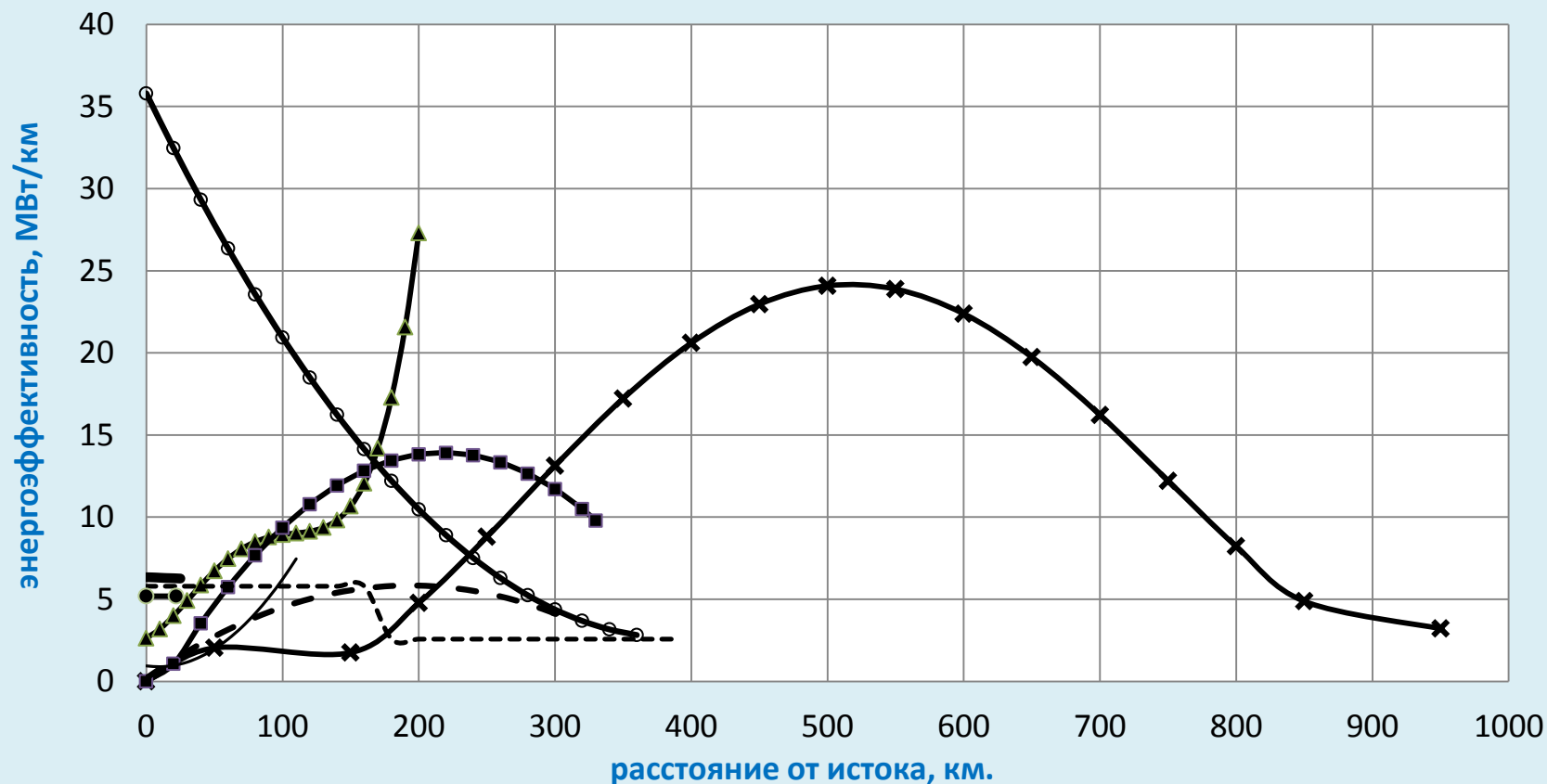
**Сравнительный анализ потенциальных
энергоресурсов Таджикистана** млн. т.у.т. (%)

	Гидроре- сурсы	Уголь	Нефть	Газ	Всего	Всего в год
Офици- альный вариант	158,12	667,3	37	15	877,42	
	(18.02)	(76,05)	(4.22)	(1,71)	(100)	
Годовые запасы	158,12	13,35	1,85	0,75		174,07
	(90,84)	(7,67)	(1,06)	(0,43)		(100)

Уровень развития стран мира



Энергоэффективность крупных рек Таджикистана, dN/dL , МВт/км



—○— Вахш
—■— Сурхоб
— Ягноб

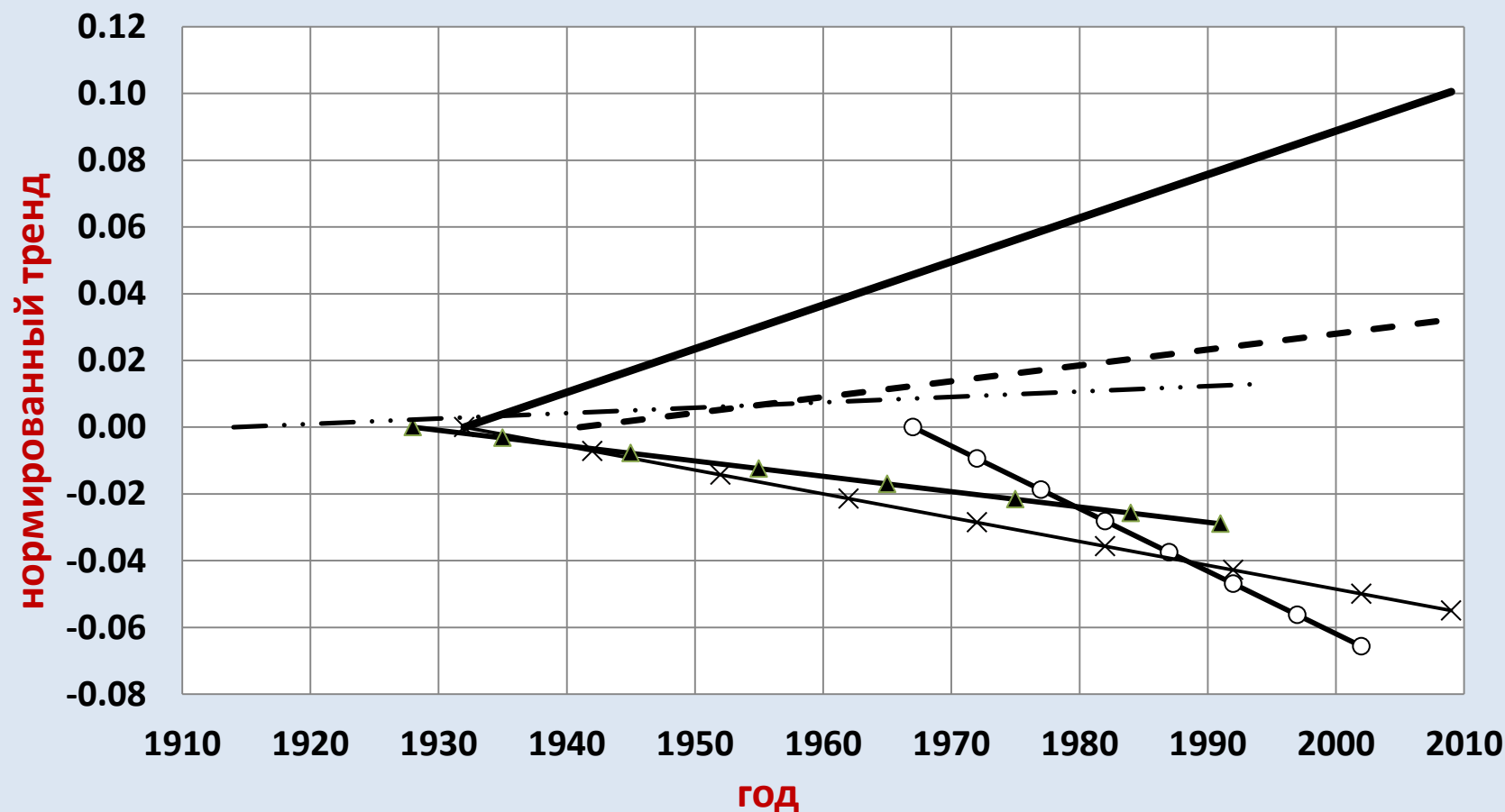
—*— Пяндж
--- Кафирниган
— Фан-Дарья

—▲— Обихингоу
--- Зеравшан
—●— Искандер-Дарья

**Удорожание строительства ГЭС на крупных реках
Таджикистана по сравнению с р. Вахш**

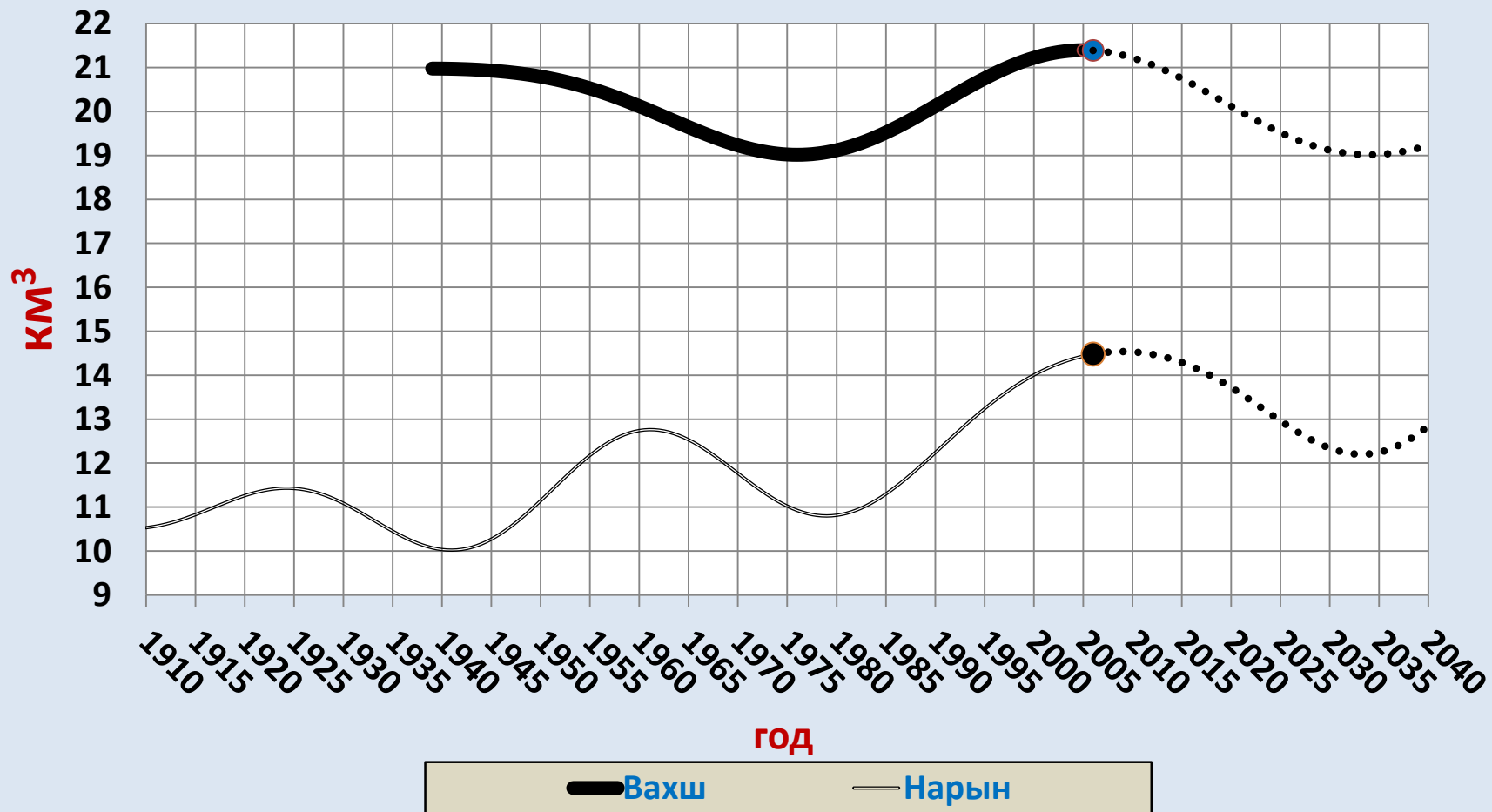
Река	Вахш	Обихингоу	Сурхоб	Фан-Дарья	Искандер- Дарья	Зеравшан	Кафирниган	Ягнوب
К	1.00	0.68	0.67	0.43	0.35	0.29	0.27	0.21
$p_i/p_{\text{Вахш}}$	1.00	1.29	1.30	1.67	1.83	1.98	2.05	2.25

