

# РЕАКЦИЯ ТЕПЛООВОГО СТОКА РЕК НА ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ



Доцент, к.г.н. Магрицкий Д.В.

[magdima@yandex.ru](mailto:magdima@yandex.ru)

грант РФФ № 24-17-00084

<https://photocentra.ru/work/1030611>

$$\text{Речной сток} = \sum_{i=1}^5 W_i$$

$$W = \Delta T \times Q_0$$

- СТОК ВОДЫ (м<sup>3</sup>),

$$W_{R+G} = \Delta T \times Q_0 \times S$$

- СТОК ВЗВЕШЕННЫХ И ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ (кг, т),

$$W_c = \Delta T \times Q_0 \times c$$

- СТОК ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ (кг, т),

$$W_B = \Delta T \times Q_0 \times r$$

- СТОК БИОЛОГИЧЕСКИХ СУБСТАНЦИЙ (кг, т),

$$W_t = \Delta T \times Q_0 \times \rho \times C \times t$$

- СТОК ТЕПЛОТЫ (кДж)

$\Delta T$  - расчетный интервал времени (сек.),

$Q_0$  - средний расход воды (м<sup>3</sup>/с) за интервал времени  $\Delta T$ ,

$\rho$  - плотность воды (кг/м<sup>3</sup>),

$t$  - средняя за  $\Delta T$  температура воды (град. по Цельсию),

$C$  - удельная теплоемкость воды (4,174–4,212 кДж/(кг·°C)) при  $t$  от 0 до 30°C,

# Тепловой сток рек и гидрологические процессы

- Ледовый и термический режим рек,
- Ледовые условия и тепловой баланс прибрежной зоны морей, особенно арктических (~10% вклад в уменьшение льдов на арктическом шельфе за 1980-2015 гг. [Hotaek Park et al., 2020]), судоходство по СМП,
- Скорость и характер химических и биологических процессов в речных водах, самоочищающая способность рек,
- Условия существования и размножения гидробионтов,
- Климат и растительность долин - смещение границ лесной зоны дальше на север по долинам рек, текущих на север,



# Тепловой сток рек и гидрологические процессы в криолитозоне

- Термоэрозия и термоабразия берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами

**[Costard et al., 2003] экспериментально подтвердили на примере нижней Лены:**

*«...при условии быстрого выноса продуктов размыва скорость эрозии берега прямо пропорциональна температуре воды, и ее увеличение на 1°С увеличивает скорость эрозии на 1 мм/мин.....»*

*.....Вклад механической эрозии в несколько раз меньше и тоже возрастает при увеличении температуры воды...»*



Термоабразионные берега в дельте Лены, авг. 2022



# Причины изменений теплового стока рек

$$W_t = W_Q \times t_B \times \rho_B \times C_p$$

## Естественные

- Рост температуры воды
- Изменения сроков и **увеличение продолжительности** теплого периода года
- Увеличение/уменьшение стока воды
- Трансформация в/г распределения расходов воды
- Изменение роли подземных вод, наледей, ледников, высокогорных снегов, мерзлоты в питании рек

## Антропогенные

- Сооружение водохранилищ, низконапорных судоходных гидроузлов и изменения характера движения и нагрева речных воды в пределах верхнего бьефа и подпорной зоны
- Сезонно-годовое регулирование речного стока водохранилищами
- Сброс более холодных/теплых вод в нижний бьеф водохранилищ
- **Заборы воды в каналы**
- «Тепловое загрязнение» рек использованными водами (с ТЭС, АЭС, предприятий)

# Антропогенные изменения: влияние водохранилищ

## Прямое воздействие:

- На температуру воды в нижнем бьефе из-за сбросов более холодных (глубинных) вод или более прогретых: **обогревают реки поздней осенью, зимой и весной, и охлаждают в остальное время года**



## Косвенное воздействие, которое особенно видно ниже участка прямого воздействия:

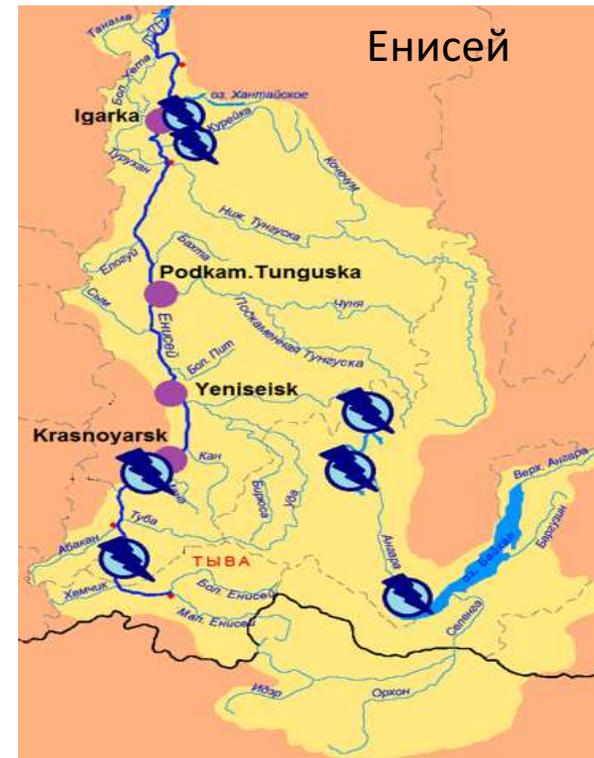
- На температуру воды в верхнем бьефе и на участке подпора – уменьшение скорости течения и увеличение глубин приводит к переходу к температурному режиму водоема. **Протяженные пойменно-русловые водохранилища ниже по течению от крупных долинных могут полностью «погасить» их тепловое влияние!**
- Внутригодовое распределение стока водохранилищами сез.-год. регулирования изменяет роль боковой приточности и др. факторов во вдольрусловой трансформации температурного режима и теплового стока зарегулированных рек,
- Срезка расходов воды половодья улучшает прогрев воды в этот сезон, который в целом обычно не может компенсировать уменьшение теплового стока реки.
- Увеличение меженного водного стока летом-осенью увеличивает тепловой сток.



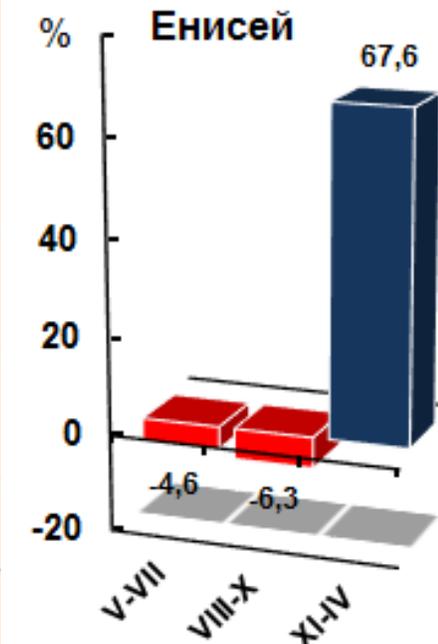
### Антропогенное изменение теплового стока (кДж 10<sup>12</sup>) по длине Енисея

Характеристики теплового стока	Месяцы								Всего
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
<b>Енисей – г. Красноярск</b>									
$\Delta = W_{T2} - W_{T1}$	16	-74	-283	-190	-88	-15	37	30	-567
$\Delta\%$									-55
<b>Ангара – д. Татарка</b>									
$\Delta = W_{T2} - W_{T1}$		-23	-49	-101	-107	-44	-55		-329
$\Delta\%$									-28
<b>Енисей – г. Енисейск</b>									
$\Delta = W_{T2} - W_{T1}$	9	-35	-344	-310	-187	-72	21	0,4	-918
$\Delta\%$									-39
<b>Енисей – д. Подкаменная Тунгуска</b>									
$\Delta = W_{T2} - W_{T1}$		2	-95	-261	-117	-59	3		-527
$\Delta\%$									-21
<b>Енисей – г. Игарка</b>									
$\Delta = W_{T2} - W_{T1}$		-2	-33	-289	-173	-84	-33		-614
$\Delta\%$									-15

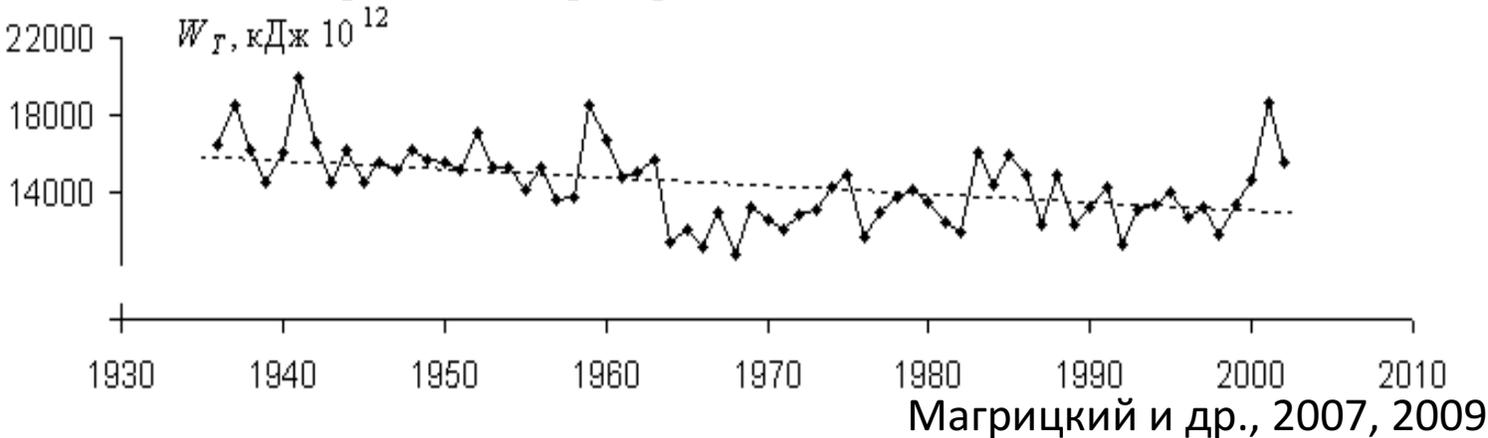
Примечания. \*естественный – 1951–1960 гг., измененный период – 1978–1987 гг.



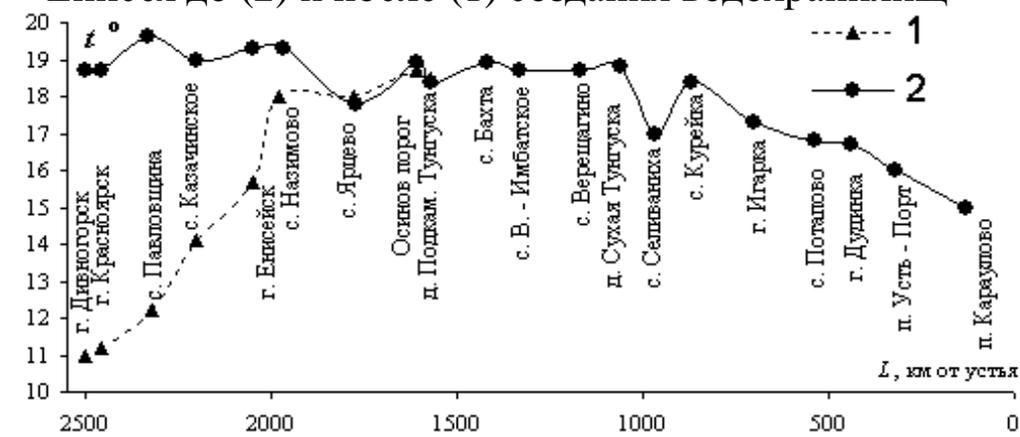
### Изменения стока в Игарке после зарегулирования



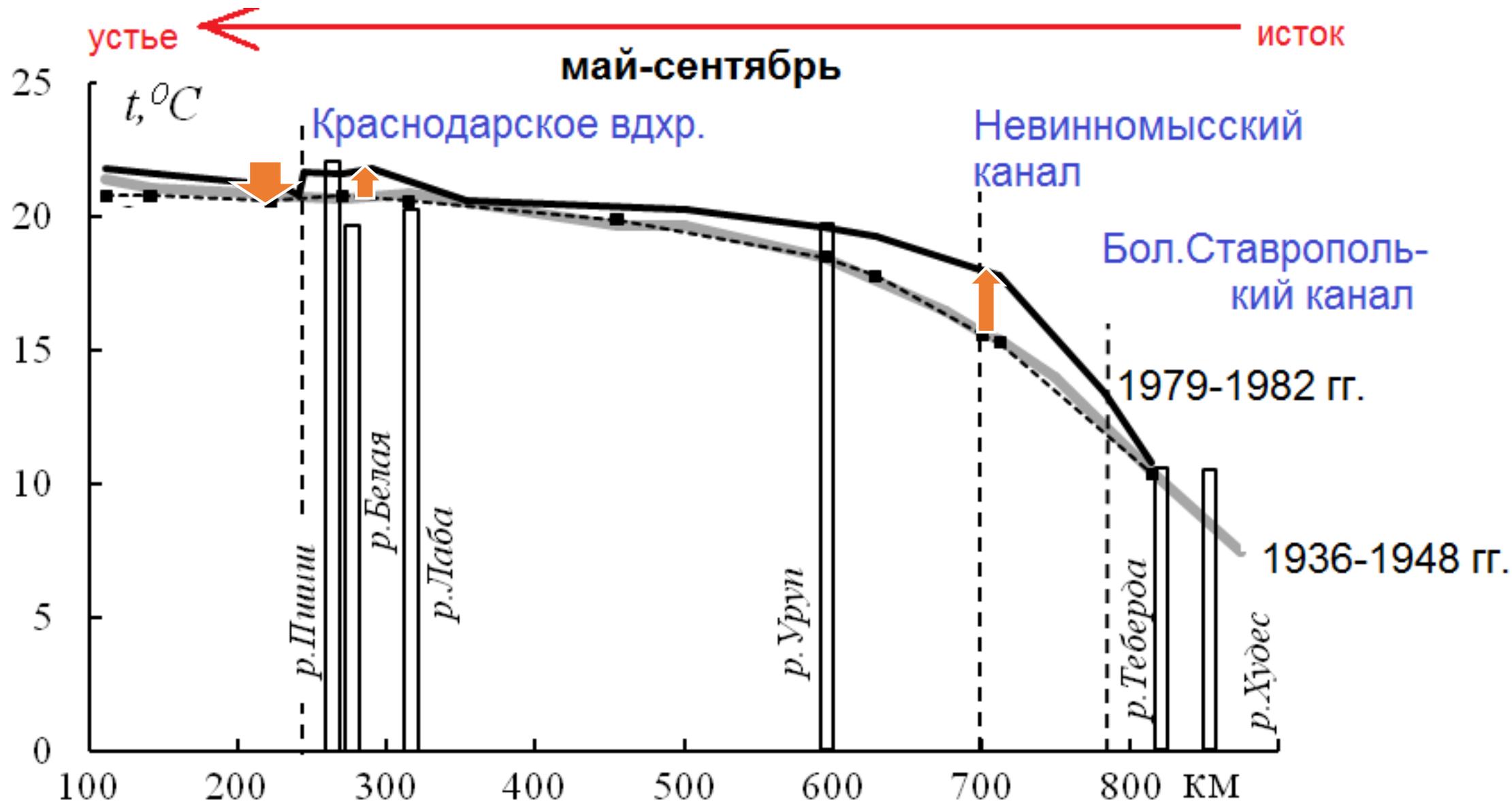
### Межгодовые колебания годового теплового стока в замыкающем створе (пост Игарка) р.Енисей



