

Изменение гидротермических экстремумов на территории Сибири в XX–XXI вв.

Воропай Н.Н.^{1,2}, Рязанова А.А.¹

1 Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

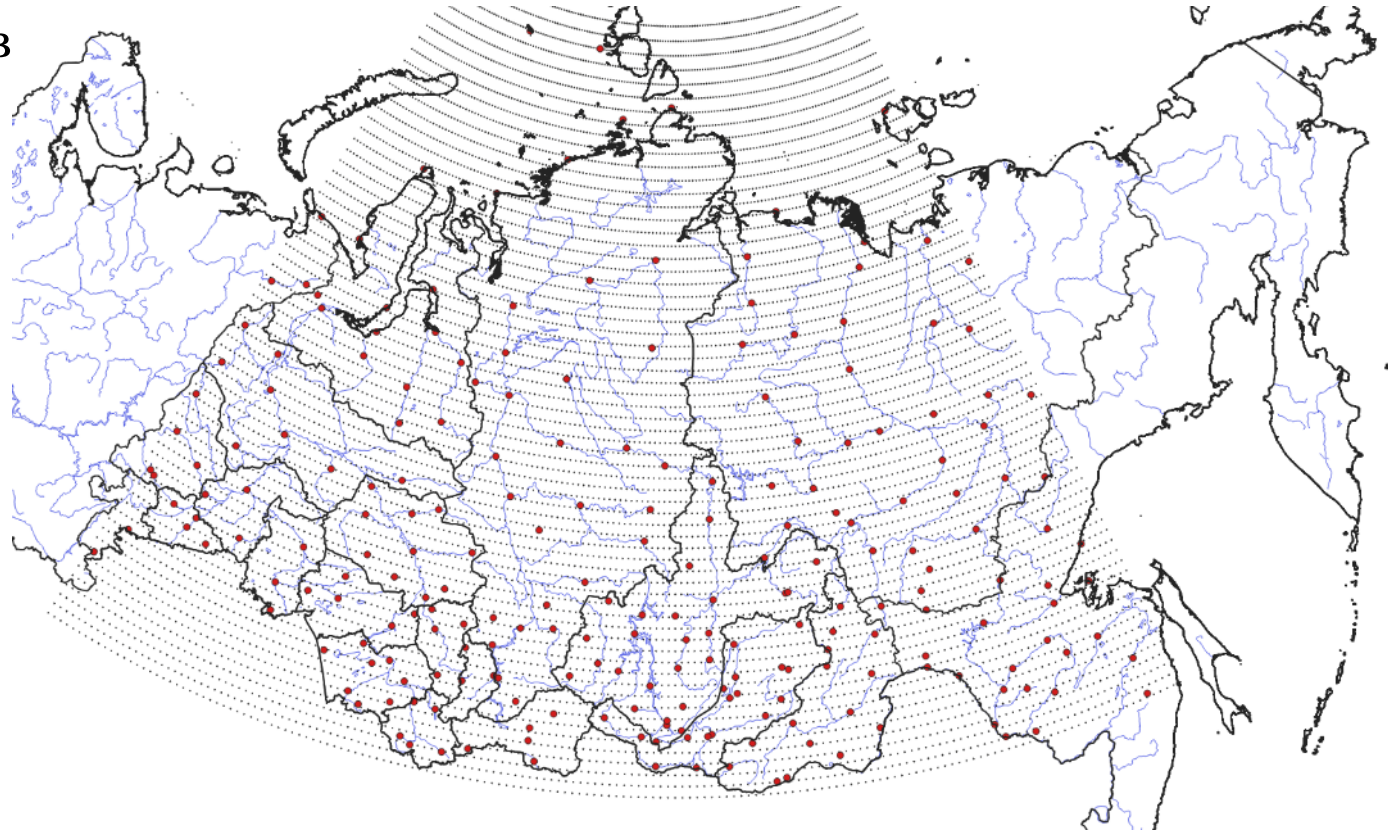
2 Институт географии им.В.Б.Сочавы СО РАН, Иркутск

voropay_nn@mail.ru

r.ann.1194@gmail.com

Территория, данные и период исследования

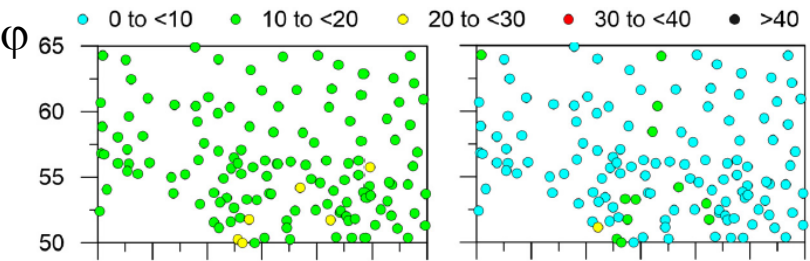
- Сибирь (50-85°с.ш., 60-140°в.д.)
 - май-сентябрь, 1940-2024 гг.
 - Температура воздуха и суммы атмосферных осадков
- ERA-5 reanalysis (0.25 × 0.25°)
- Метеорологические станции (meteo.ru)**
- Станции с однородными рядами наблюдения (257)