Многолетняя изменчивость водного стока рек Таджикистана

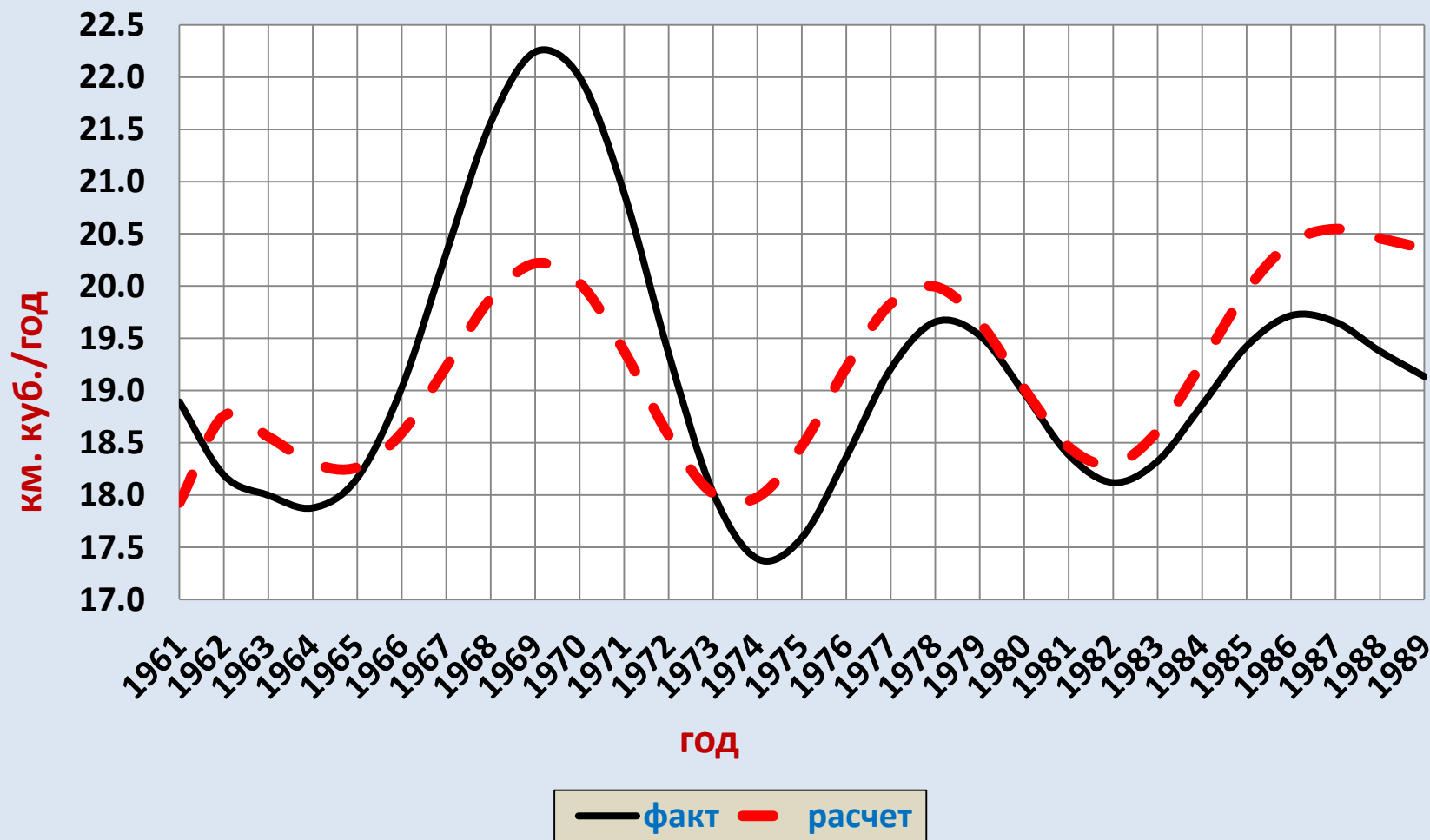


○ Пяндж × Вахш ▲ Кафиргиган · Зеравшан - - Гунт — Варзоб

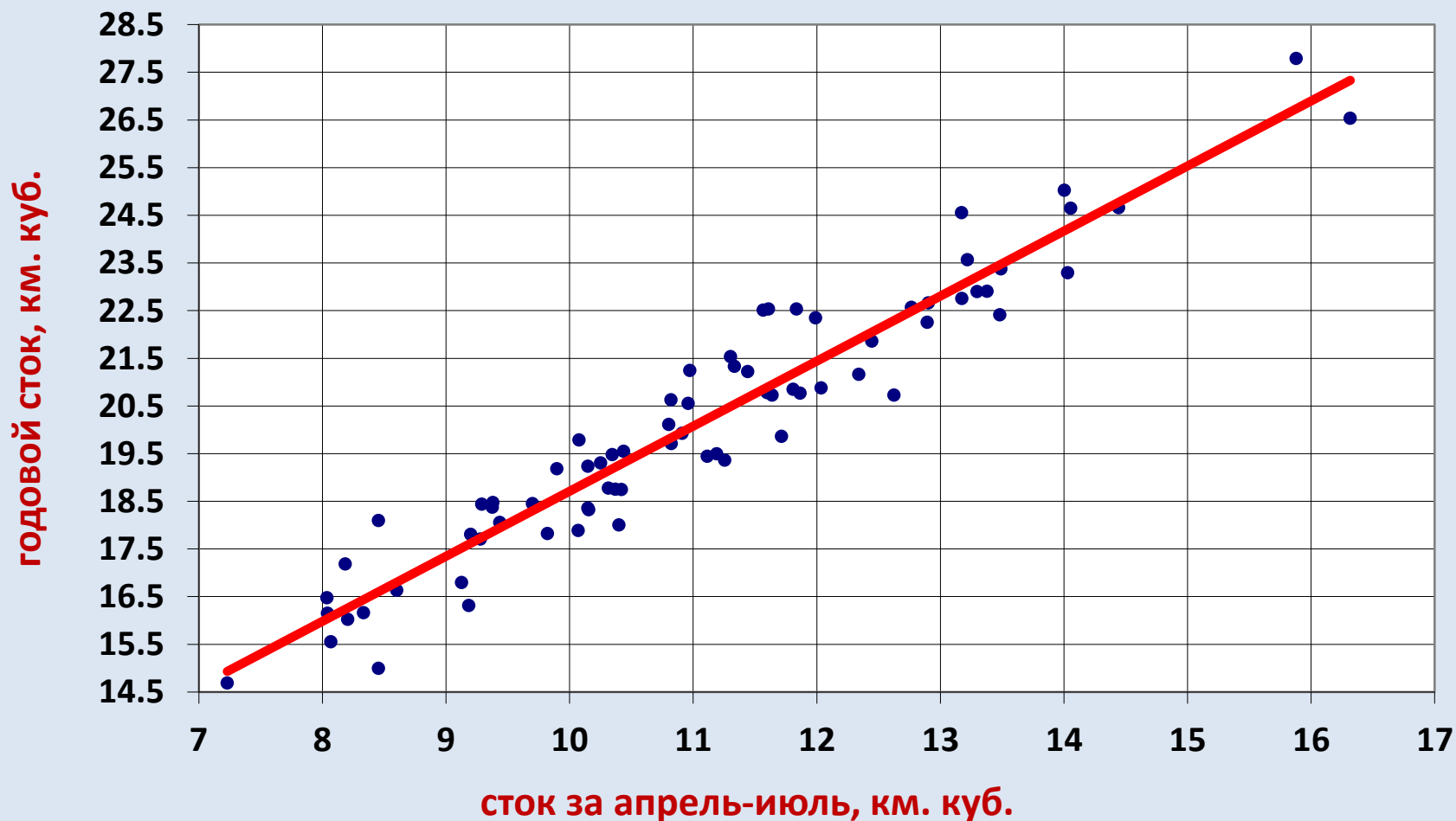
Цикличность водного стока рек Вахш и Нарын