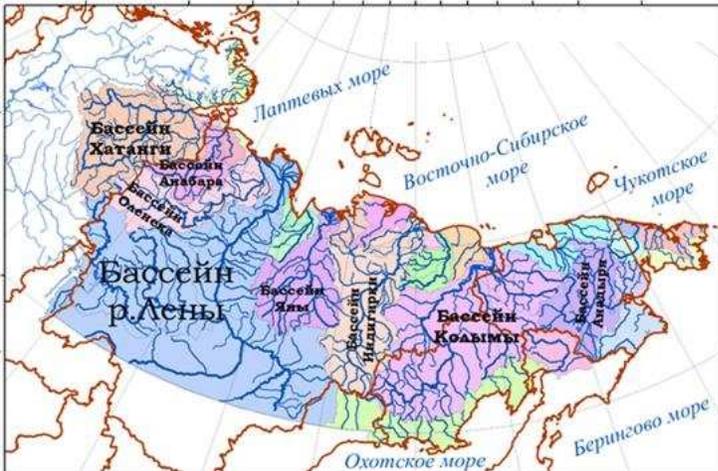
### Изменение средней за июль температуры воды по длине Енисея до (2) и после (1) создания водохранилищ



Продольное изменение средней температуры воды по длине р.Кубани - до и после сооружения ГТС

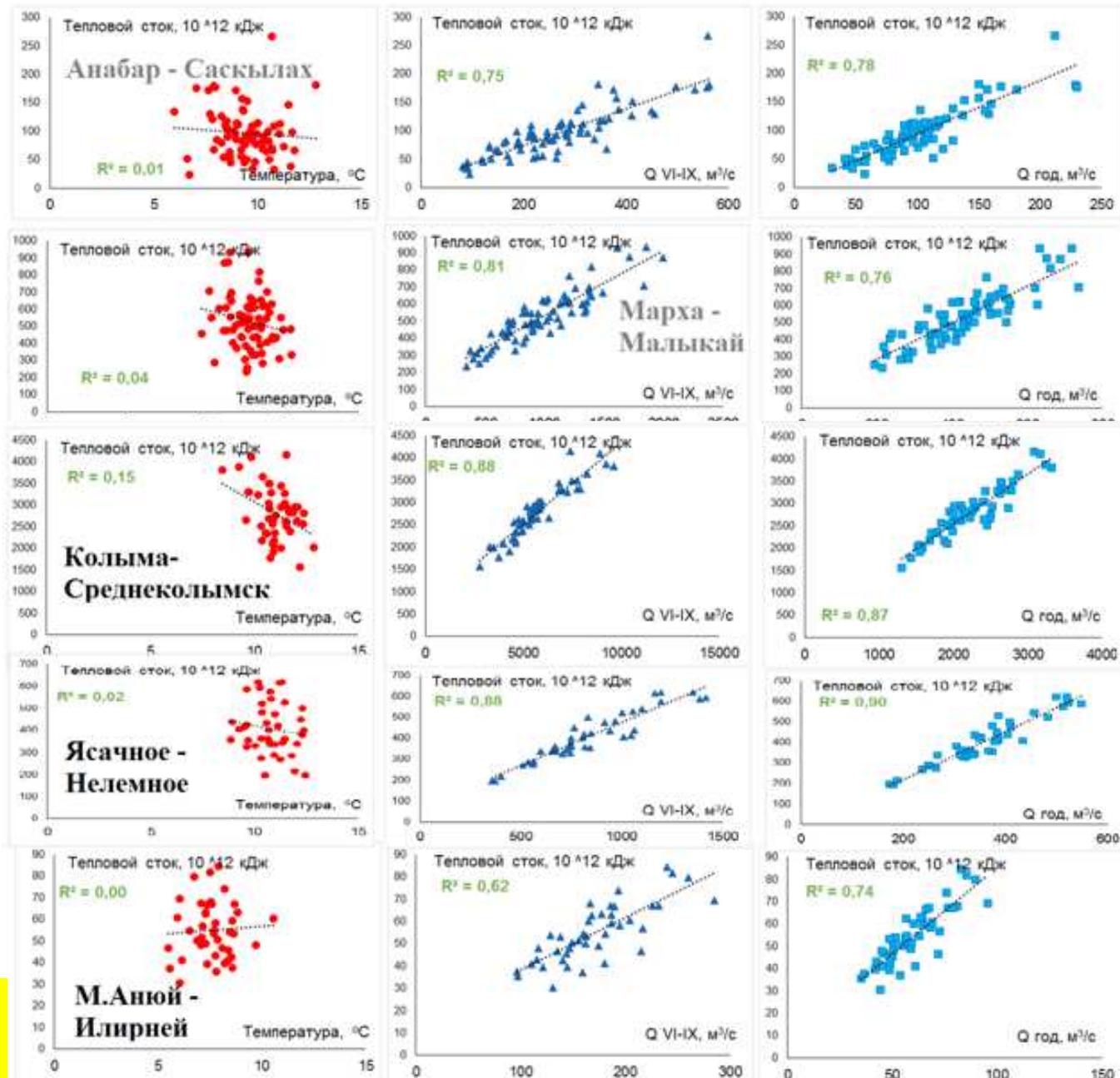


# Анализ веса компонентов теплового стока



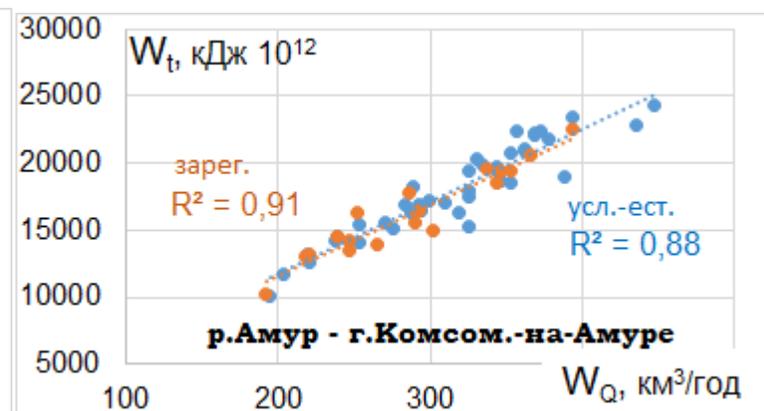
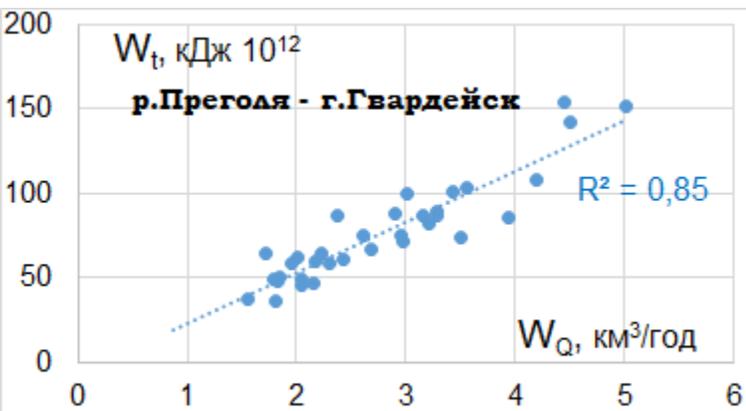
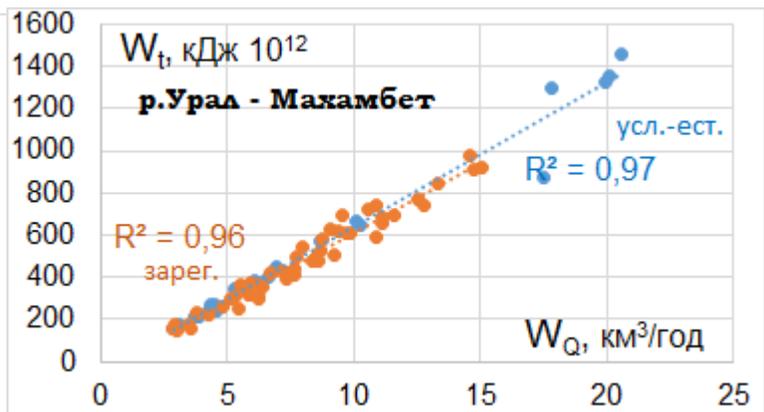
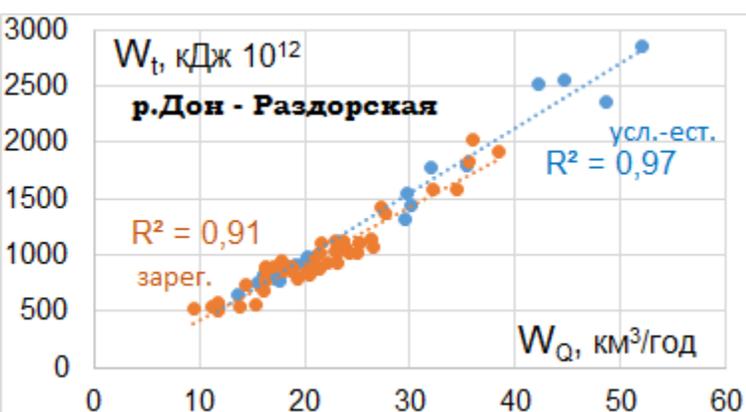
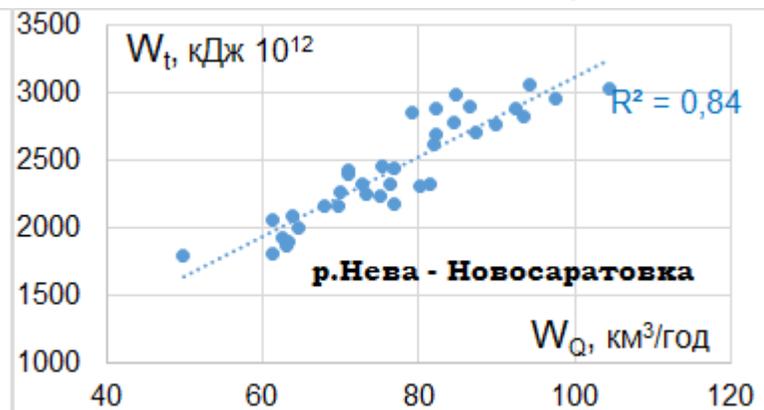
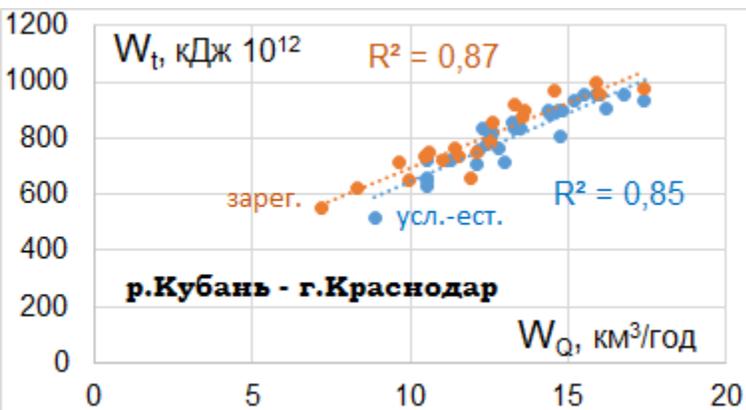
$$W_t = W_Q \times t_B \times \rho_B \times C_p$$

Река - пост	Коэффициент корреляции связей:		
	$W_T=f(W_{год})$	$W_T=f(W_{VI-IX})$	$W_T=f(T_{VI-IX})$
Ыгыатта - местн.Хампа	0,92	0,96	-0,32
Марха - гм.ст. Шалагонцы	0,82	0,86	-0,35
Марха - с.Малыкай	0,87	0,90	-0,20
Моркока - гм.ст.Хабардино	0,83	0,88	-0,50
Чилии - местн.Чилии	0,97	0,93	-0,17
Тюнг - Угулятцы	0,92	0,93	-0,30
Тангнары - пос.Чай	0,96	0,95	0,00
Соболоох-Майан - Собопол	0,61	0,59	0,58
Эбитием - местн.Эбэтем	0,75	0,74	0,00
Алдан - ВерхоянПеревоз	0,91	0,89	-0,10
Лена - Табага	0,94	0,93	0,14
Лена - Кюсюр	0,76	0,77	0,65
Яна-г.Верхоянск	0,96	0,95	0,10
Яна - Джангкы	0,92	0,91	0,10
Сартанг - с.Бала	0,96	0,96	0,32
Дулгаллах - с.Томтор	0,94	0,95	0,00
Адыча - с.Усть-Чаркы	0,96	0,95	0,24

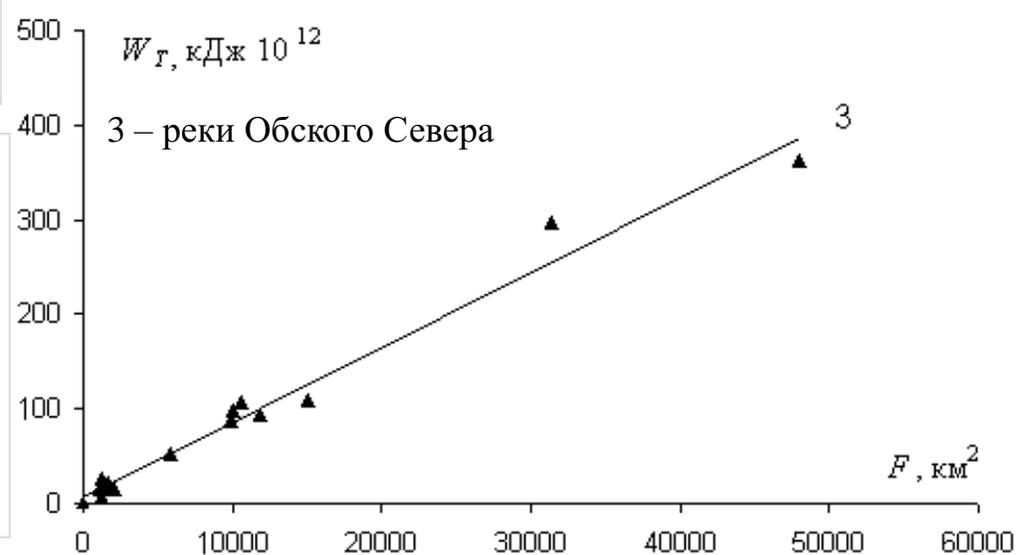
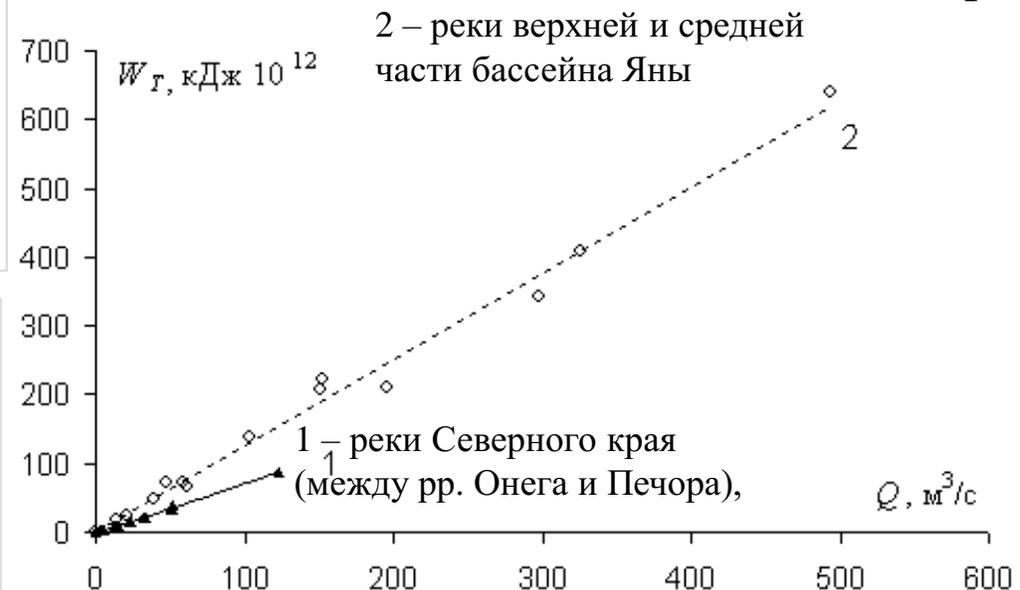


В формировании теплового стока рек определяющую роль играет сток воды!

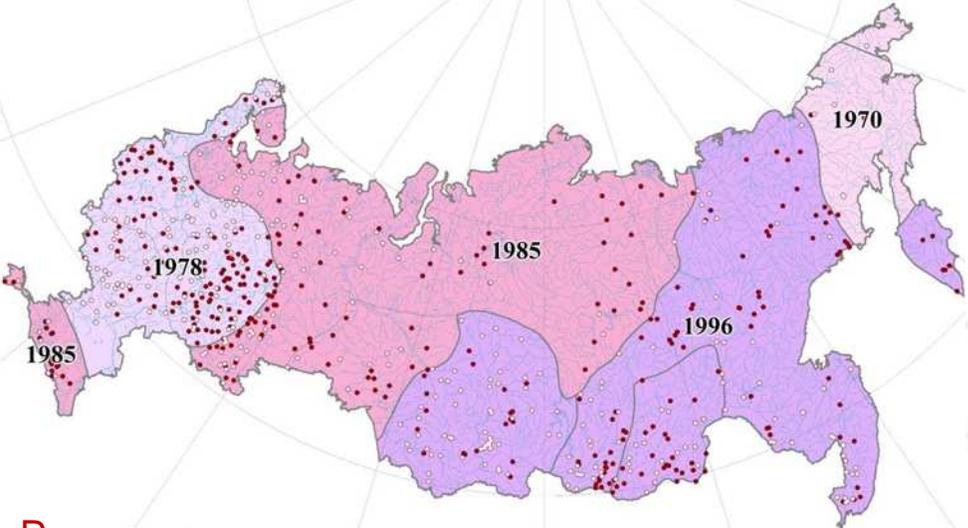
## Связь годового стока теплоты ( $W_T$ ) и стока воды ( $W_Q$ )



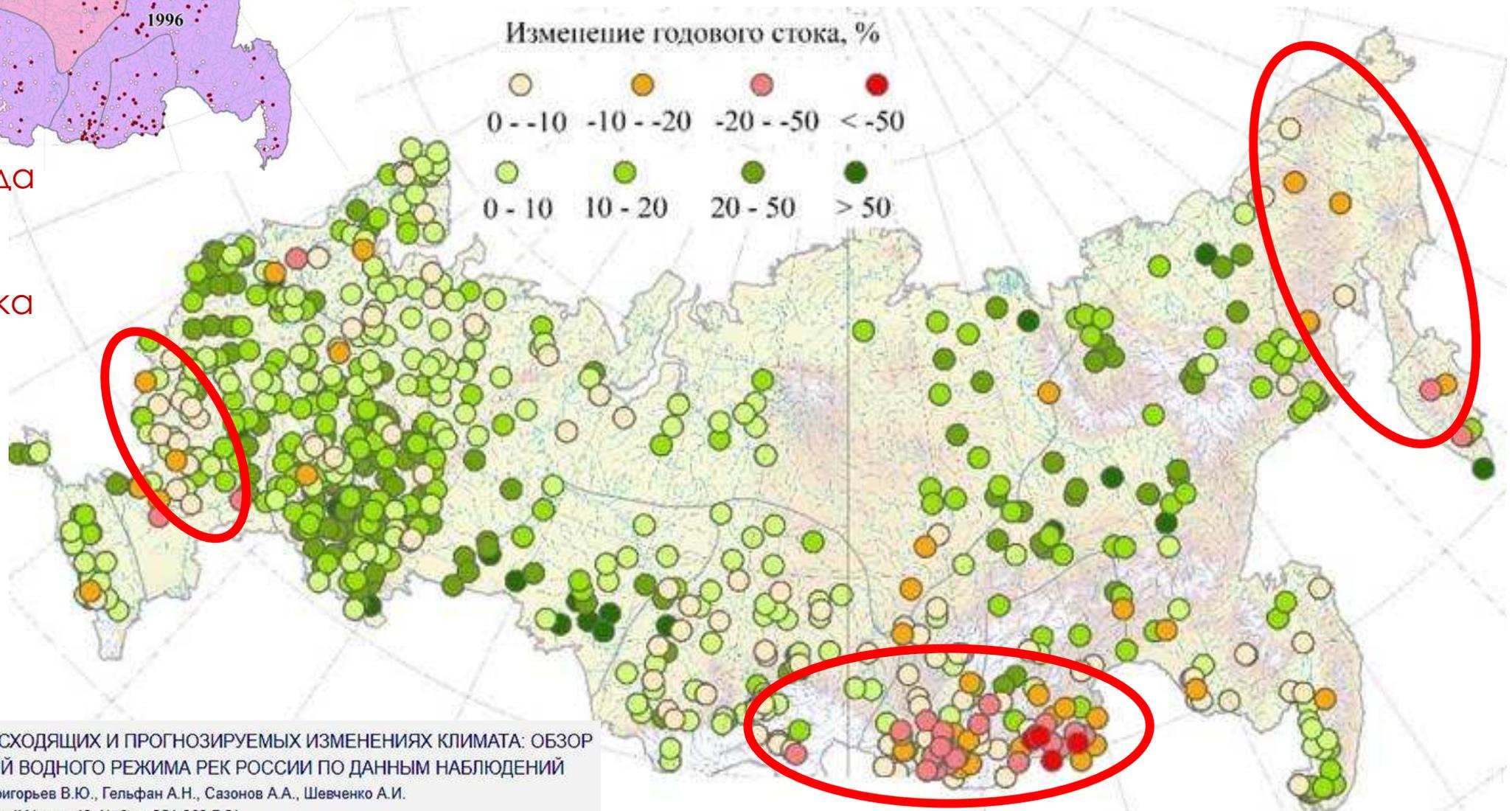
## Соответствие среднемноголетних расходов воды ( $Q$ ), площади водосбора ( $F$ ) и суммарного за год стока теплоты ( $W_T$ ) средних по размеру рек



# 1й фактор - изменение водного стока



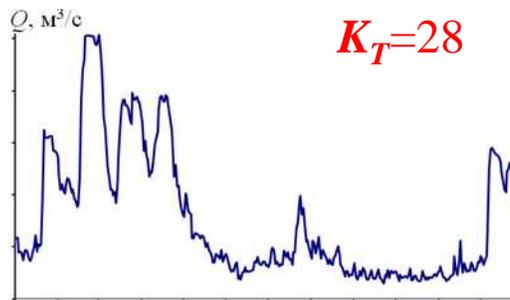
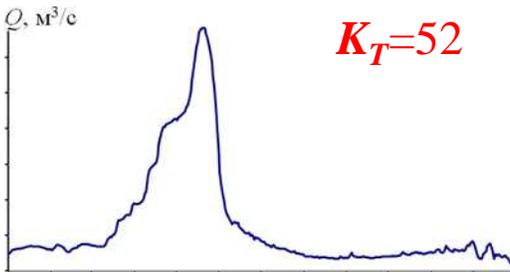
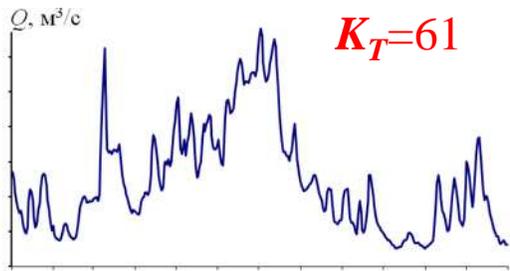
Распределение года нарушения стационарности в рядах годового стока



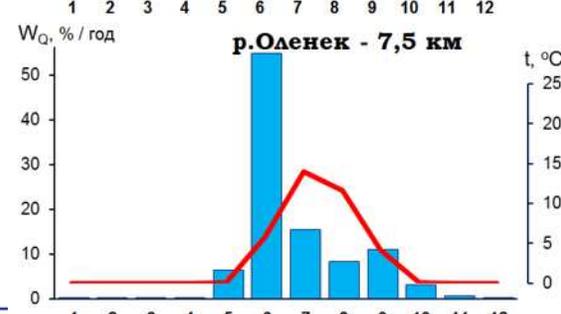
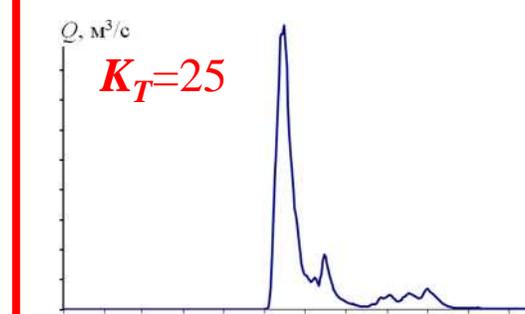
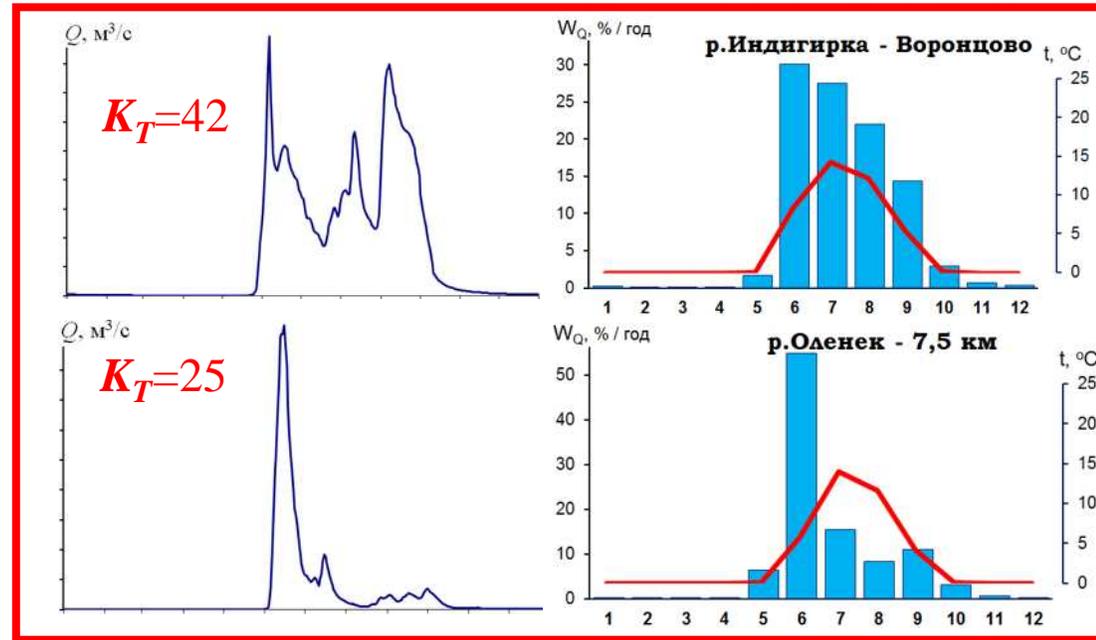
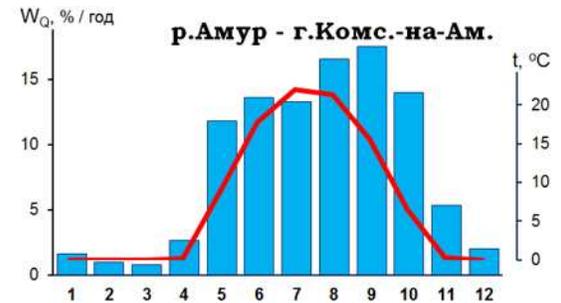
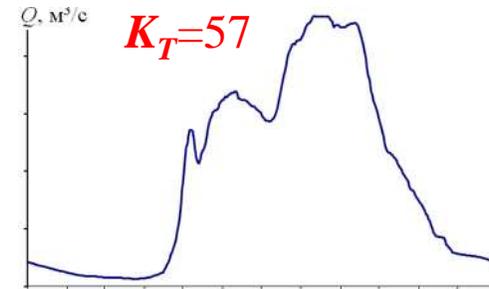
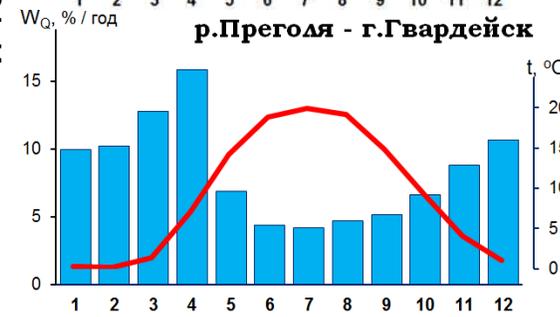
Величина теплового стока рек зависит от внутригодового распределения  $t$  и  $Q \rightarrow$  увеличению  $W_T$  способствует подобие внутригодового водного и температурного режимов, при котором по времени совпадают большие расходы и температуры воды

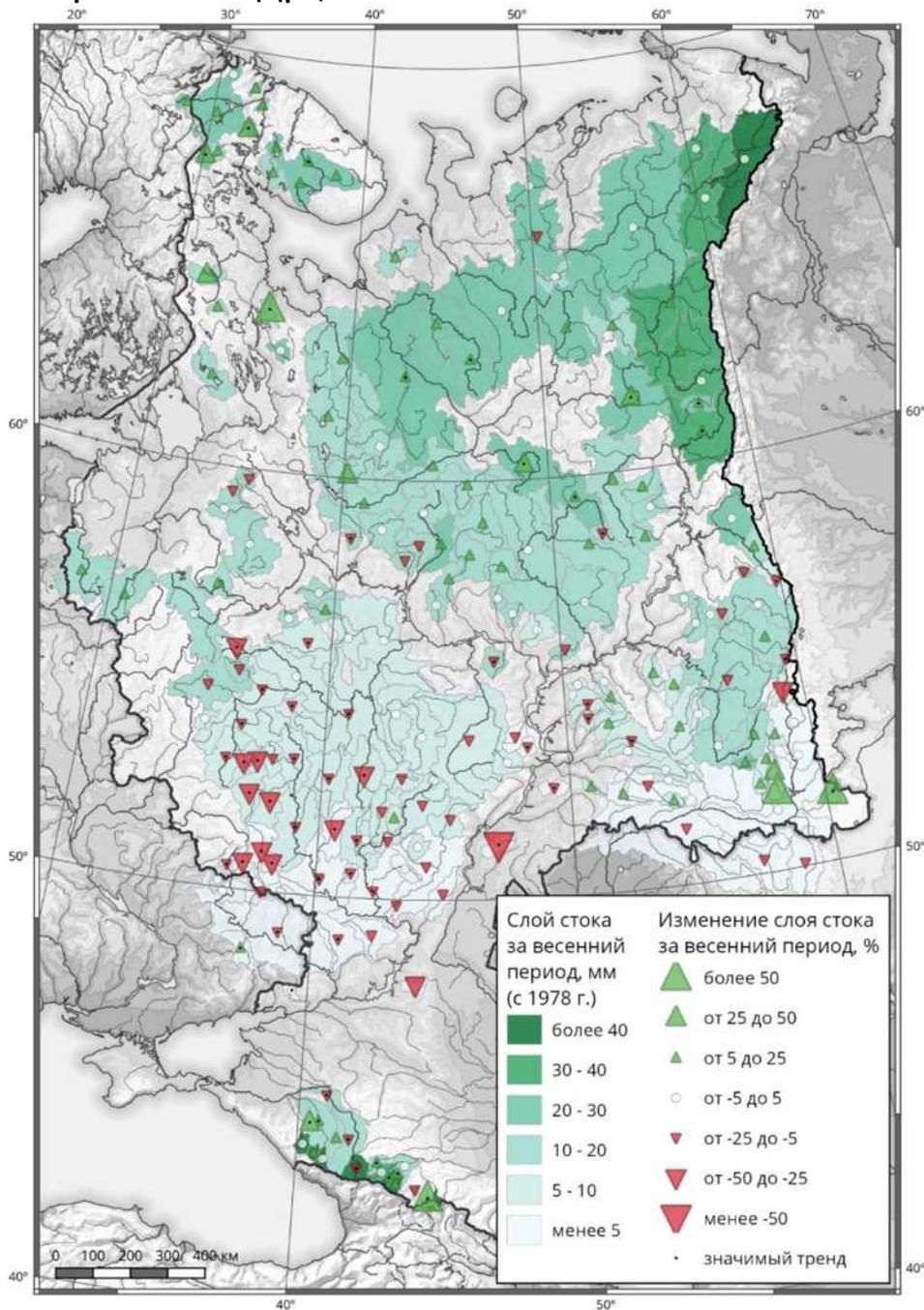
**Тепловой коэффициент ( $K_T = W_T / W_Q$ )** - соотношение годового стока тепла и стока воды, а также сколько 1 м<sup>3</sup> речной воды при данном водно-термическом режиме и условиях стокоформирования переносит теплоты (1-й его вариант - в работе Ю.А.Ёлшина 1988 г., последний вариант – в 2007 г. на каф. гидрологии суши МГУ)