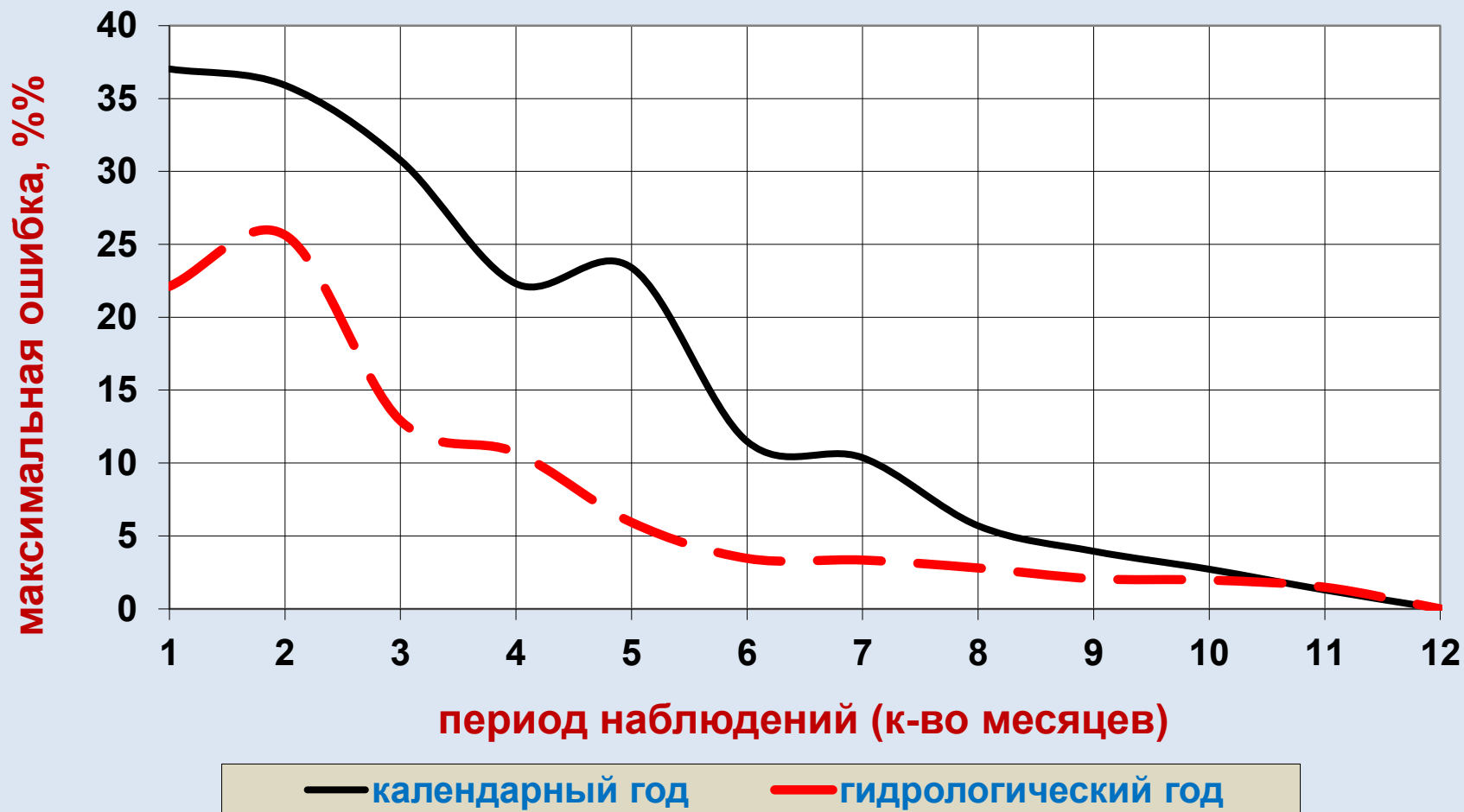
**Фактическая и расчетная [$W = f(\text{осадки, температура})$]
цикличность водного стока р. Вахш**



Зависимость годового стока от стока за апрель-июль. р. Вахш



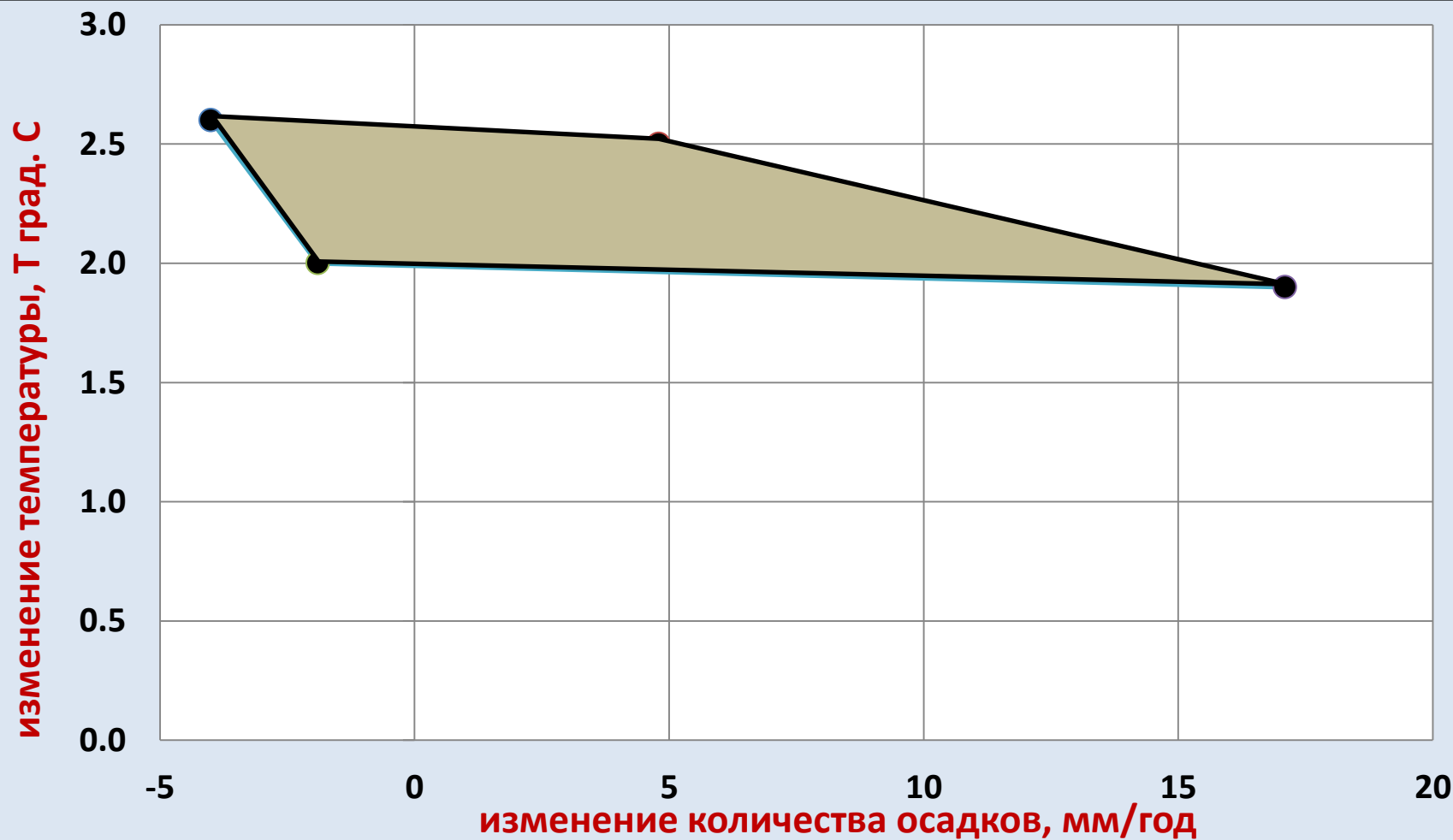
Максимальные ошибки прогноза годового стока в зависимости от периода наблюдений. р. Вахи



Средняя ошибка прогноза годового объема стока в зависимости от периода наблюдения. р. Вахш



Диапазон изменения климата по разным сценариям (для всего года)



***Критерии эффективности
опорожнения водохранилищ***

$$T \leq \frac{S(H_1 + H_2)}{86400Q_0}$$

$$Q_0 \leq \frac{S(H_1 + H_2)}{86400T}$$

Эффективность сработки Кайраккумского водохранилища для выработки электроэнергии в зависимости от конечного напора и времени



Математическая модель регулирования режима стока для Нурекской ГЭС на реке Вахш

Исходные данные

год	2009									2010		
месяц	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март
Среднемесячный расход, м ³ /сек	410	755	1039	1312	1235	585	355	283	217	200	205	283
Месячный объем стока, км ³	1.063	2.022	2.693	3.514	3.308	1.516	0.951	0.758	0.581	0.536	0.496	0.758
Накопленный объем стока	1.063	3.085	5.778	9.292	12.600	14.116	15.067	15.825	16.406	16.942	17.438	18.196

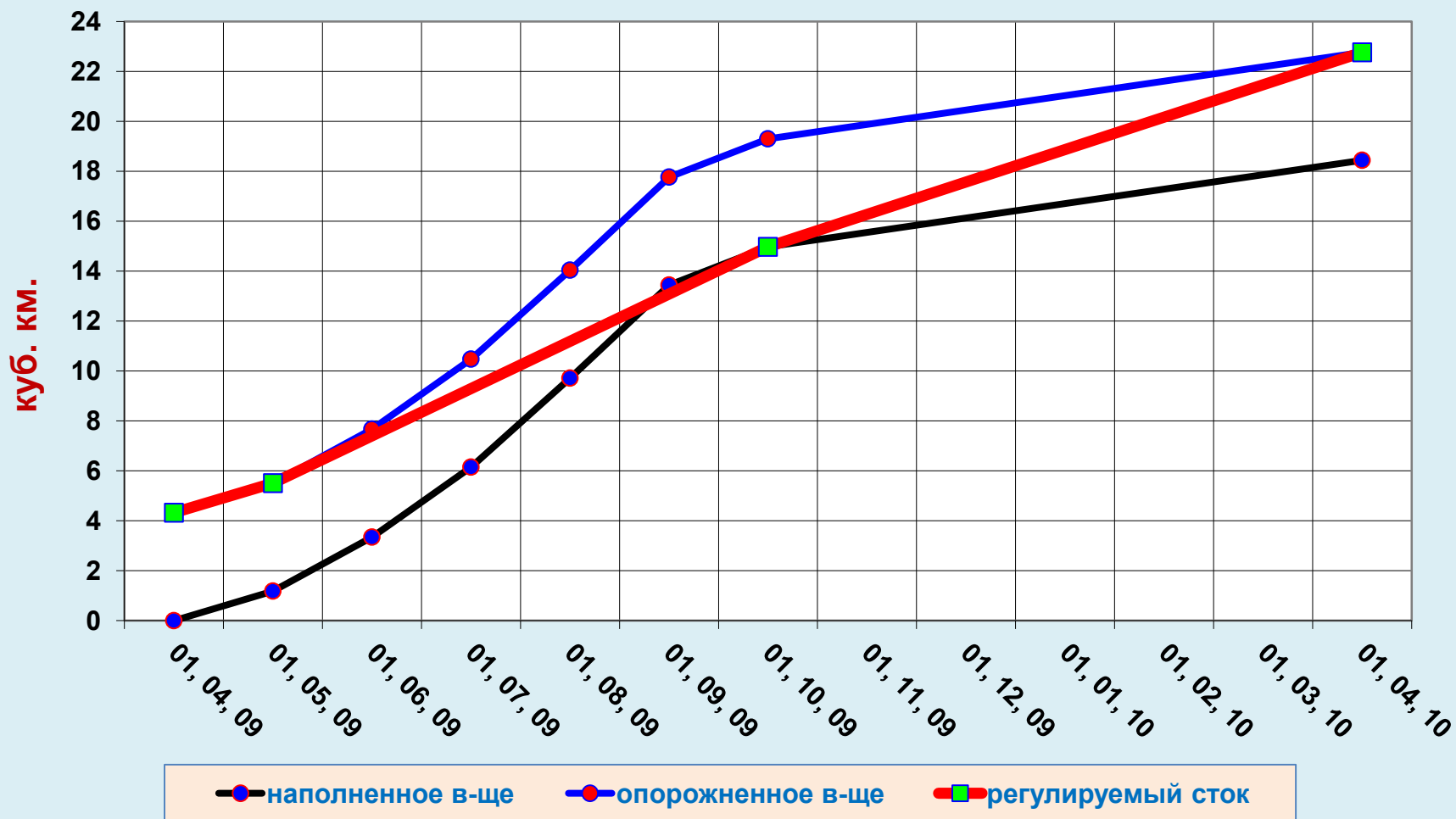
Математическая модель регулирования режима стока для Нурекской ГЭС на реке Вахш

Результаты

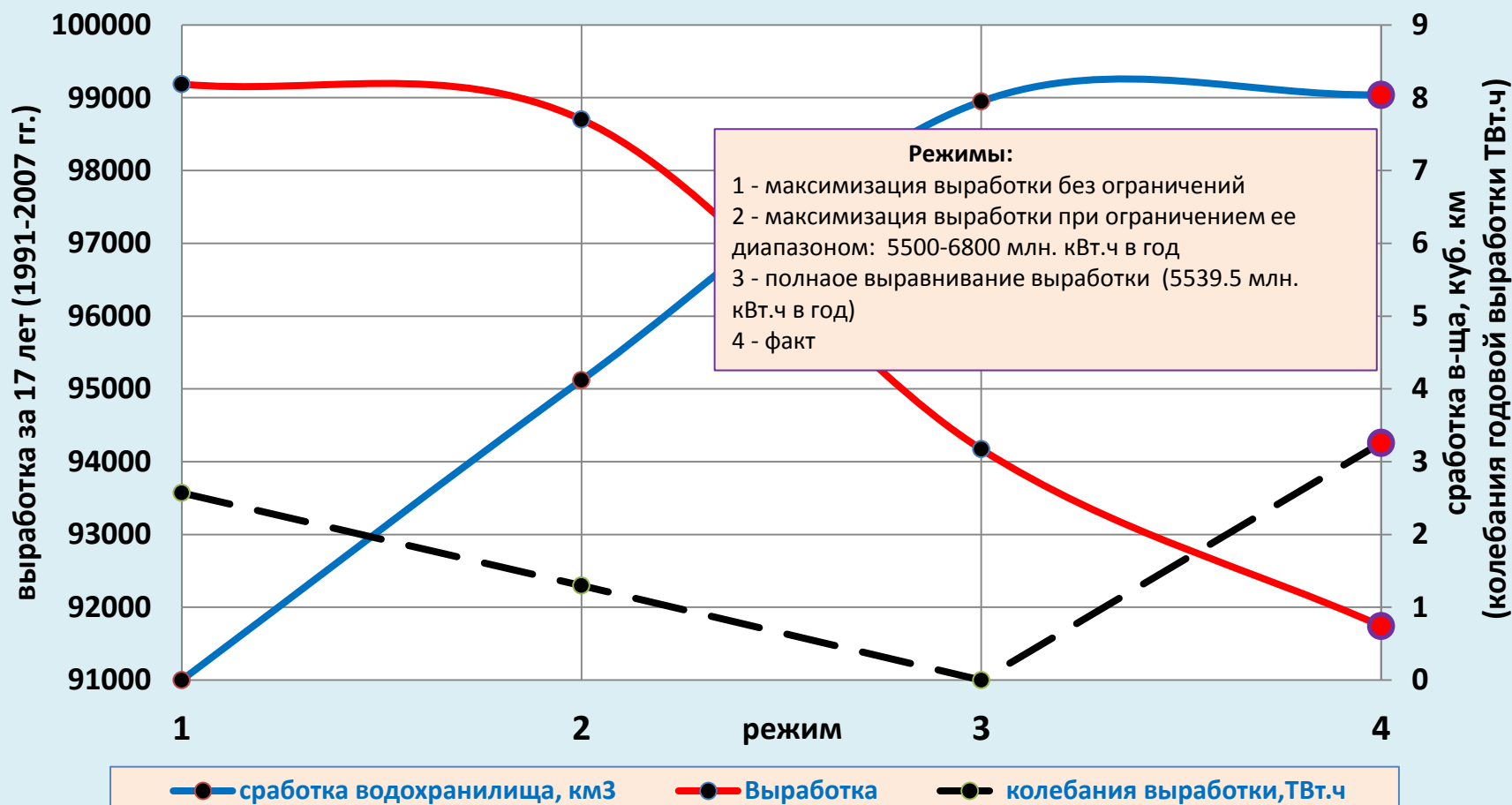
Выработка электроэнергии, млн. кВт.ч			годовой сток, км ³		паводок, км ³	
дата прогноза	за год	за XI - III	W _{год.} км ³	Q _{ср. год.} м ³ /с	июнь-август	май-сентябрь
1-го мая	11284.1	3770.1	20.13	638.5	11.019	15.093
1-го июня	11167.8	3756.0	19.99	633.8	10.939	14.980
1-го июля	10721.8	3672.1	19.11	606.1	10.465	14.306
1-го августа	10351.1	3607.7	18.44	584.8	10.099	13.788
1-го сентября	10281.8	3595.8	18.32	580.9	10.031	13.691
1-го октября	10175.2	3680.7	18.11	574.4	9.920	13.534
1-го ноября	10257.3	3744.3	18.26	579.1	10.000	13.647
1-го декабря	10356.1	3808.4	18.44	584.7	10.096	13.784

Модель Нурекской ГЭС.

Результаты расчетов блоков 1, 2, 3 на 01. 08



Фактический и расчетные режимы работы Токтогульской ГЭС



Максимизация выработки электроэнергии при ее 100-% выравнивании

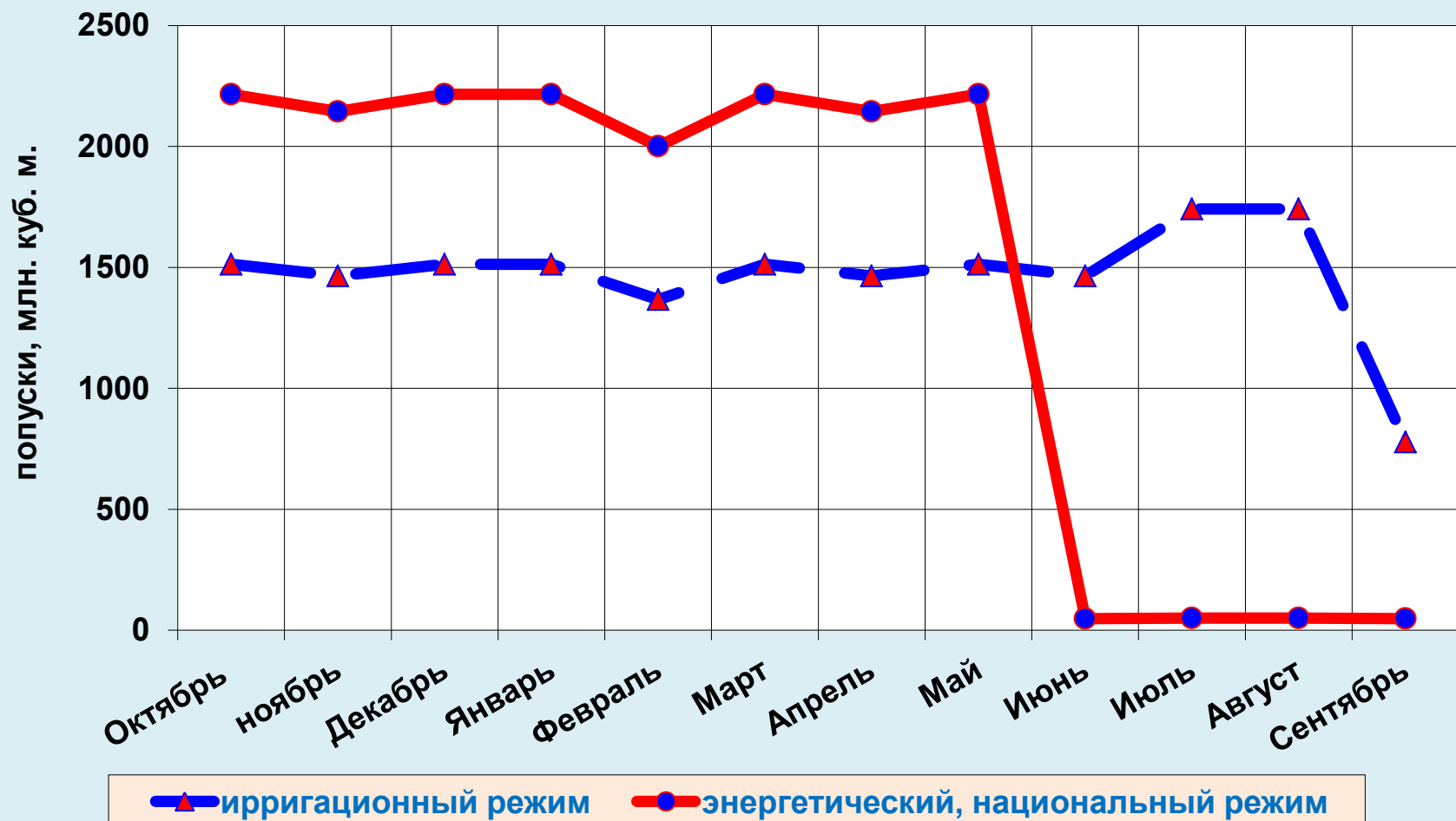
Токтогульский г/у



Математическая модель оптимизации работы Кайраккумской ГЭС на р. Сырдарья (энергетический режим)