Гидрографы в типичные годы

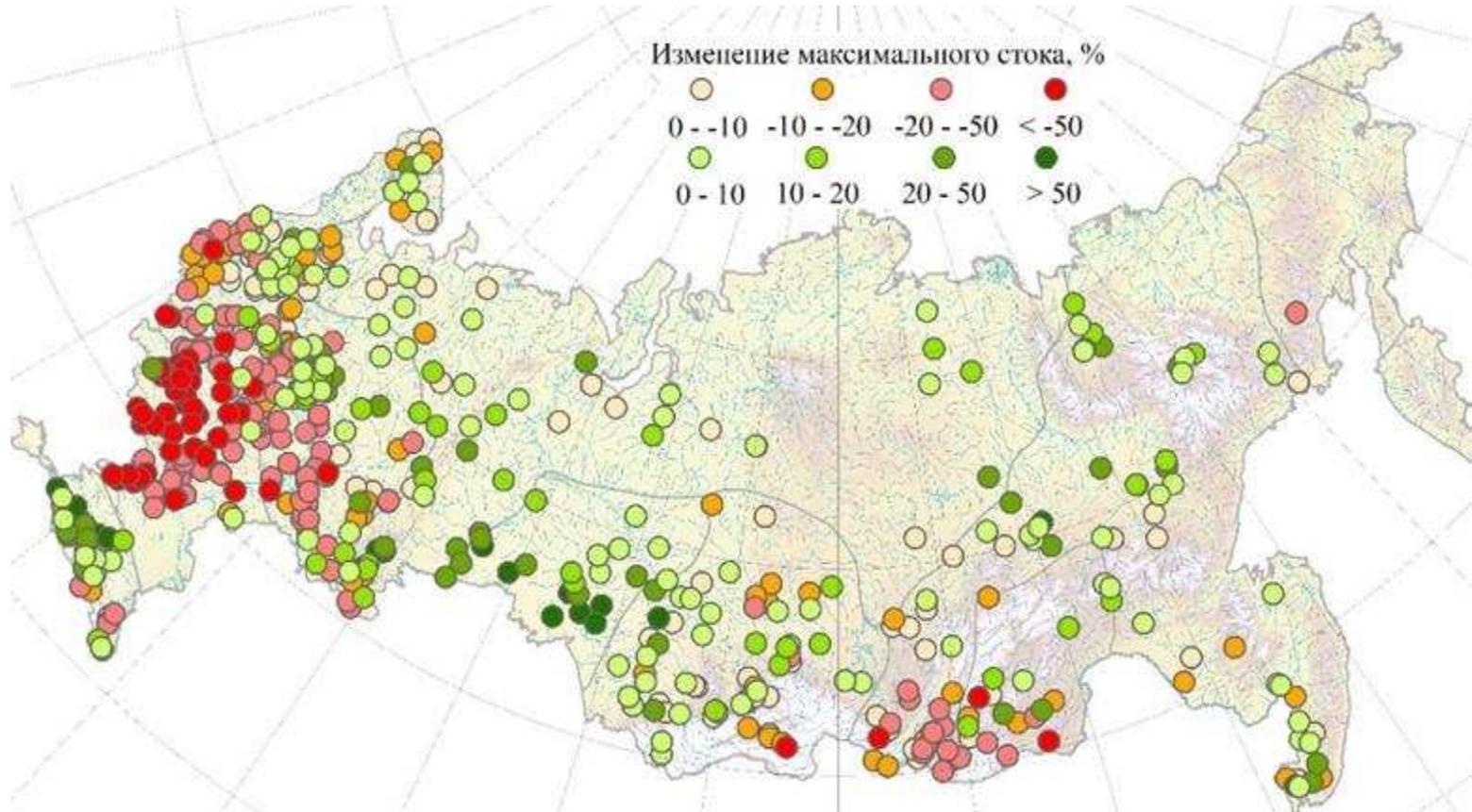


Диаграммы в/г распределения стока воды (%) и температуры воды





## Изменение максимальных расходов воды (%) относительно предыдущего периода



★ **2022** СТОК РЕК РОССИИ ПРИ ПРОИСХОДЯЩИХ И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА: ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ. 1. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК РОССИИ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ  
 Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И.  
 в журнале *Водные ресурсы*, издательство *Наука (М.)*, том 49, № 3, с. 251-269 DOI

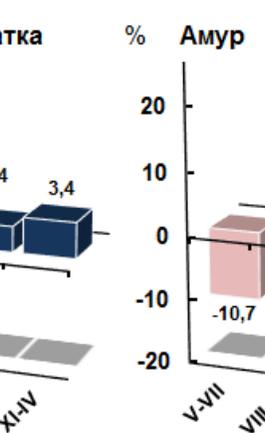
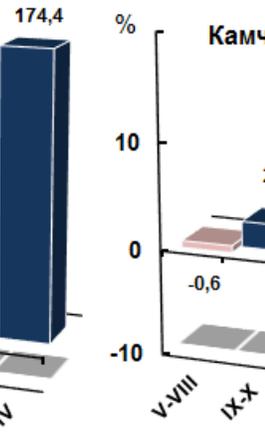
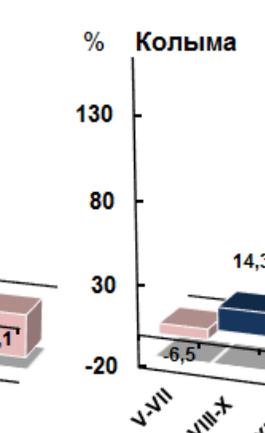
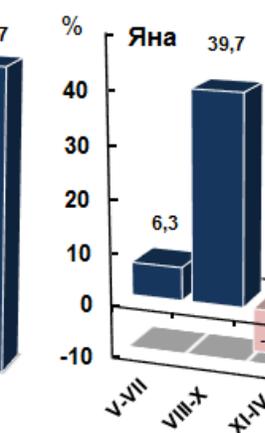
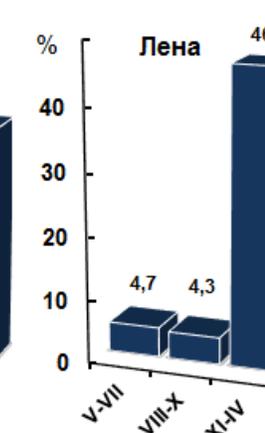
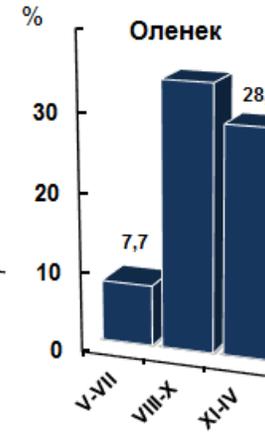
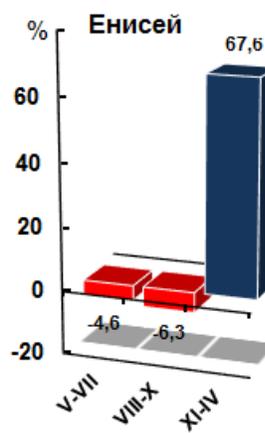
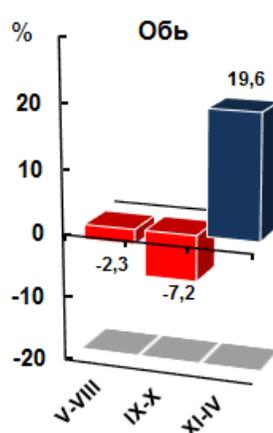
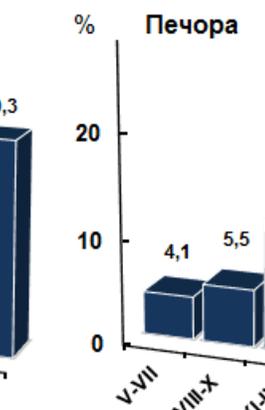
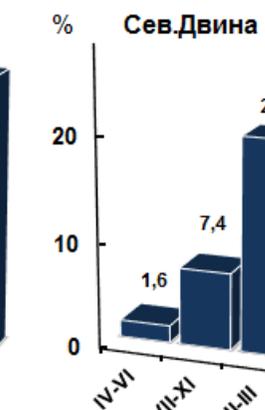
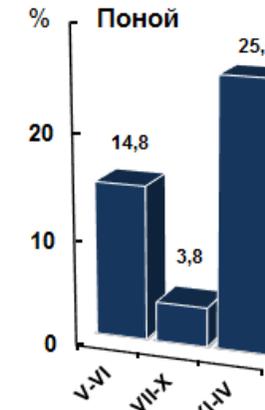
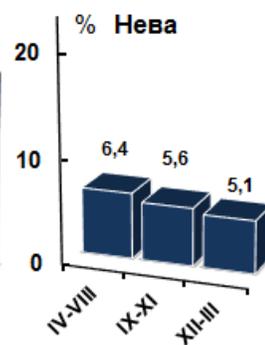
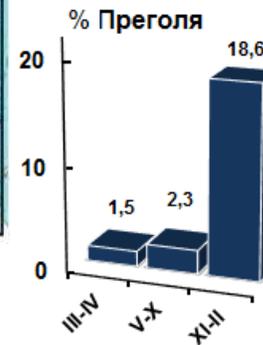
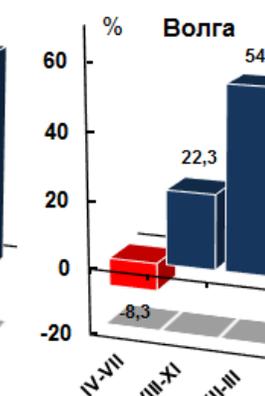
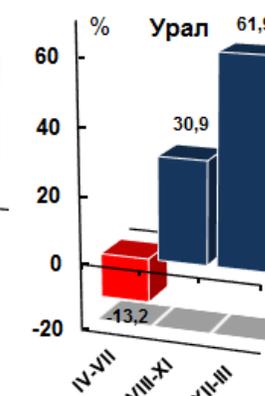
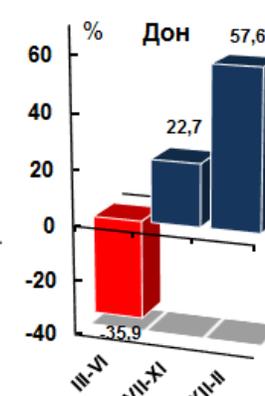
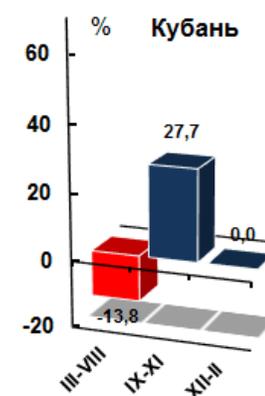
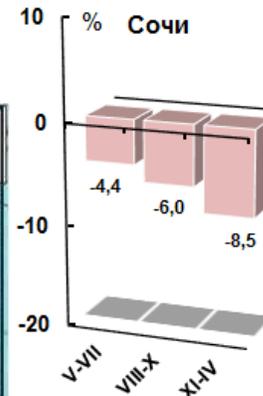
## Изменение слоя стока за весенний период, %

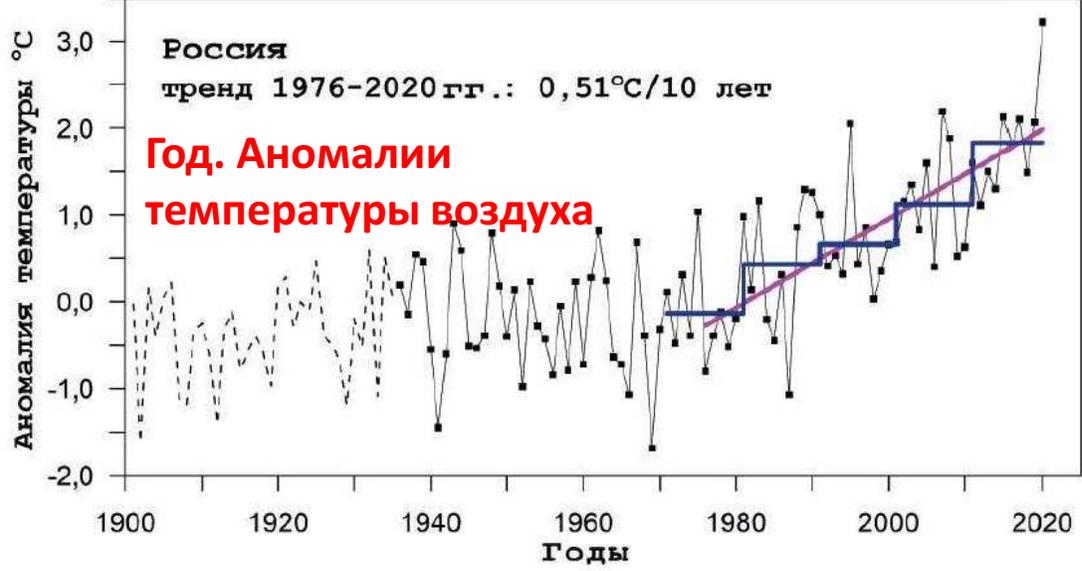
# Изменения величины сезонного стока воды в устьях рек

в 1976–2015 относительно 1936–1975 гг.

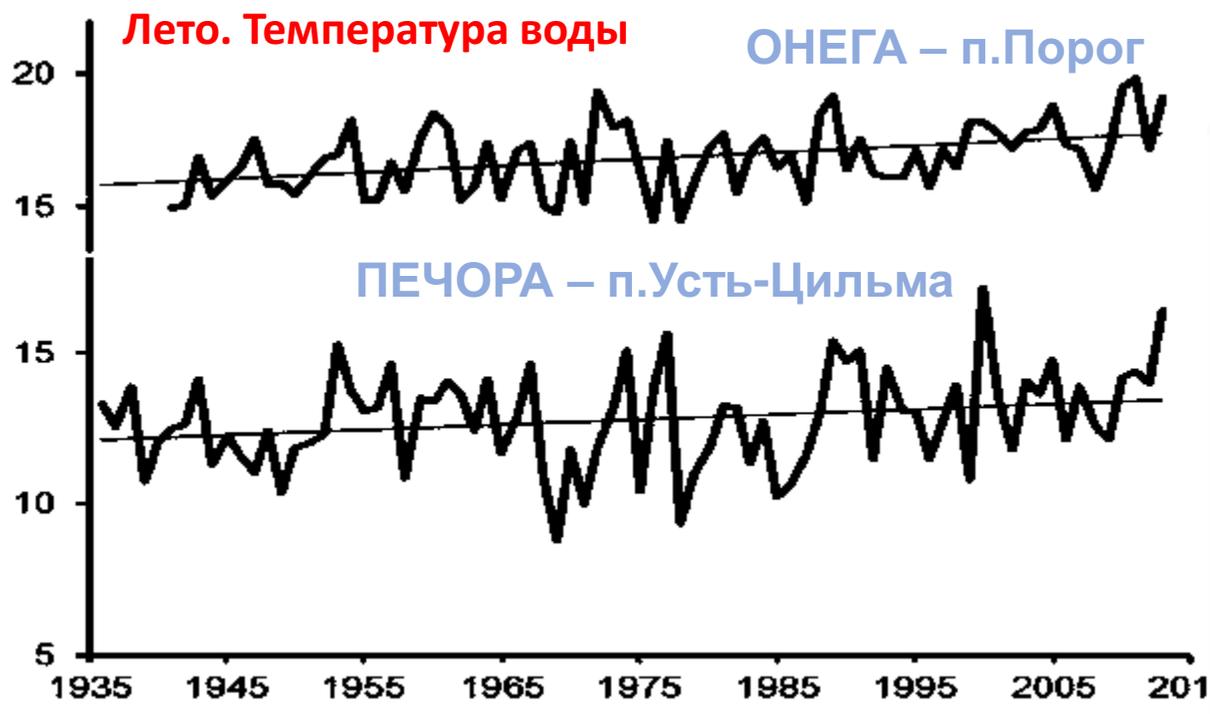
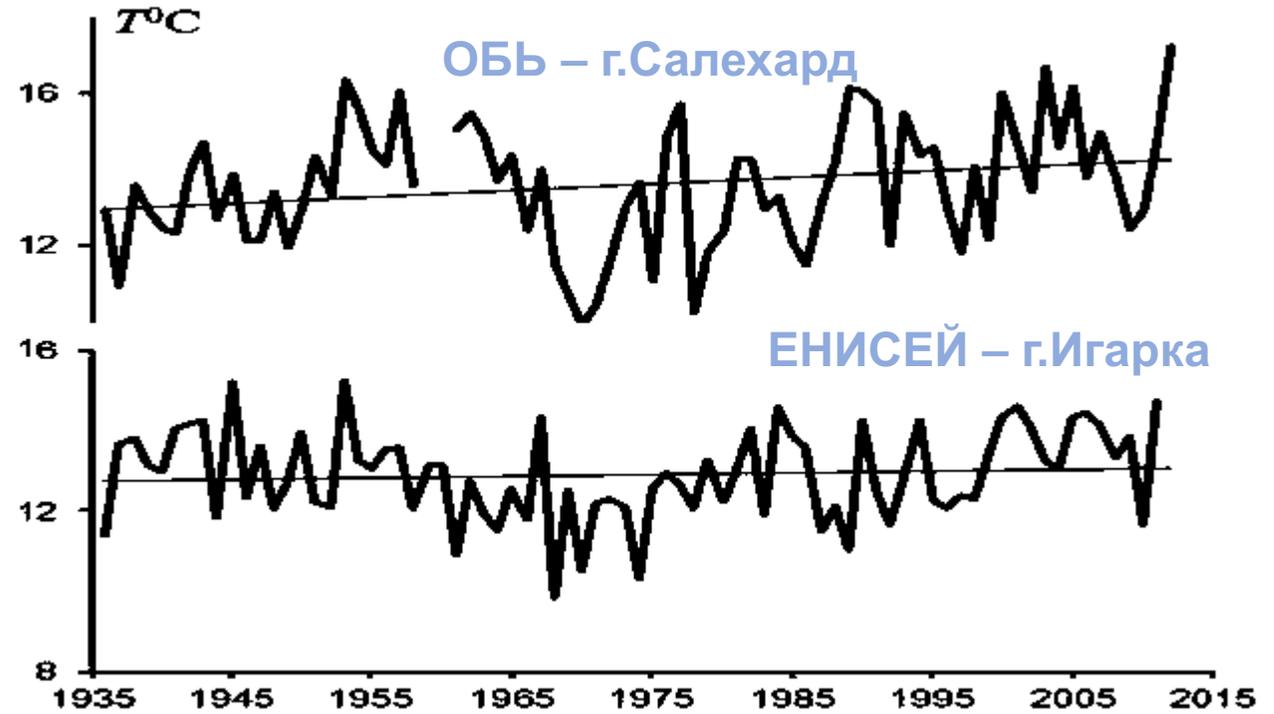
Магрицкий, 2018

## Изменения минимальных расходов

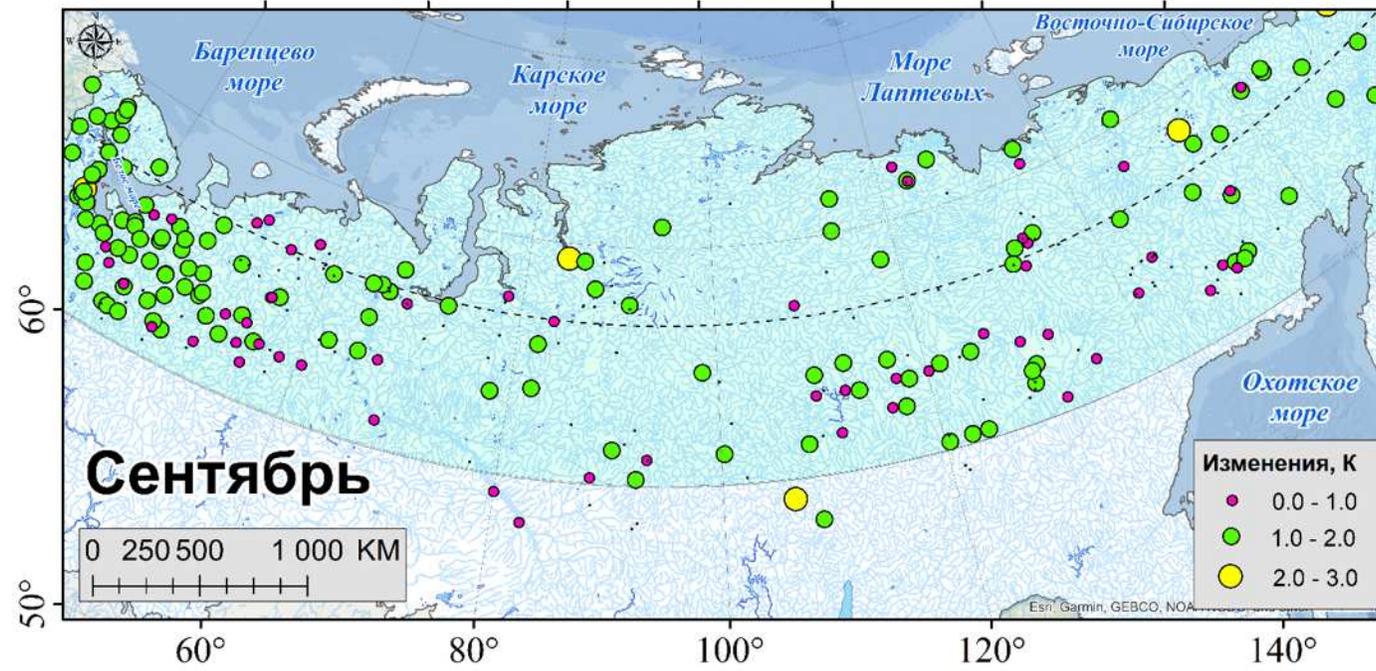
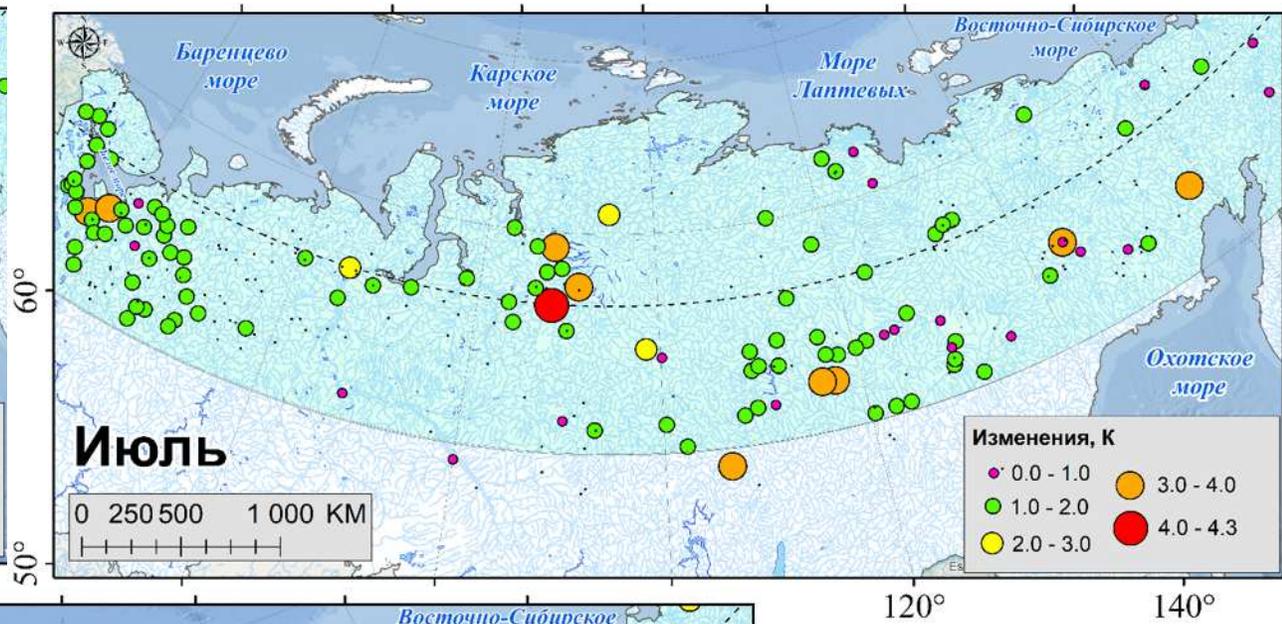
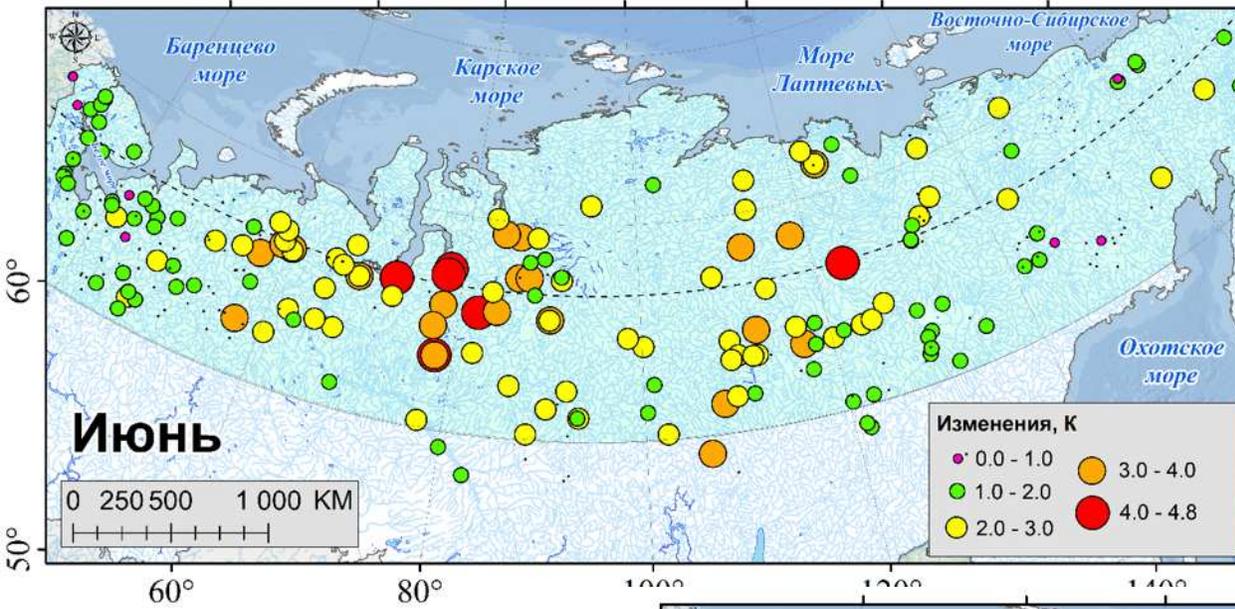