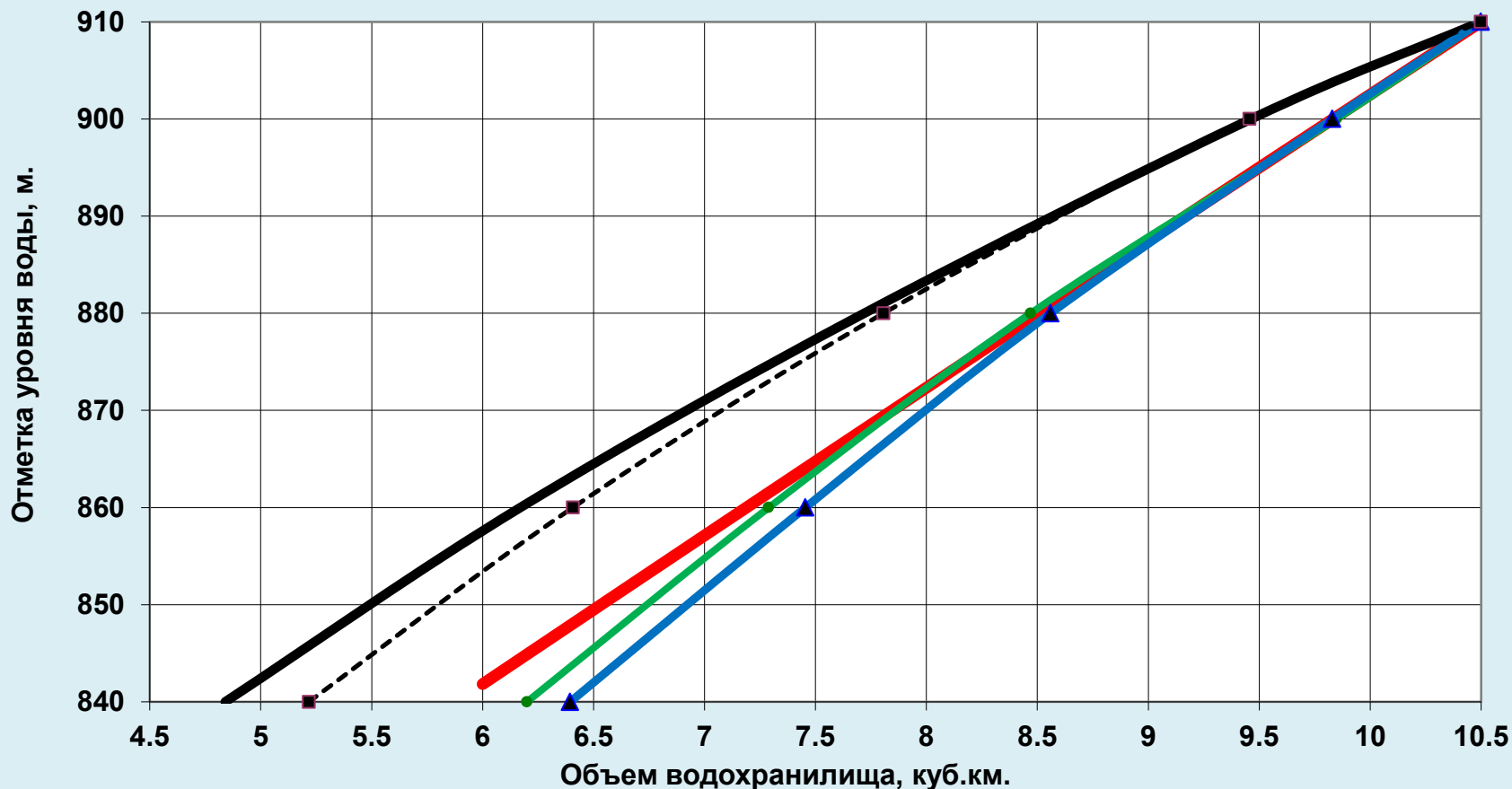
Год	2001год			2002год								
Месяц	Октябрь	ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Приток,Q	770.00	725.00	930.00	880.00	870.00	660.00	500.00	268.11	260.18	323.85	333.85	170.18
Приток,W	2062.37	1879.20	2490.91	2356.99	2128.90	1767.74	1296.00	718.11	674.38	867.40	894.18	441.10
Попуск,Q	827.00	827.00	827.00	827.00	827.00	827.00	827.00	827.00	18.75	18.76	18.76	18.75
Попуск,W	2215.04	2143.58	2215.04	2215.04	2000.68	2215.04	2143.58	2215.04	48.59	50.24	50.24	48.59
6 - 8	-152.67	-264.38	275.88	141.96	128.22	-447.29	-847.58	-1496.93	625.79	817.16	843.94	392.51
Объём,нач	3560.50	3407.83	3143.45	3419.32	3561.28	3689.50	3242.20	2394.62	897.69	1523.48	2340.64	3184.59
Объём,кон	3407.83	3143.45	3419.32	3561.28	3689.50	3242.20	2394.62	897.69	1523.48	2340.64	3184.59	3577.09
Объём,ср.	3484.17	3275.64	3281.38	3490.30	3625.39	3465.85	2818.41	1646.16	1210.59	1932.06	2762.61	3380.84
Нср. В.Б.	347.61	347.26	347.27	347.62	347.83	347.58	346.36	343.25	341.80	344.12	346.24	347.44
Нср. Н.Б.	327.60	327.60	327.60	327.60	327.60	327.60	327.60	327.60	325.50	325.50	325.50	325.50
Напор,ср.	20.01	19.66	19.67	20.02	20.23	19.98	18.76	15.65	16.30	18.62	20.74	21.94
q,куб.м/квт.ч	22.04	22.54	22.52	22.02	21.74	22.08	23.91	30.05	28.54	24.14	21.06	19.62
Э,млн.квт.ч.	100.51	95.12	98.35	100.57	92.03	100.32	89.66	73.70	1.70	2.08	2.39	2.48
Сумма	100.51	195.63	293.98	394.55	486.58	586.90	676.56	750.27	751.97	754.05	756.44	758.92
Q,мах.пр.	835.20	851.47	851.00	834.75	825.20	836.56	891.76	955.22	957.72	897.69	802.16	756.22

Энергетический и ирригационный режимы Кайраккумского водохранилища



Мониторинг заилнения водохранилищ. Нурек.

Сравнительный анализ зависимостей: $H = f(W)$



— 2003г. Расчет по данным г/п + бок. приточность — проект — 1989г. — 1994г. - - 2001г.

Экономика гидроэнергетики.

$\sum U_n^{\text{э.с.}}$ Основные зависимости

$$= \sum_{i=0}^{i=(n-1)} \left(\alpha N_0 \Psi(\beta^i T_0 - c) \prod_{i=0}^{i=(n-1)} \left(1 + \frac{\alpha \Psi(\beta^i T_0 - c)}{s} \right) \right)$$

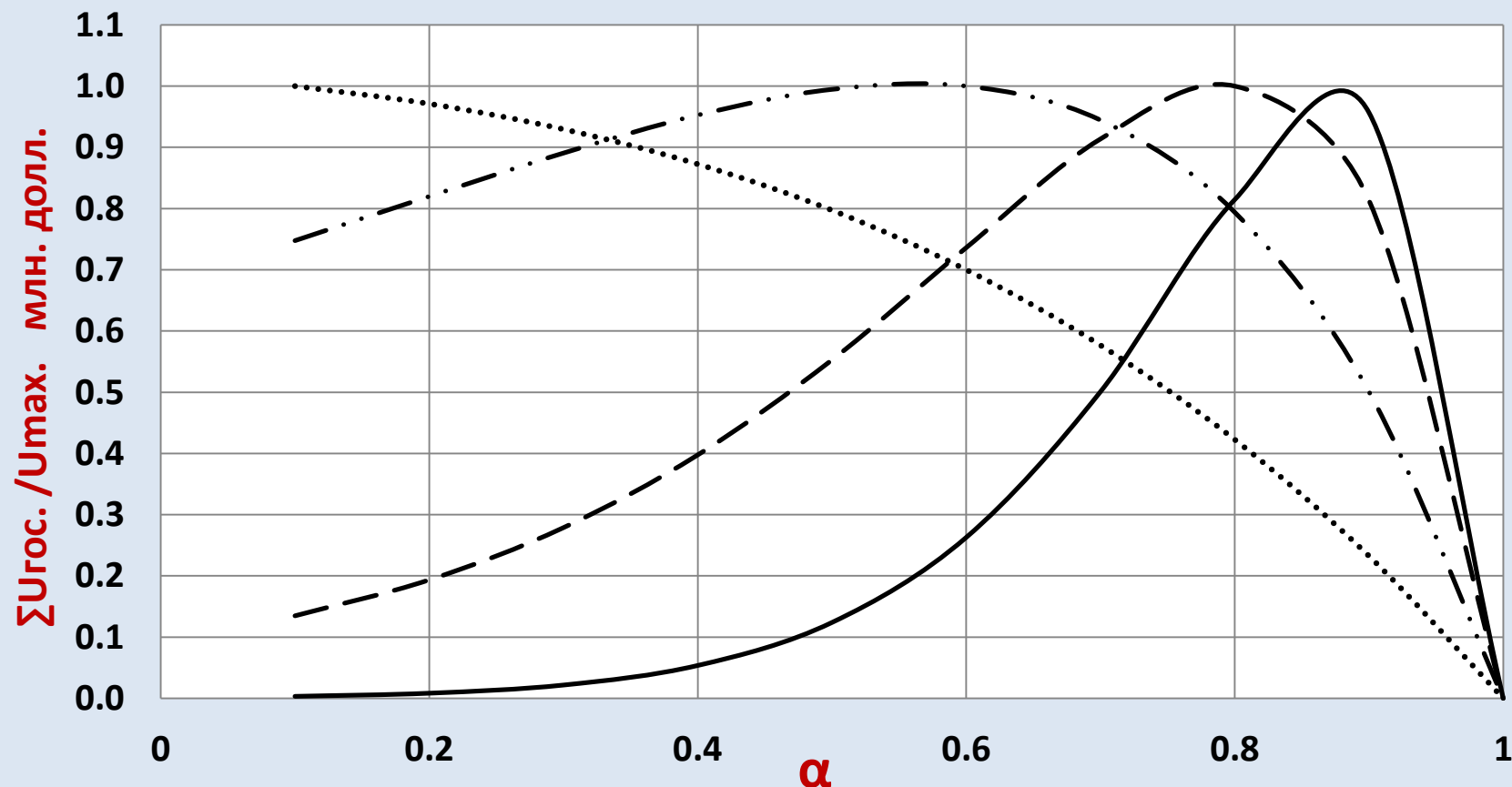
$$\sum U_n^{\text{гос.}}$$

$$= \sum_{i=0}^{i=(n-1)} \left((1 - \alpha) N_0 \Psi(\beta^i T_0 - c) \right)$$

Математическая модель оптимизации развития гидроэнергетики

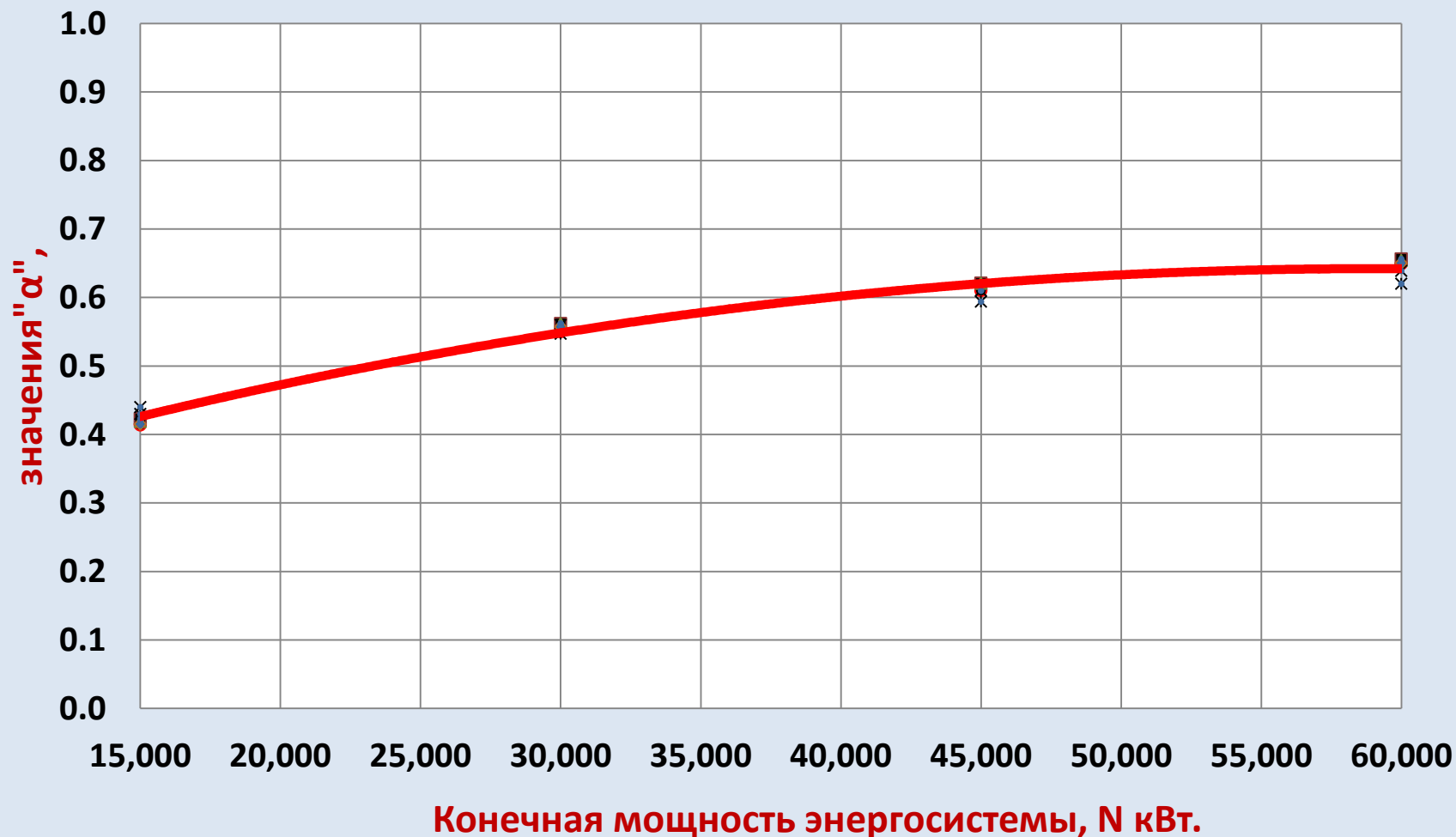
Исходные данные				Результаты						
N_0	4400	МВт		год	5	10	15	20	25	30
Ч	4000	час/год		N_t	4561	4905	5595	7005	10155	18475
T_0	1	цент/кВ т.ч		$U_{\text{гос}}$	423	1216	2801	6083	13608	34413
с	0.5	цент/кВ т.ч		T_t	1.61	2.59	4.18	6.73	10.83	17.45
β	1.1	б/р	N - МВт U - млн. долл. ц - цент/кВт.ч.							
S	2000	долл/кВ т								
α	0.5	б/р								

**Общая прибыль для государства в зависимости от
уровня налогообложения и сроков планирования**
($\beta = 1.15$; $S = 1000$ долл/кВт)



— планирование 30 лет - - планирование 25 лет — · планирование 20 лет планирование 15 лет

Оптимальные значения " α ", при развитии энергосистемы до мощности N кВт

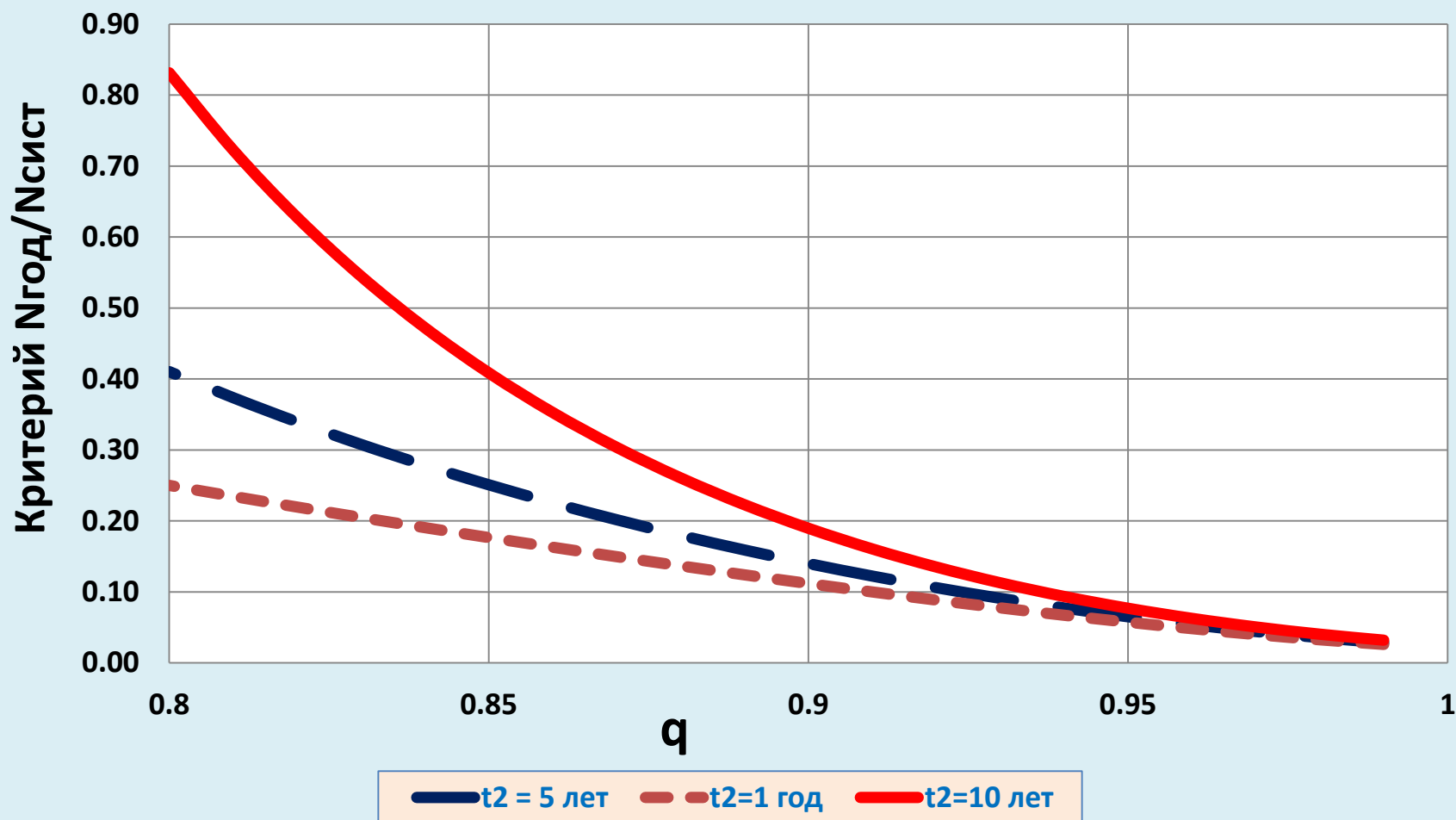


Критерии экономической эффективности строительства ГЭС

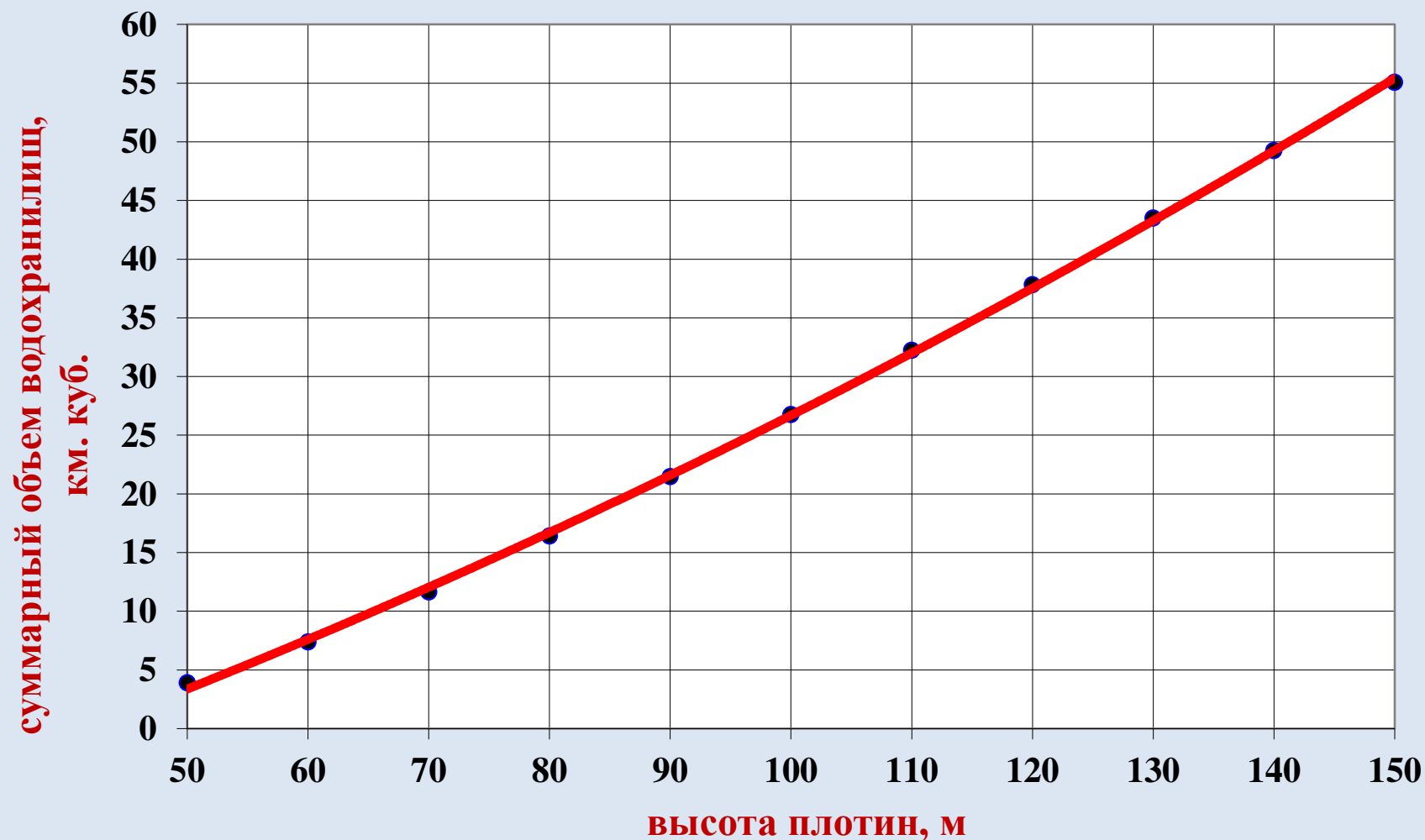
$$\frac{N_{\text{э.с}}^{\text{ГОД}}}{N_{\text{СИСТ}}} \geq \frac{(1 - q^{t_2})}{t_2 \times (q^{t_2} - q^{t_1})}$$

$$\frac{N_{\text{э.с}}^{\text{общ}}}{N_{\text{СИСТ}}} \geq \frac{(1 - q^{t_2})}{(q^{t_2} - q^{t_1})}$$