## 2й фактор - рост температуры воды

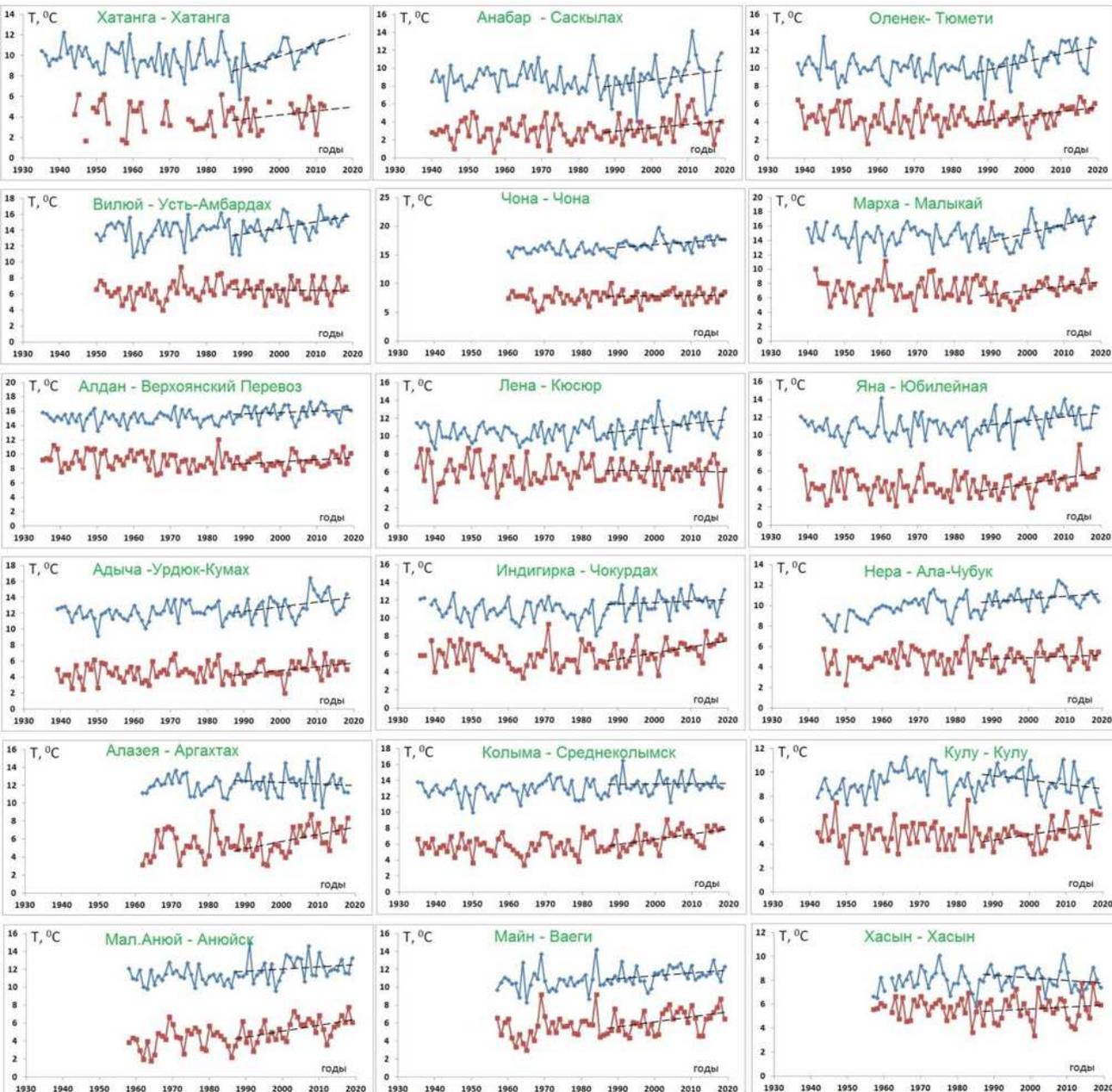


# Многолетние изменения месячной температуры воды в реках

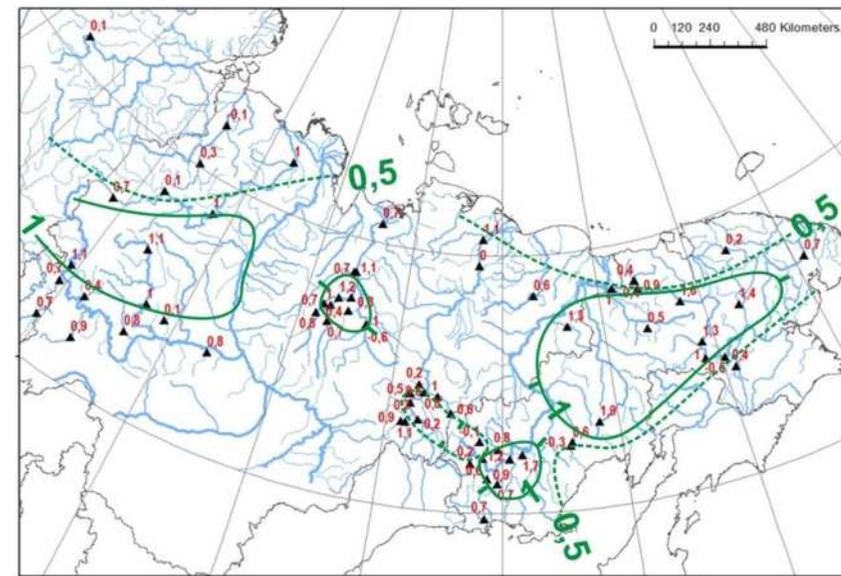


# Графики многолетних колебаний средних температур воды за

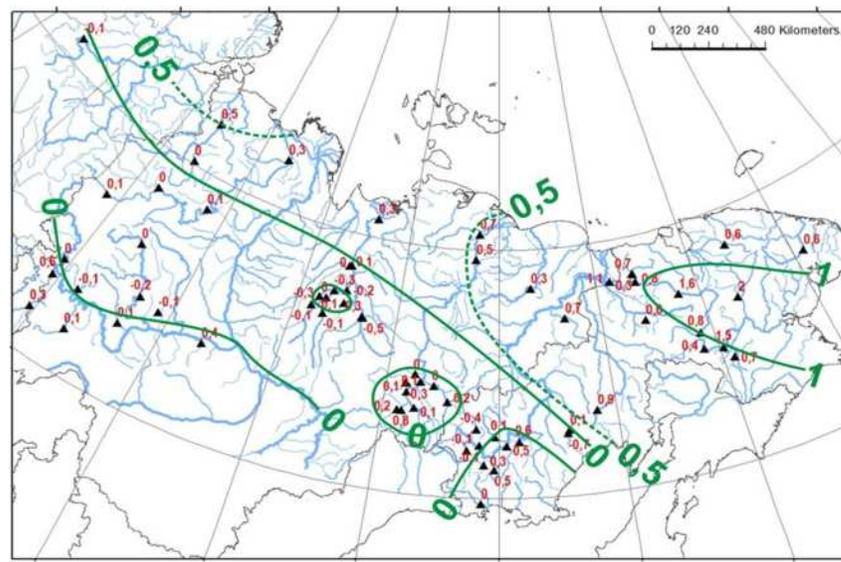
## июнь-август и сентябрь



# Карта аномалий средней за июль температуры воды в 1988–2012 гг., в сравнении с 1960–1987 гг.

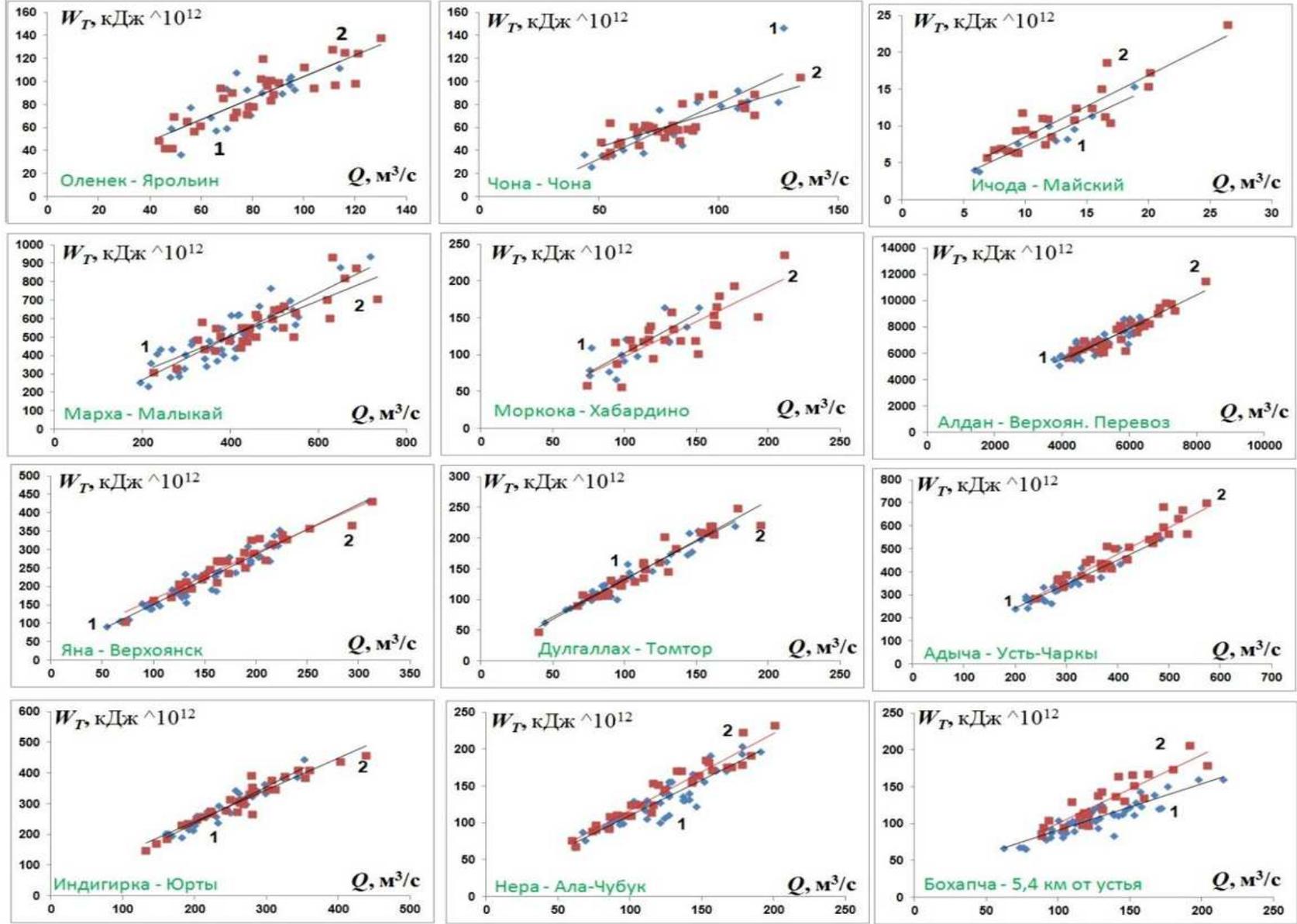


# Карта аномалий средней за сентябрь температуры воды в 1988–2012 гг., в сравнении с 1960–1987 гг.



# Усиление роли температурного фактора

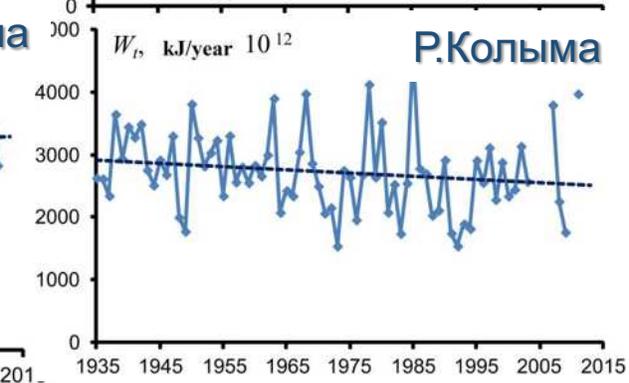
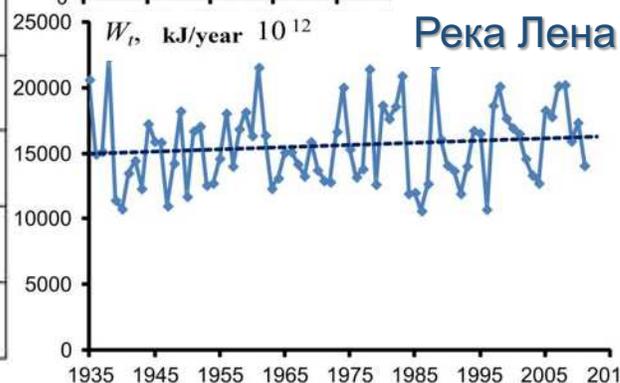
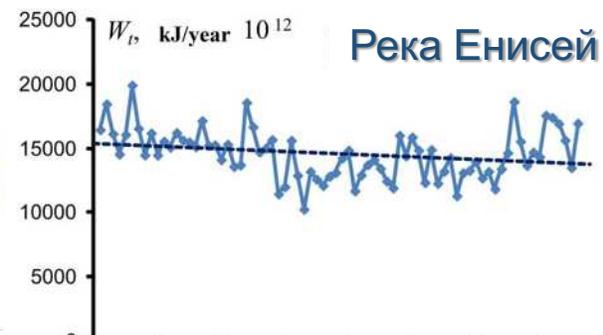
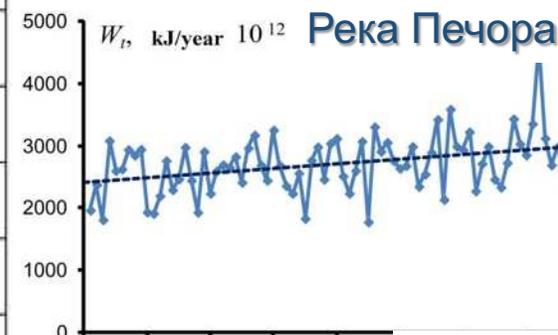
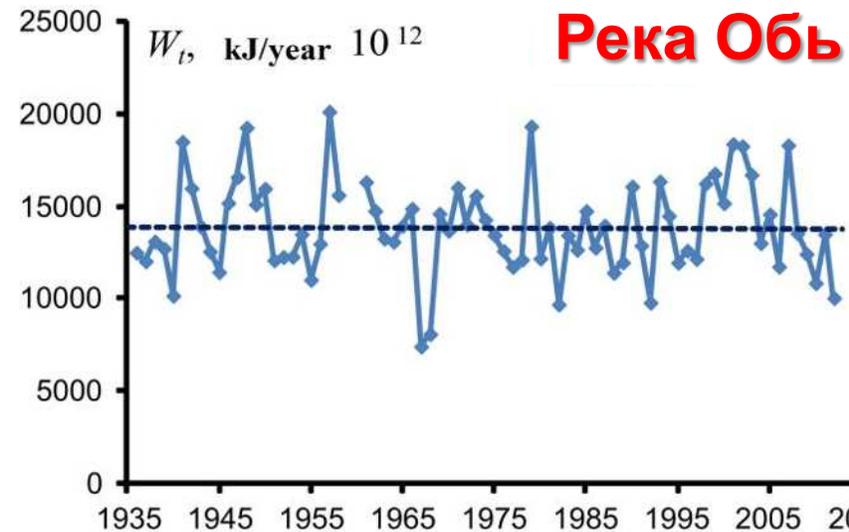
Зависимости между среднегодовыми расходами воды (по оси X) и годовой величиной теплового стока (по оси Y) за периоды до 1987 г. (1) и с 1988 г. (2)



Нарушения характера связей между водным и тепловым стоком из-за климатического потепления и усиления нагрева речных вод пока незначительные для большинства постов!

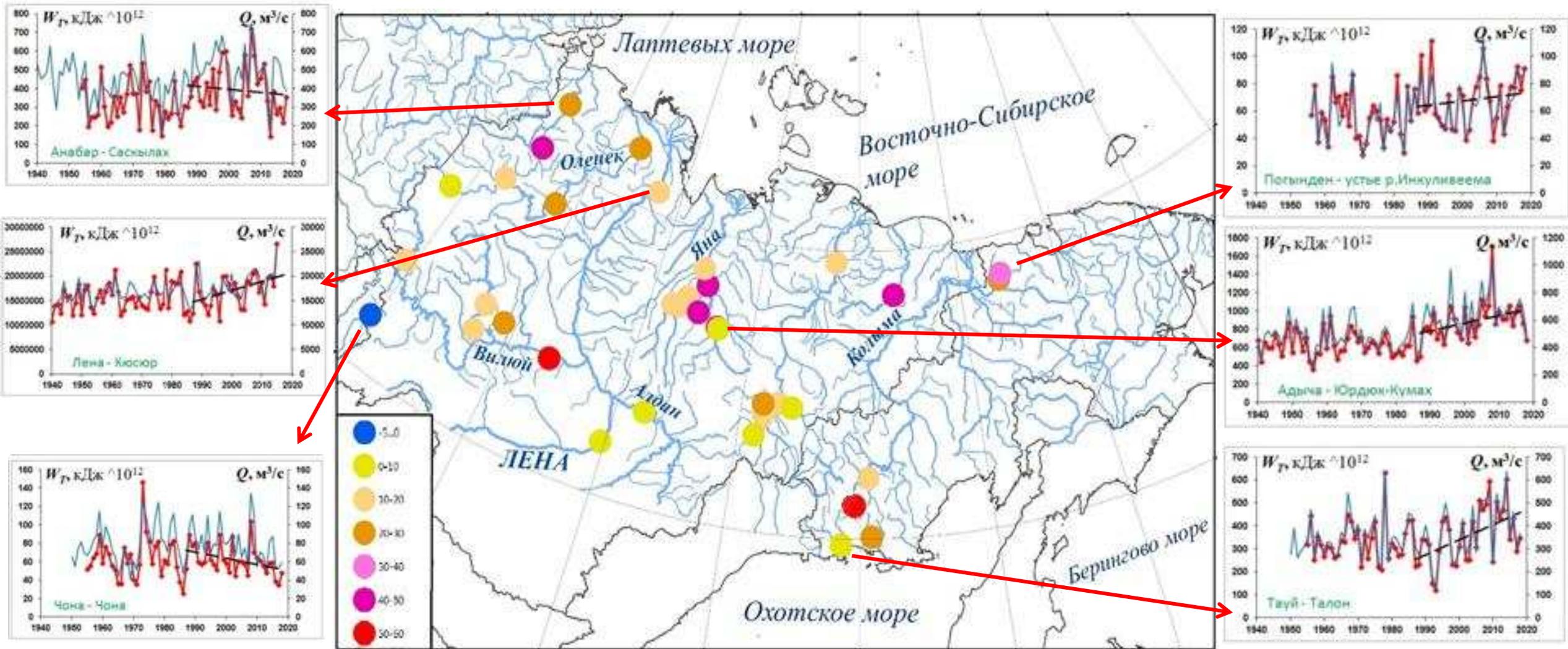
# МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛОВОГО СТОКА, ПОСТУПАЮЩЕГО В УСТЬЯ РЕК И АРКТИЧЕСКИЕ МОРЯ

Река – пост	Периоды	Сезонные величины		Измен. годового
		половодье (месяцы)	весна-лето (месяцы)	
Onega - Porog	1943–1975/ 1976–2013	2,9% (4–6)	9,6% (7–11)	5,9%
Sev.Dvina – Ust- Pinega	1939–1975/ 1976–2013	9,8% (4–6)	12,3% (7–11)	10,9%
Mezen - Malonisogorskaya	1936–1975/ 1976–2013	6,2% (4–6)	-5,6% (7–11)	0,9%
Pechora – Ust- Tsilma	1936–1975/ 1976–2013	9,4% (5–7)	12,3% (8–10)	10,2%
Ob - Salekhard	1936–1975/ 1976–2012	0,4% (5–8)	-13,2% (9–10)	-1,2%
Yenisey - Igarka	1936–1975/ 1976–2011	-2,5% (5–7)	-9,0% (8–10)	-4,9%
Olenek - Sukhana	1936–1975/ 1976–2012	8,1% (5–7)	28,6% (8–10)	12,5%
Lena - Kyusyur	1935–1975/ 1976–2012	5,6% (5–7)	2,7% (8–10)	4,5%
Yana - Yubileynaya	1938–1975/ 1976–2012	11,7% (5–8)	38,1% (9–10)	13,3%
Kolyma - Srednekolymsk	1935–1975/ 1976–2012	-10,2% (5–7)	8,8% (8–10)	-6,3%