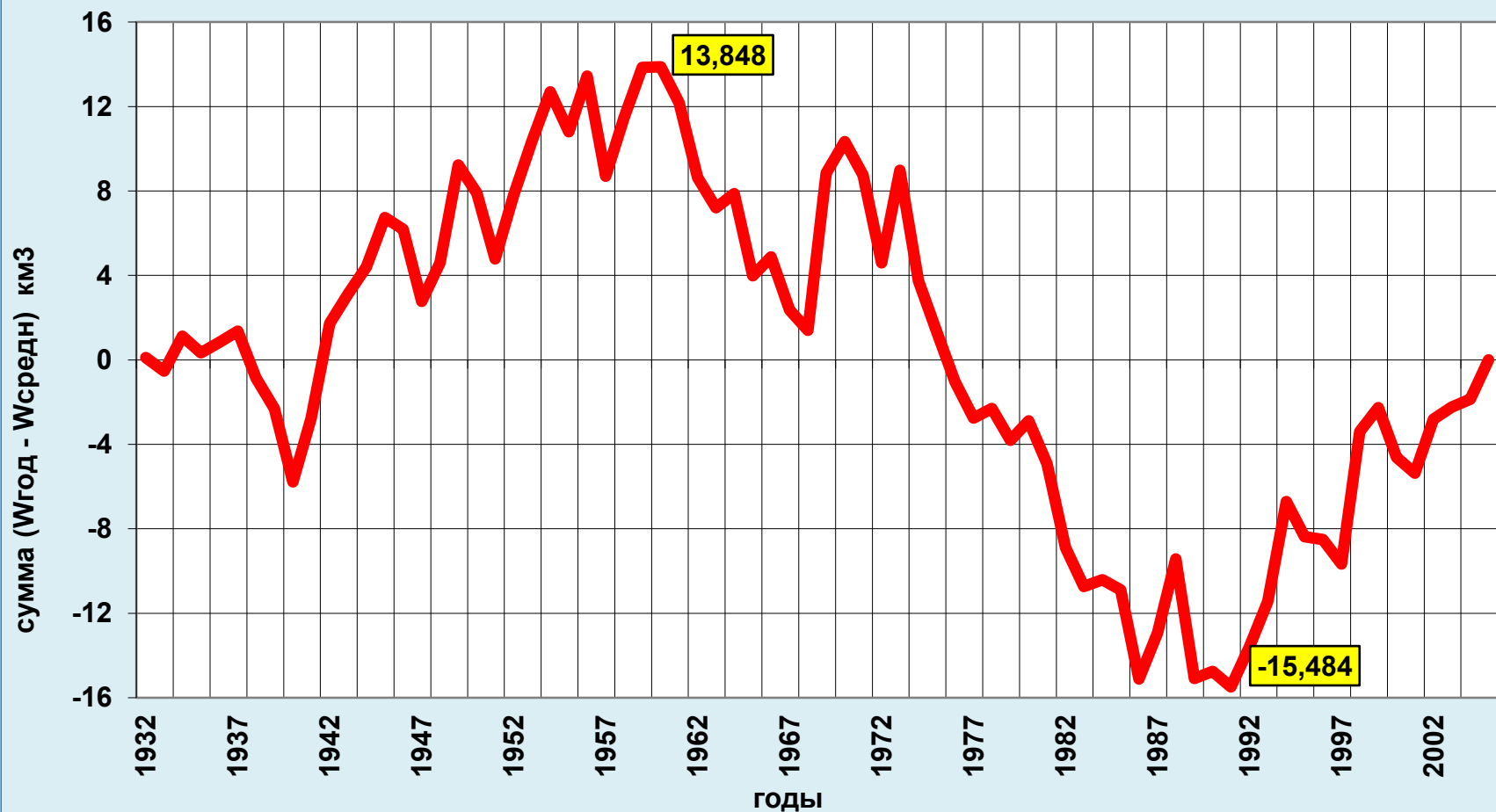
Общая экономическая эффективность развития гидроэнергетики



Суммарный объем водохранилищ бассейна р. Вахи в зависимости от высоты плотин



Необходимый объем регулирования стока реки Вахш



Регулирование, как механизм снижения риска ЧС

Наводнения на реке Пяндж на единицу территории, происходят **в 50 раз чаще, чем в среднем в мире**. При этом водность реки Пяндж, все последние десятилетия неуклонно снижалась.

В то же время на реке Вахш, ресурсы которой полностью используются для гидроэнергетики и ирригации, за исследуемый период **не было ни одного серьезного наводнения**.

Основной принцип безопасности

Безопасность водохозяйственных комплексов стран Центральной Азии обеспечивается не их изолированным функционированием, а такой интеграцией, взаимозависимостью друг с другом, разрыв которых был бы недопустим ни для одной из них

Выработка электроэнергии в Таджикистане в 2010 году

Месяц	Выработка энергосистемы Таджикистана, ГВт.ч	Потери за счет холостых сбросов, ГВт.ч
май	1348.0	372
июнь	1331.03	954
июль	1412.62	1827
август	1388.25	2292

***Международный опыт совместного
использования водно-энергетических ресурсов
трансграничных рек***

- Принцип абсолютного территориального суверенитета и абсолютной территориальной целостности.
- Доктрина ограниченного территориального суверенитета.
- Принцип оптимизации **общих** выгод.

Национальные и региональные интересы стран Центральной Азии

Национальные интересы - концепции, стратегии, программы и планы, утверждаемые Правительствами стран.

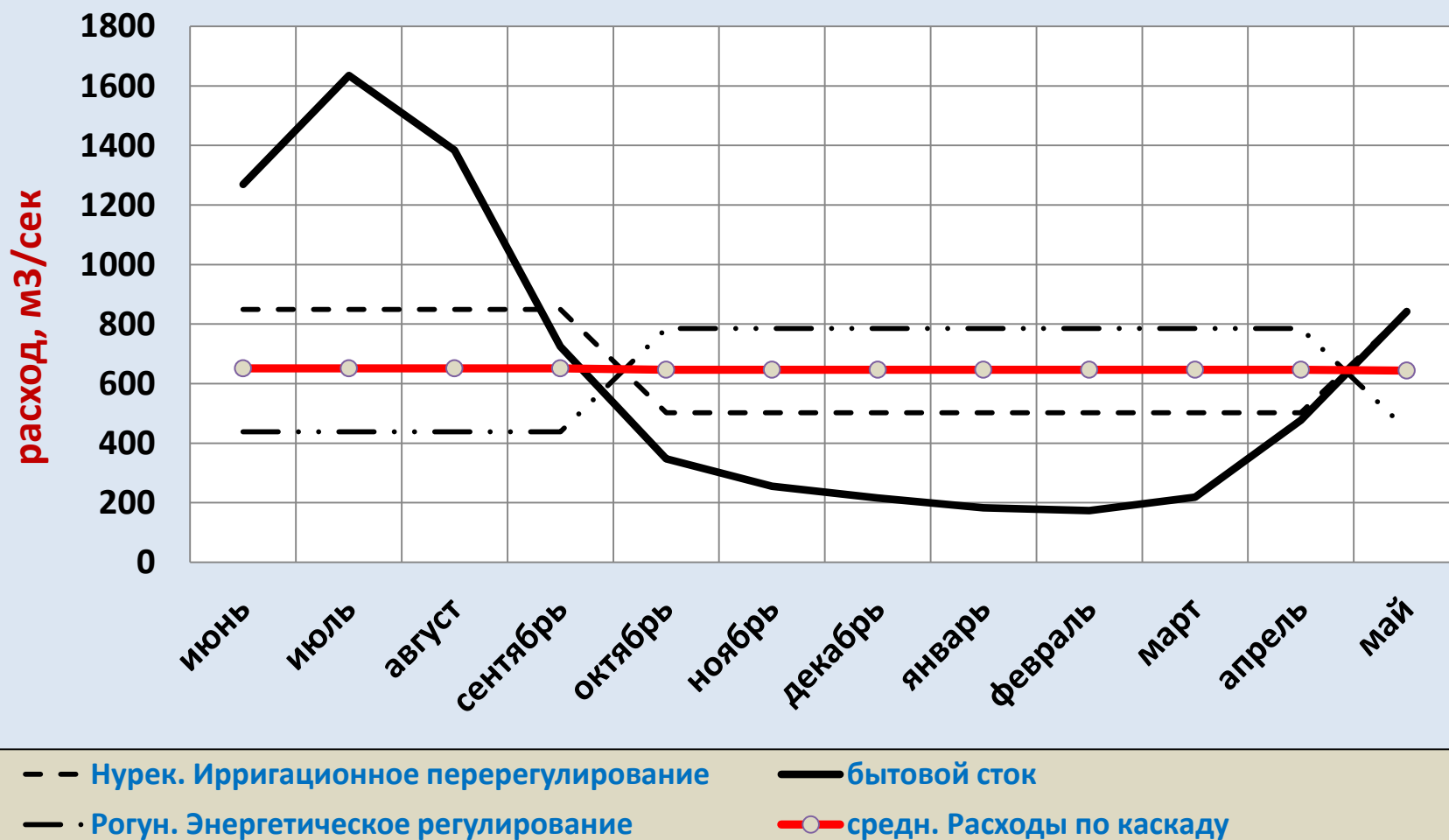
Региональные интересы - взаимовыгодное согласование национальных – на основе межгосударственных договоров, соглашений, контрактов.

Право государств при эксплуатации трансграничных водохранилищ

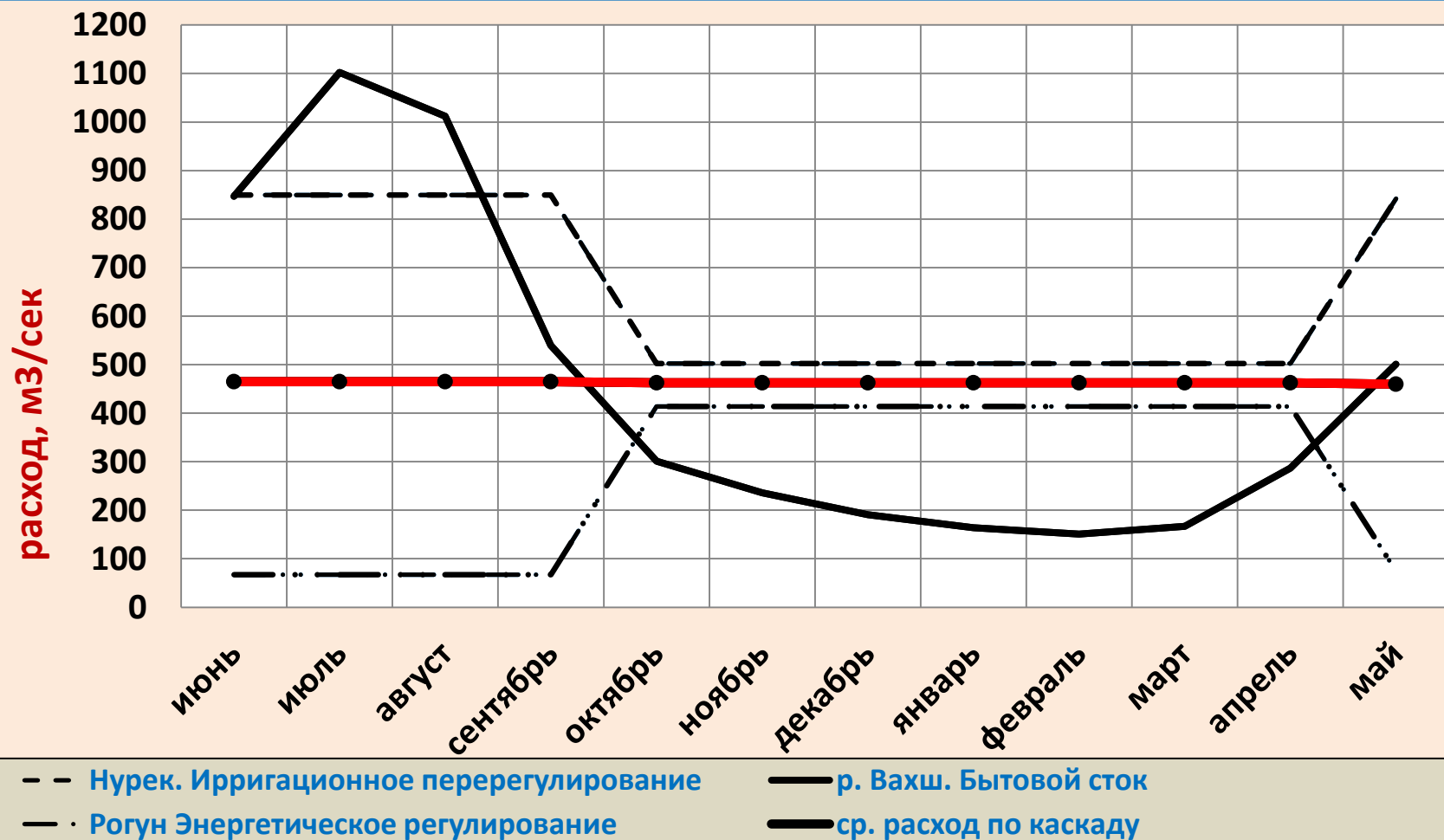
Суверенное государство обладает всеми правами по безусловному установлению на принадлежащих ему и расположенных на его территории водохранилищах, любых, соответствующих его национальным интересам, режимов регулирования речного стока.

В случае если эти режимы затрагивают или противоречат интересам других государств бассейна, государство-владелец должно сделать все возможное, чтобы изменить режимы работы своих гидроузлов в пользу этих заинтересованных государств, с предоставлением ему с их стороны компенсаций всех возникающих при этом потерь и ущербов

Каскадное регулирование стока Нурекским и Рогунским водохранилищами для года средней водности



Каскадное регулирование стока Нурекским и Рогунским водохранилищами для года минимальной водности



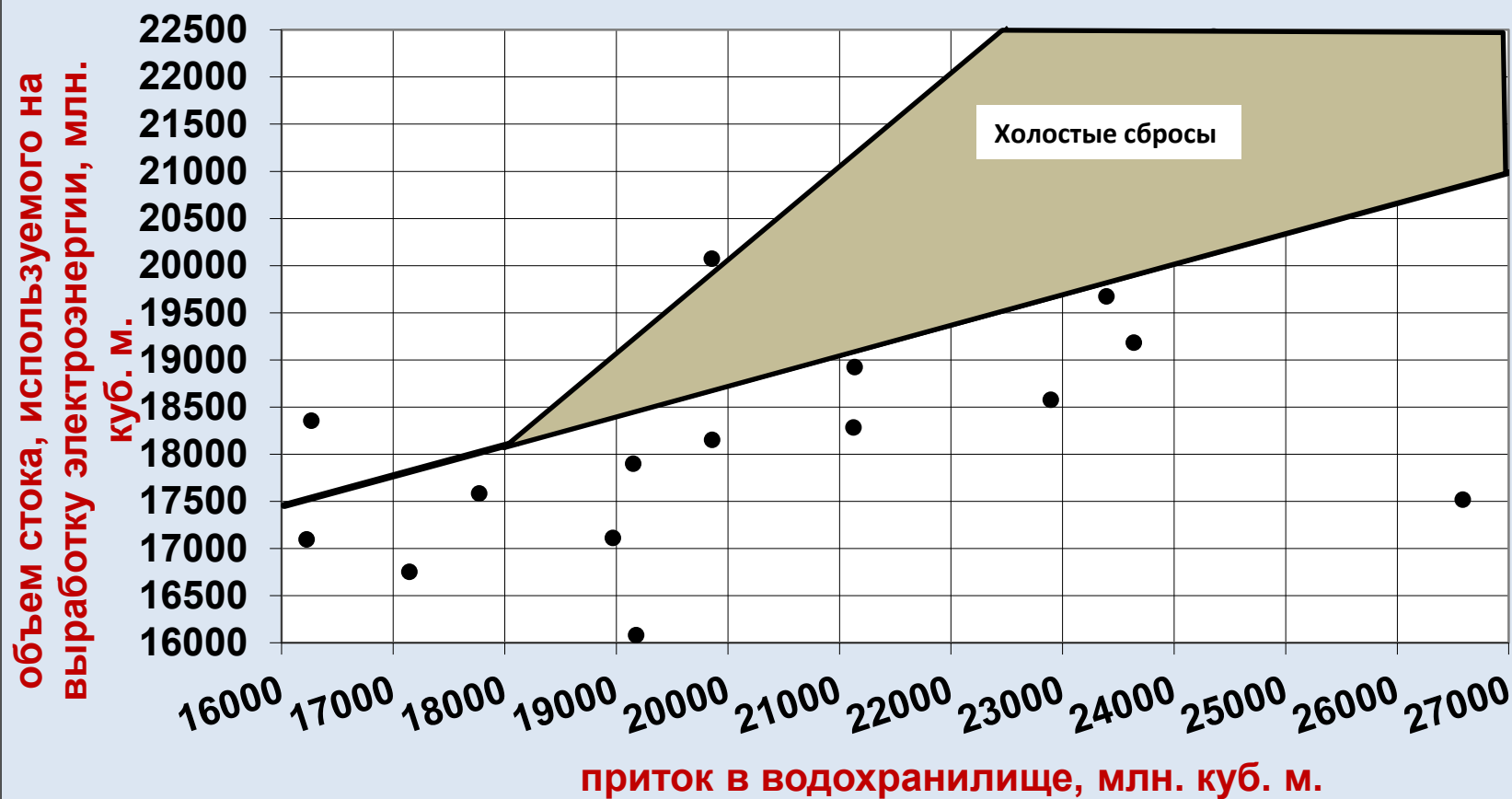
**Комплексное ирригационно-энергетическое
регулирование стока Рогунской и Нурекской ГЭС**

Режим ирригационного регулирования стока Нурекской ГЭС	Существующий				режим
	Для года минимальной водности	Для года средней водности	Для года максимальной водности		
	845.41	842.1	843.79	842.0	май
	863.23	863.7	818.40	849.5	июнь
	863.23	863.7	818.40	849.5	июль
	863.23	863.7	818.40	849.5	август
	863.23	863.7	818.40	849.5	сентябрь
	511.46	507.4	818.40	502.6	октябрь
	511.46	507.4	818.40	502.6	ноябрь
	511.46	507.4	818.40	502.6	декабрь
	511.46	507.4	818.40	502.6	январь
	511.46	507.4	818.40	502.6	февраль
	511.46	507.4	818.40	502.6	март
511.46	507.4	818.40	502.6	апрель	

Стоимость регулирования стока в бассейне р. Сырдарья (кривая предложения)



Зависимость объема воды, используемой на выработку электроэнергии от притока в водохранилище



Стоимость гидрологического прогноза

Тариф на электроэнергию, цент/кВт.ч.	Общая стоимость гидрологического прогноза, млн. долл.	Стоимость прогноза паводковых расходов, млн. долл.
0,5	5,0	3,0
1,0	10,0	6,0
2,0	20,0	12,0
3,0	30,0	18,0
5,0	50,0	30,0
10,0	100,0	60,0

Результаты исследований

1. Разработаны оптимизационные и имитационные математические модели регулирования стока и работы гидроузлов, в том числе в каскаде. Их использование позволяет решать целый ряд практических задач, как национального, так и регионального уровня. Показано, что использование моделей для оптимизации работы Нурекского и Токтогульского гидроузлов повышает эффективность регулирования стока и при обеспечении требований ирригации увеличивает выработку гидроэнергии на 5-15%.

Результаты исследований

2. Исследованы варианты межгосударственных взаимоотношений между гидроэнергетикой и ирригацией при совместном использовании водноэнергетических ресурсов трансграничных рек. Установлено, что в современных условиях наиболее целесообразным из них является метод услуг и компенсаций. Для его практической реализации разработан метод определения стоимости воды, позволяющий минимизировать общую стоимость услуг при каскадном регулировании стока.

Результаты исследований

3. Выполнен анализ мирового права и опыта в области использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек. Показано, что оптимальные решения проблемы конфликта между гидроэнергетикой и ирригацией могут быть найдены при более широком рассмотрении вопроса, за счет выхода за границы этих двух существующих отраслей. Одно из таких решений связано со строительством новых гидроузлов комплексного ирригационно-энергетического назначения. Другим решением является расширение состава участников, включение в его круг также общей энергетики региона, на 80% состоящей из тепловых электростанций. В этом случае возможно соблюдение интересов, как гидроэнергетики, так и ирригации за счет простых сезонных перетоков электроэнергии, без каких-либо потерь с той или другой стороны.

Результаты исследований

- 4.** Предложен метод оперативного прогноза водного стока и разработана математическая модель для его практического использования. Основанный на фактических гидрологических замерах, он позволяет с помощью водохранилищ оптимизировать режим водного стока, как с точки зрения летних попусков для ирригации, так и для выработки электроэнергии ГЭС в зимний, наиболее дефицитный период.
- 5.** Разработан практический метод постоянного мониторинга динамики изменения полезного объема водохранилищ с учетом факторов заиления и переработки берегов.
- 6.** Обоснован выбор эффективной стратегии каскадного освоения водно-энергетических ресурсов, обеспечивающей решение комплексных задач хозяйственного использования водных ресурсов - регулирования стока в интересах ирригации и гидроэнергетики с учетом экономической эффективности и экологической безопасности.