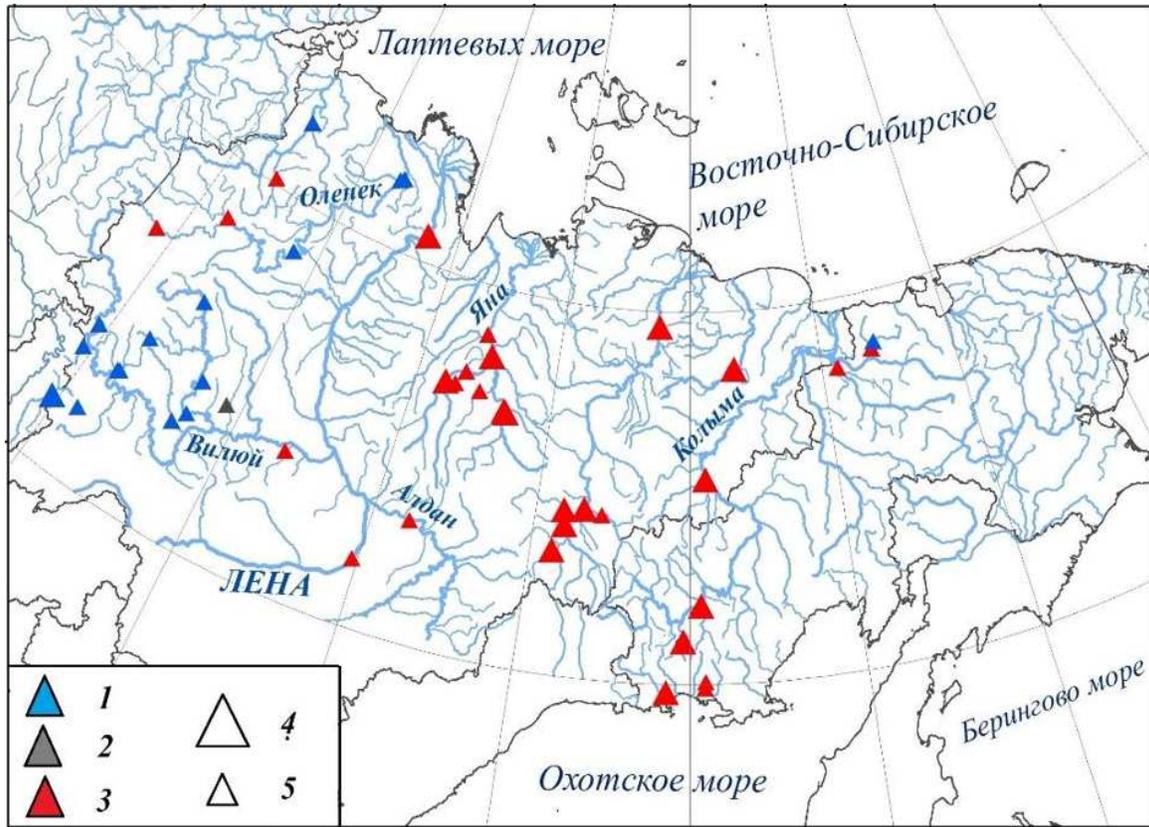
# Многолетние изменения теплового стока

Относительная разность (%) средних за 1955/1960–1987 и 1988–2017/2018гг. величин годового теплового стока рек Северо-востока АТР

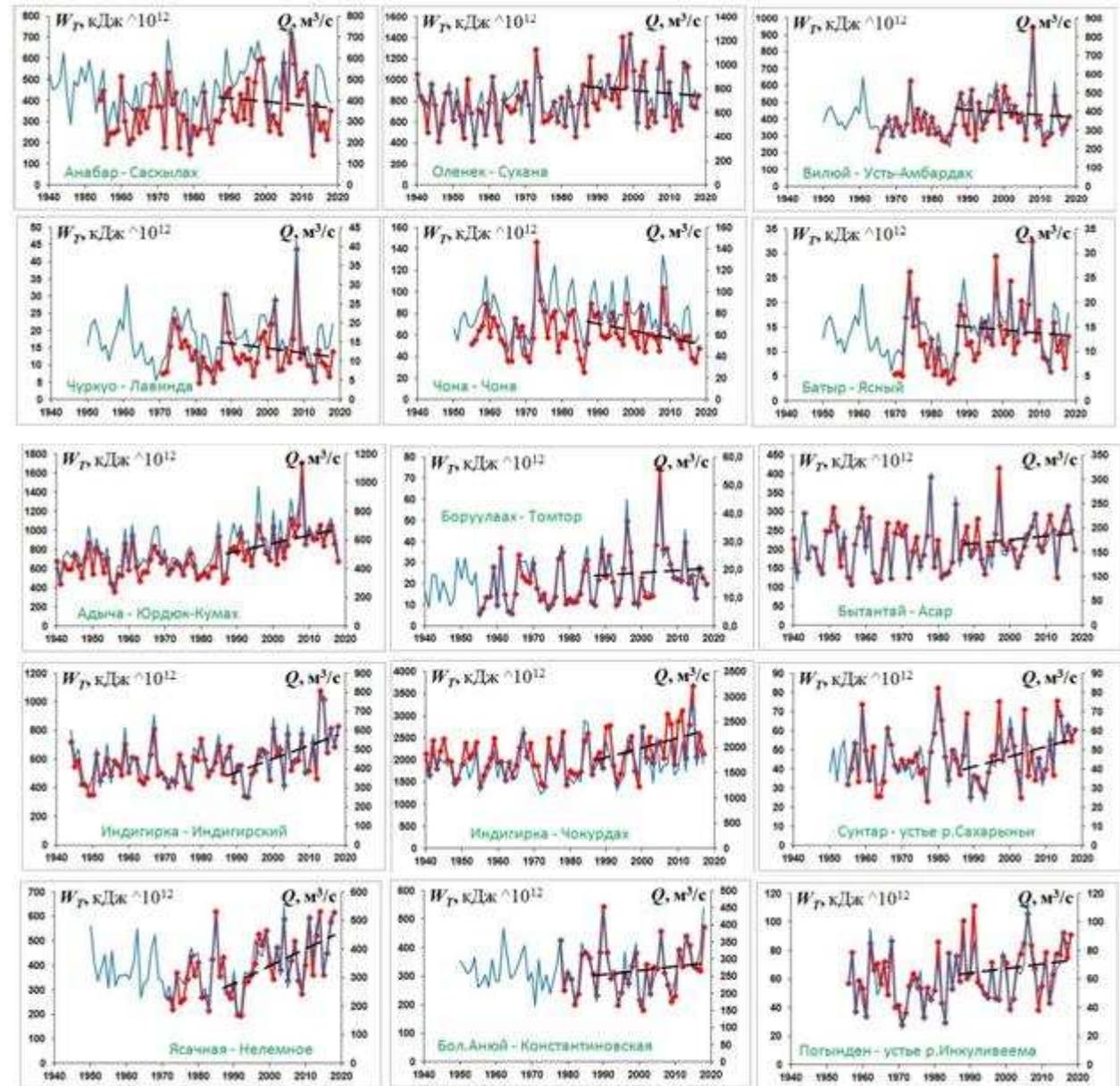


24% рассмотренных рядов демонстрируют относительный рост теплового стока до 10%,  
34% постов – изменения от 10 до 20%, 18,5% – от 20 до 30%, 21% – свыше 30%.

# Многолетние изменения теплового стока



Знак и статистическая значимость линейного тренда в многолетних колебаниях годовой величины теплового стока за период 1988–2017/2018 гг. я: 1 – отрицательный тренд, 2 – отсутствие тренда, 3 – положительный тренд, 4 – тренд статистически значим, 5 – тренд незначим



# Тепловой сток р.Волги (пост Верхнее Лебяжье) в разные периоды



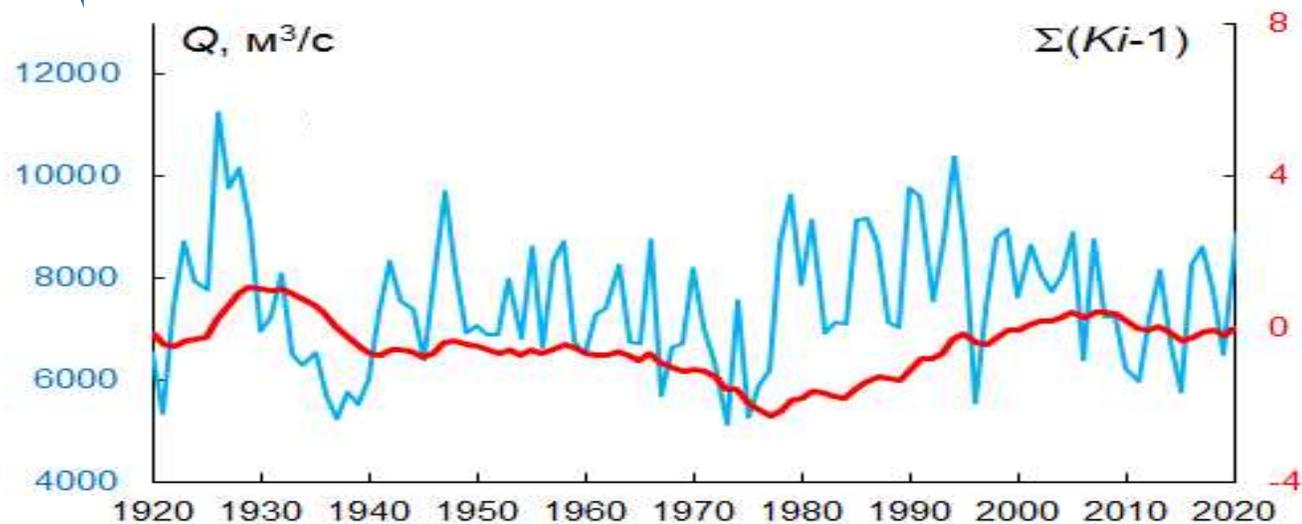
Период	Суммарный за сезон, кДж $10^{12}$				Суммарный за год, кДж $10^{12}$
	весна	лето	осень	зима	
1936-1959	2781	8367	1550	4	12702
1960-1970	2846	5377	1993	10	10227
1971-1980	2450	5239	2025	72	9786
1981-1990	2948	6209	2361	50	11567
1991-2000	3393	6760	2401	33	12588
2001-2011	3347	5944	2355	138	11782



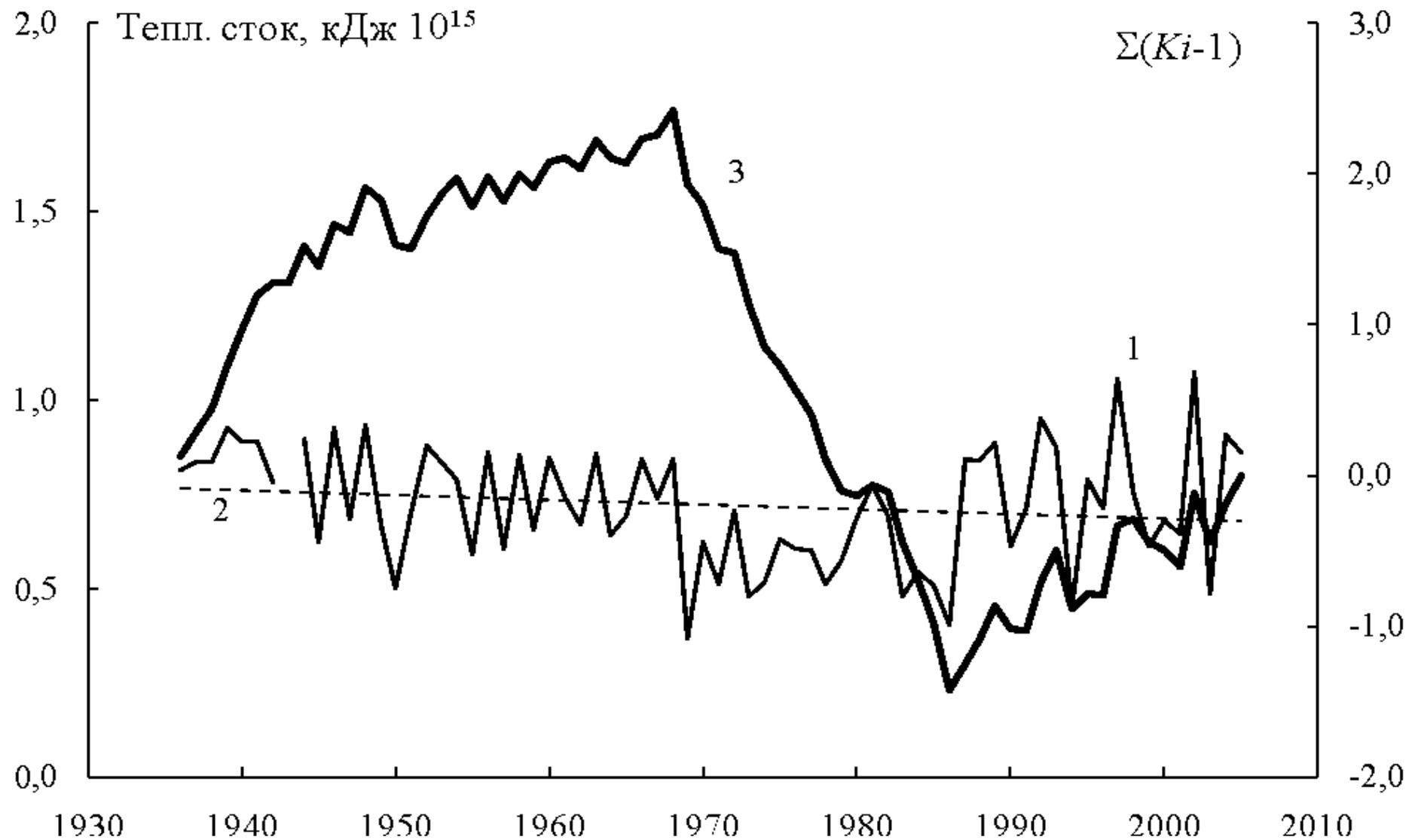
## Температура воды



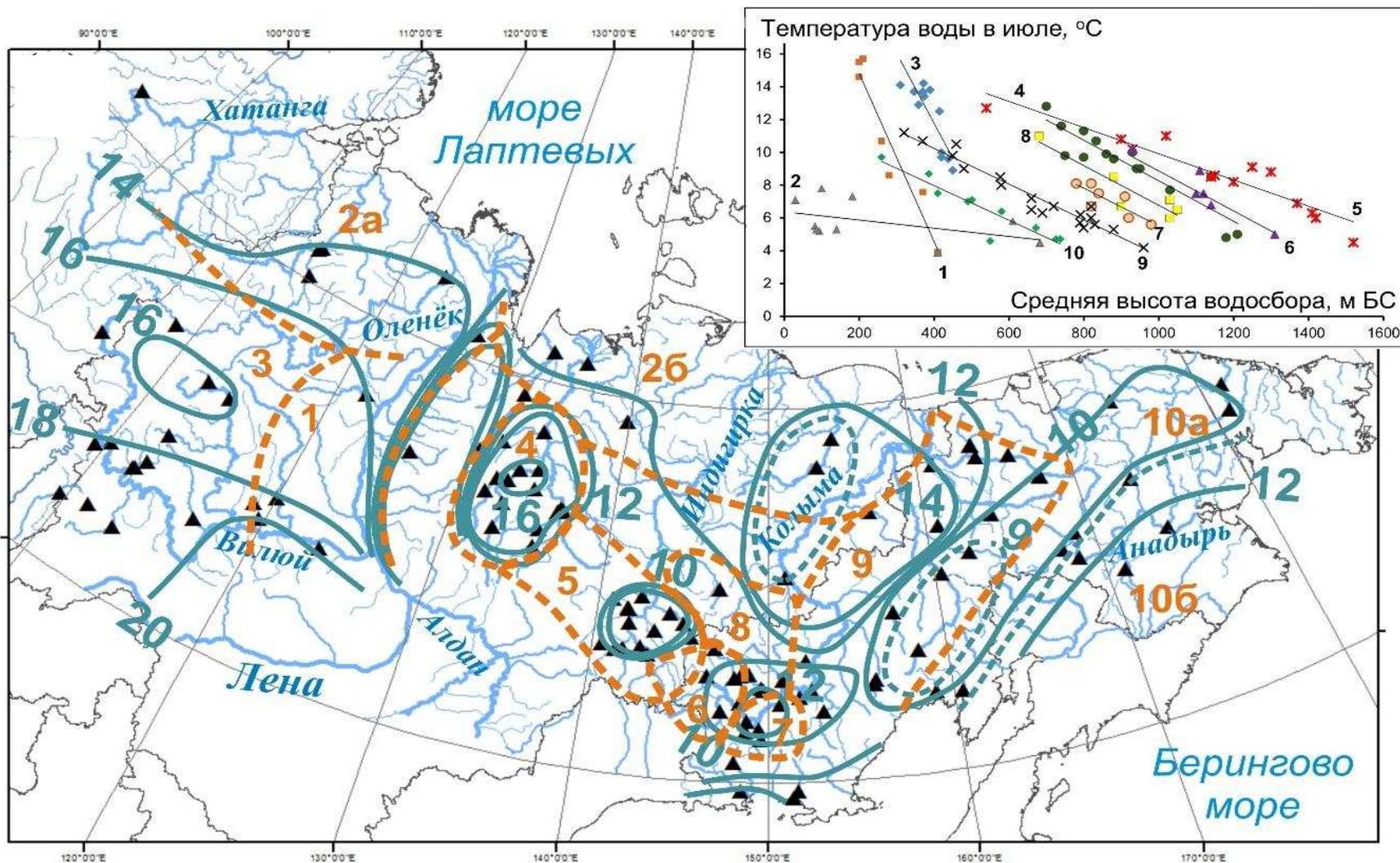
## Сток воды (ср.годовой)



Многолетние изменения (1, с штриховой линией тренда – 2) и разностная интегральная кривая (3) годовой величины теплового стока воды р.Кубани (пост Тиховский – вершина дельты)



# Новая методика расчета теплового стока для неизученных рек и территорий



- Карты распределения среднемесячных температур воды зональных рек (за 1955-2012 гг.)

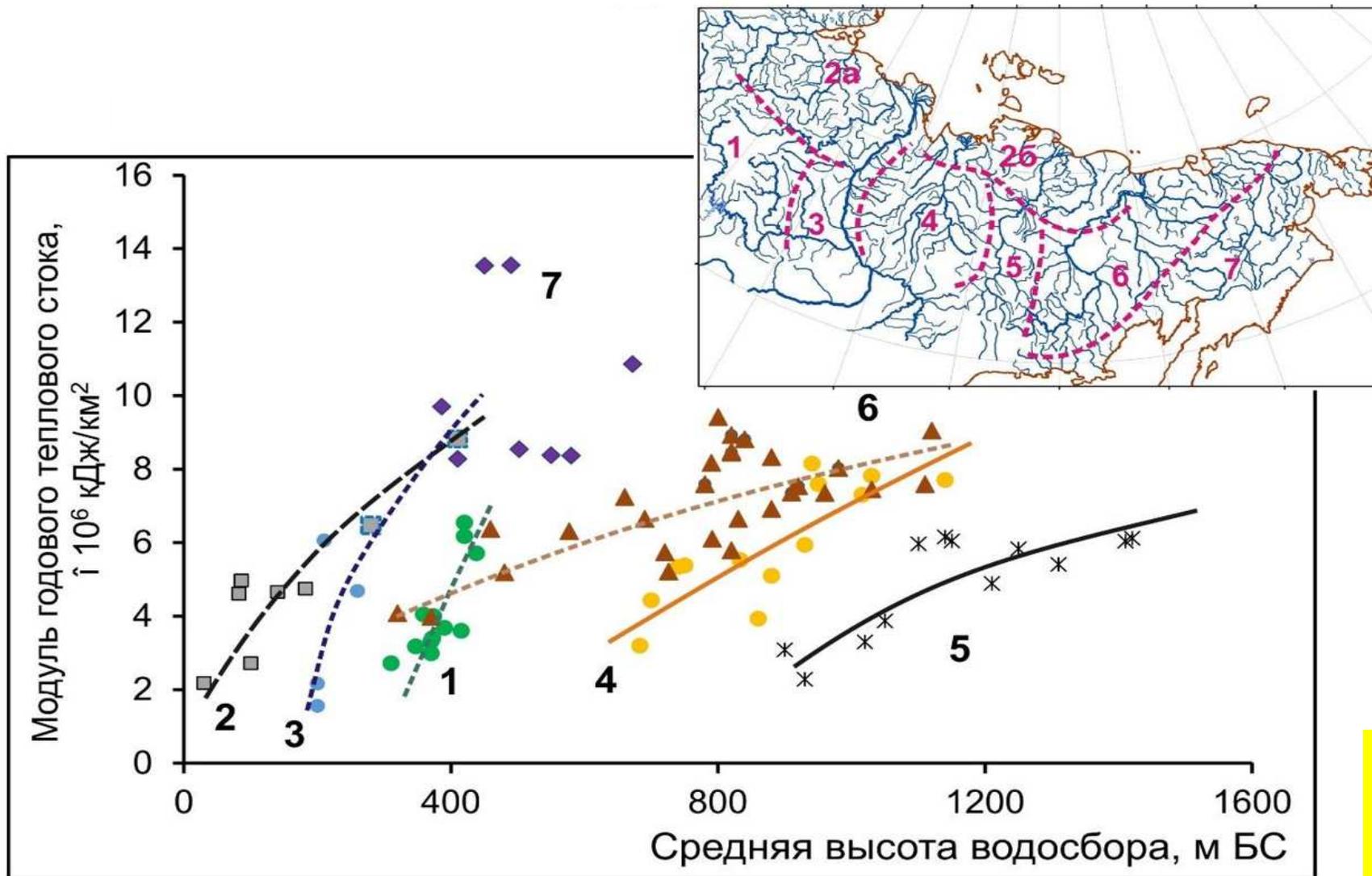
- Зависимости среднемесячной температуры воды от средней высоты водосбора

- Карта Высотн-термических зон и подрайонов, где зависимости  $t=(H_{ср})$  действуют

Пример – для Июля. Всего таких карт 6!!!

Магрицкий, 2022

# Новые материалы для новой методики

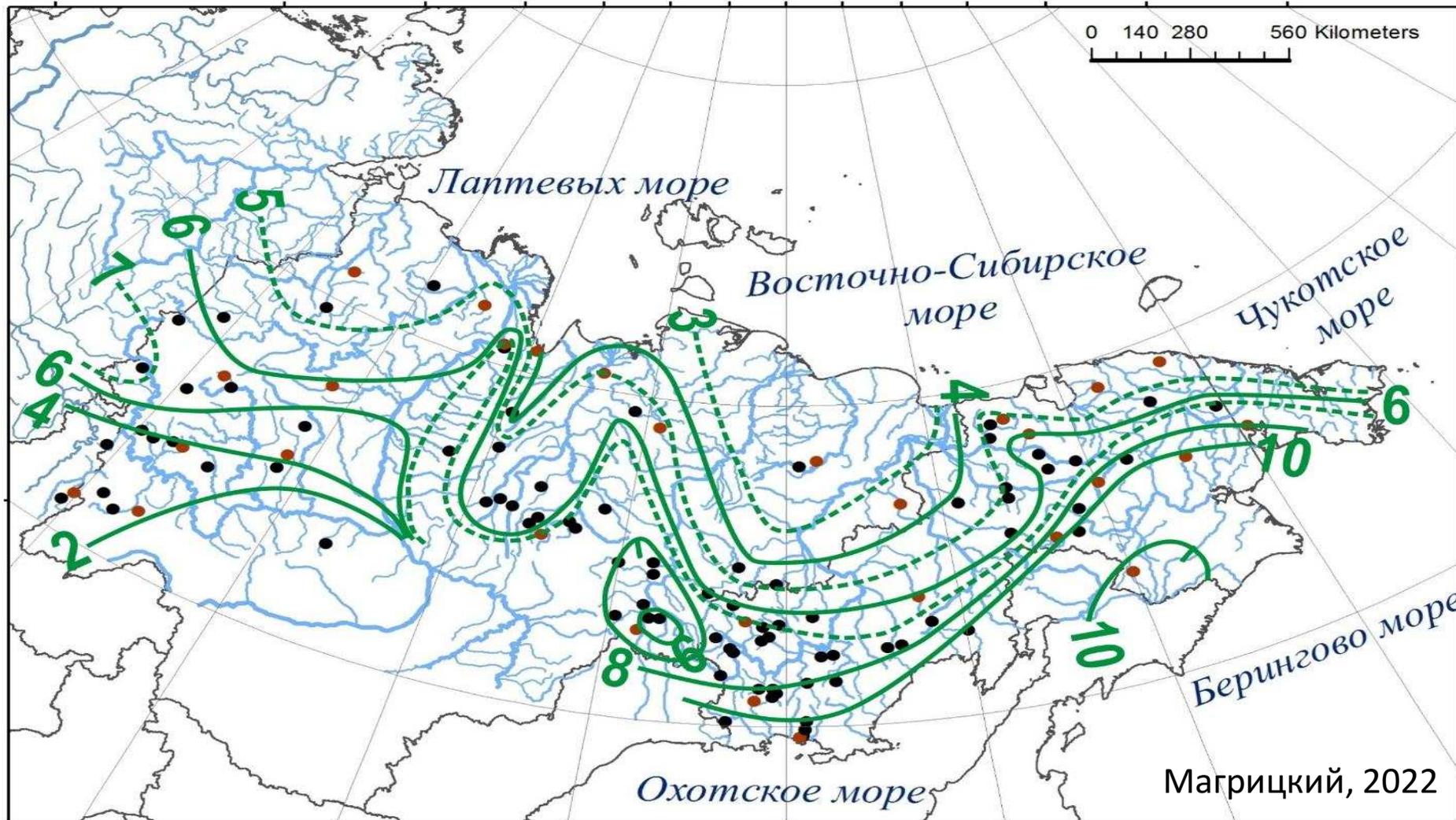


- Зависимости годового теплового стока от средней высоты водосбора

- Карта зон и подрайонов для зависимостей вида  $W_t=(H_{cp})$

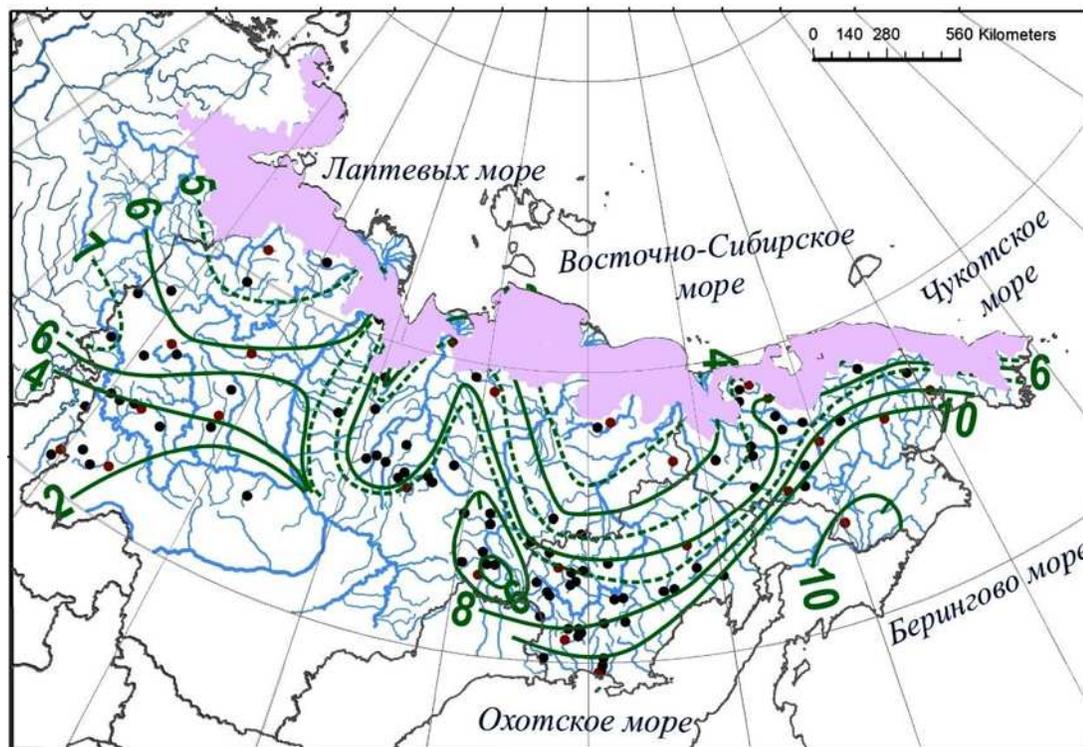
**Границы районов для теплового стока и температур воды различаются!!!**

# Новые материалы для новой методики



Карта модуля годового теплового стока ( $\times 10^9$  кДж/км<sup>2</sup>) зональных рек Северо-востока АТР по данным за период с 1950/1955 по 2018 гг.  
точками обозначены центры водосборов охваченных наблюдениями рек

# Тепловой сток с неохваченных участков и в арктические моря



Магрицкий, 2022

Как пример, удалось оценить:

- Тепловой сток для неизученных рек и между постами,
- Тепловой сток в устьях основных рек региона,
- Вынос теплоты в арктические моря большими реками и с участков побережий между ними,
- Общие сток теплоты в моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское.

Реки и межбассейновые водосборные территории (МБВТ)	Тепловой сток, $\times 10^{12}$ кДж			Доля от суммарного стока в море, %
	на замыкающем створе <sup>1</sup> (ЗС)	в вершине дельты <sup>3</sup> (ВД)	в море <sup>3</sup>	
Море Лаптевых				
Восточное побережье п-ова Таймыр	-	-	159/179	0,7
Водосбор Хатангского залива (без р.Хатанга)	-	-	186/206	0,8
Р.Хатанга	2120 <sup>2</sup> (Хатанга)	-	2540/2540	11,5
Водосбор Анабарской губы (без р.Анабар)	-	-	93/102	0,4
Р.Анабар	342 <sup>2</sup> (Саскылаах)	-	434/444/375	2,0
Анабаро-Оленекский участок	-	-	26/30	0,1
Р.Оленек	906 <sup>2</sup> (7,5 км)	1005/1010/680	-	4,5
Р.Лена <sup>2</sup>	16590 <sup>4</sup> (Кюсюк)	15600-16000 <sup>4</sup>	11750 <sup>4</sup>	72,2
Лено-Омолыйский участок	-	-	74/80	0,3
Р.Омолуй	34,3 <sup>2</sup> (Намы)	-	153/130/207	0,7
Омолуй-Янский участок	-	-	13,5/14	0,1
Р.Яна	1290 <sup>2</sup> (Юбилейная)	1290 <sup>2</sup>	1310/-/1160	5,8
От р.Яны до границы с водосбором Восточно-Сибирского моря	-	-	192/155	0,9
<b>Всего в море</b>			<b>22185/-/17430</b>	<b>100/479</b>
Восточно-Сибирское море				
От границы с водосбором моря Лаптевых до р.Индигирка	-	-	160/180	2,0
Р.Индигирка	2240 <sup>2</sup> (Воронцово)	2290/2300/2230	2380/-/2050	29,9
Индигирско-Алазейский участок	-	-	27/35	0,3
Р.Алазея	59,5 <sup>2</sup> (Андрюшкино)	-	158/182/130	2,0
Алазея-Копьимский участок	-	-	137/165	1,7
Р.Копыма	3975 <sup>2</sup> (Копьимское-1)	4570/-	4590/-	57,6
Копымо-Палыязамский участок	-	-	250/290	3,1
Р.Палыязам	35,7 <sup>2</sup> (0,8 км ниже устья Кооскын)	-	49/51	0,6
От р.Палыязам до границы с водосбором Чукотского моря	-	-	225/285	2,8
<b>Всего в море</b>			<b>7975</b>	<b>100</b>
Чукотское море				
От границы с водосбором Восточно-Сибирского моря до р.Амгузума	-	-	65/79	11,5
Р.Амгузума	219 <sup>2</sup> (174-й км)	-	228/228	40,5
От р.Амгузума до Берингова пролива	-	-	270/304	48,0
<b>Всего в море</b>			<b>563</b>	<b>100</b>

## Характеристики притока тепла в арктические моря России

Море, район	Тепловой сток, кДж $10^{12}$ , по источникам:			
	[Советская ..., 1970]	[Елшин, 1981, 1988]	[ <u>Магрицкий</u> , 2009]	новые оценки
<i>Баренцево</i>	-	4480	4680	-
<i>Белое</i>	-	6080	5860	-
<i>Карское</i>	23460	41500	37500	-
<i>Лаптевых</i>	13070	23200	21900	22185
<i>Восточно-Сибирское</i>	7370	9300	7800	7975
<i>Чукотское</i>	610	800	820	563
Весь арктический бассейн	-	85400	78600	-



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!