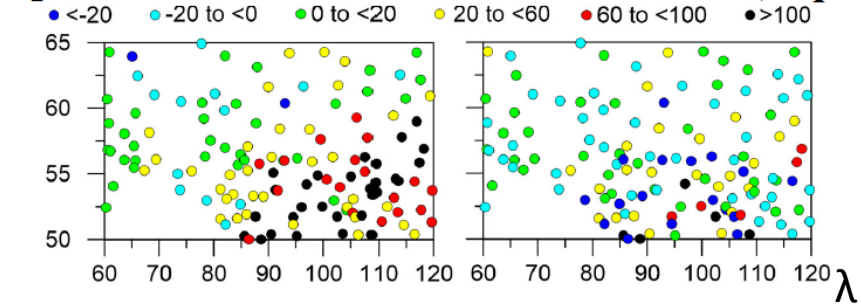
Для территории Южной Сибири проведена
корректировка базы данных высокого разрешения
средних месячных значений температуры воздуха и
сумм атмосферных осадков (реанализ Era5 ECMWF)
по данным наземных наблюдений на метеостанциях.

До коррекции После коррекции

Среднее абсолютное отклонение, мм (март)

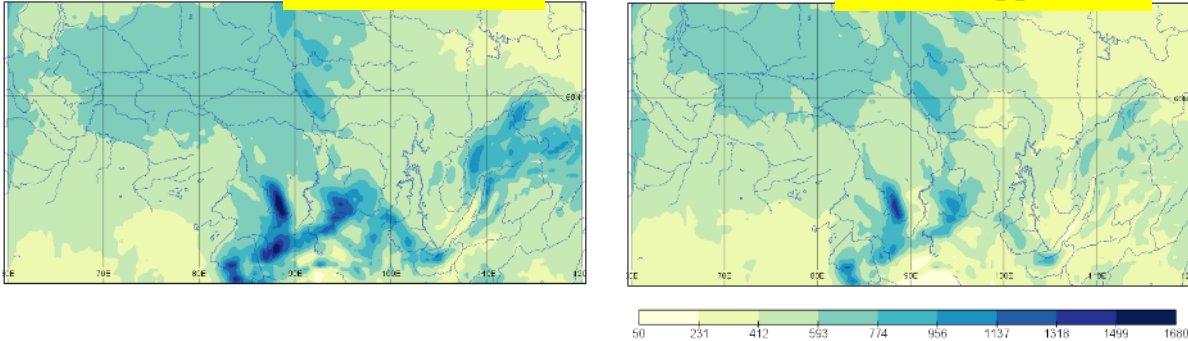


Среднее относительное отклонение, % (март)



Годовая сумма осадков, мм

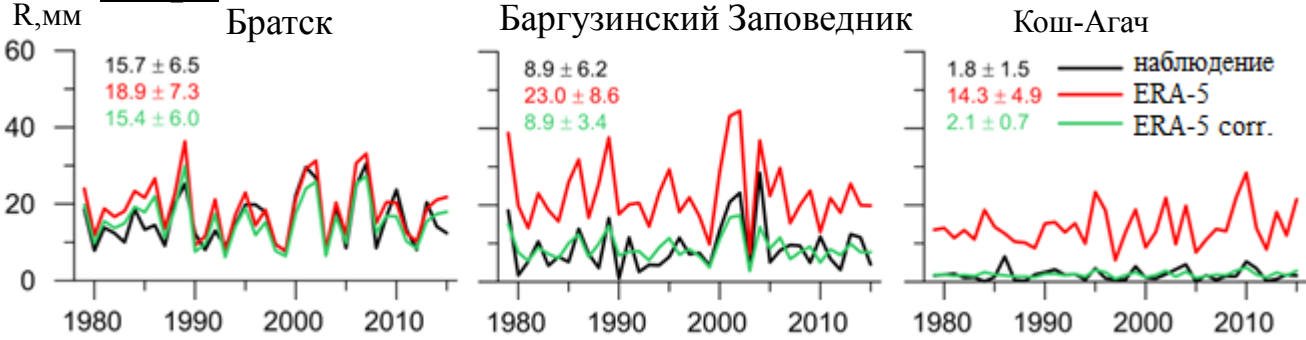
До коррекции После коррекции



Исходные данные:

Период – 1940-2024 гг. , территория – 50-85 °с.ш. 60-140 °в.д.
Era 5 – 0,25° × 0,25° (27,7 × 16,5 км), 132 метеостанции ([http:// www.meteo.ru](http://www.meteo.ru))

Март



Voropay NN, Ryazanova AA, Dyukarev EA. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia // Atmospheric Researches. *Volume 254*, 1 June 2021, 105528
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528> (WoS, Scopus Q1)

Ryazanova AA, Voropay NN, Dyukarev EA. Bais-corrected monthly precipitation data over South Siberia for 1979-2019 // Data in Brief 38 (2021) 10744. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107440> (Scopus Q2)

Скорректированные месячные данные доступны:
средняя температура воздуха <https://zenodo.org/record/5594045>
суммы атмосферных осадков <https://zenodo.org/record/4472614>

Абсолютное отклонение (%) сумм атмосферных осадков <i>реанализ – данные измерения</i>	До коррекции				
	Количество метеостанций				
	V	VI	VII	VIII	IX
0-30	25	39	59	62	51
30-60	71	86	71	67	65
60-90	19	5	1	2	9
90-200	16	2	1	1	6
>200	2	1	1	1	2

Абсолютное отклонение (%) сумм атмосферных осадков <i>реанализ – данные измерения</i>	После коррекции				
	Количество метеостанций				
	V	VI	VII	VIII	IX
0-30	106	102	94	106	118
30-60	27	31	39	27	15
60-90	-	-	-	-	-
90-200	-	-	-	-	-
>200	-	-	-	-	-

Гидротермический коэффициент Селянинова:

$$\text{ГТК} = \frac{\sum p}{0.1 \sum t_{>10}}$$

$\sum p$ - сумма атмосферных осадков за период с температурой воздуха выше 10 °С,

$\sum t_{>10}$ - сумма температур выше 10 °С.

Для более корректного сравнения результатов расчетов ГТК в разных ландшафтах рассчитывались нормированные на стандартное отклонение аномалии ГТК.

Индекс засушливости Педя (S):
$$S_i = \frac{\Delta t_i}{\sigma_t} - \frac{\Delta p_i}{\sigma_p} - \frac{\Delta E_i}{\sigma_E},$$

$\Delta t_i = t_i - t_{\text{ср}}$ - отклонения температуры воздуха, σ_t - стандартное отклонение.

(Для атмосферных осадков и влажности почвы аналогично)

Стандартизированный индекс атмосферных осадков (SPI):

Стандартизированный индекс атмосферных осадков и эвапотранспирации (SPEI):

- Имеющиеся многолетние данные об осадках (и эвапотранспирации) адаптированы к логистическому вероятностному распределению, которое затем преобразуется в нормальное распределение, так что средний SPEI для местоположения и желаемого периода равен нулю (SM Vicente-Serrano et al., 2010).
- Эта преобразованная функция вероятности представляет собой значение SPEI, которое варьируется от -2,0 до +2,0, крайние значения вне этого диапазона возникают в 5% случаев.

Классификация засух на основе индексов засушливости

Интенсивность засухи	Нормированная аномалия ГТК	Индекс Педя	SPI/SPEI
Слабая	$-1,25 < \text{ГТК}_{\text{а_норм}} \leq -1$	$1 \leq S < 2$	$-2 < \text{SPI/SPEI} \leq -1$
Умеренная	$-1,5 < \text{ГТК}_{\text{а_норм}} \leq -1,25$	$2 \leq S < 3$	$-3 < \text{SPI/SPEI} \leq -2$
Сильная	$-1,75 < \text{ГТК}_{\text{а_норм}} \leq -1,5$	$3 \leq S < 4$	$-4 < \text{SPI/SPEI} \leq -3$
Экстремальная	$\text{ГТК}_{\text{а_норм}} \leq -1,75$	$S \geq 4$	$\text{SPI/SPEI} \leq -4$

Коэффициент корреляции

	S/ΓTK	S/SPI	S/SPEI	ΓTK/SPI	ΓTK/SPEI	SPI/SPEI
V	-	0,81	0,88	-	-	0,77
VI	0,94	0,82	0,74	0,91	0,76	0,72
VII	0,92	0,84	0,71	0,95	0,76	0,74
VIII	0,91	0,82	0,71	0,95	0,78	0,78
IX	-	0,79	0,74	-	-	0,85

Для сравнения изменений, происходящих в разных ландшафтах используются нормированные индексы

- Индекс засушливости Педя (S) [Ped, 1975]
- SPEI Standardized Precipitation and Evaporation Index [Vicente-Serrano S.M. et al., 2010]

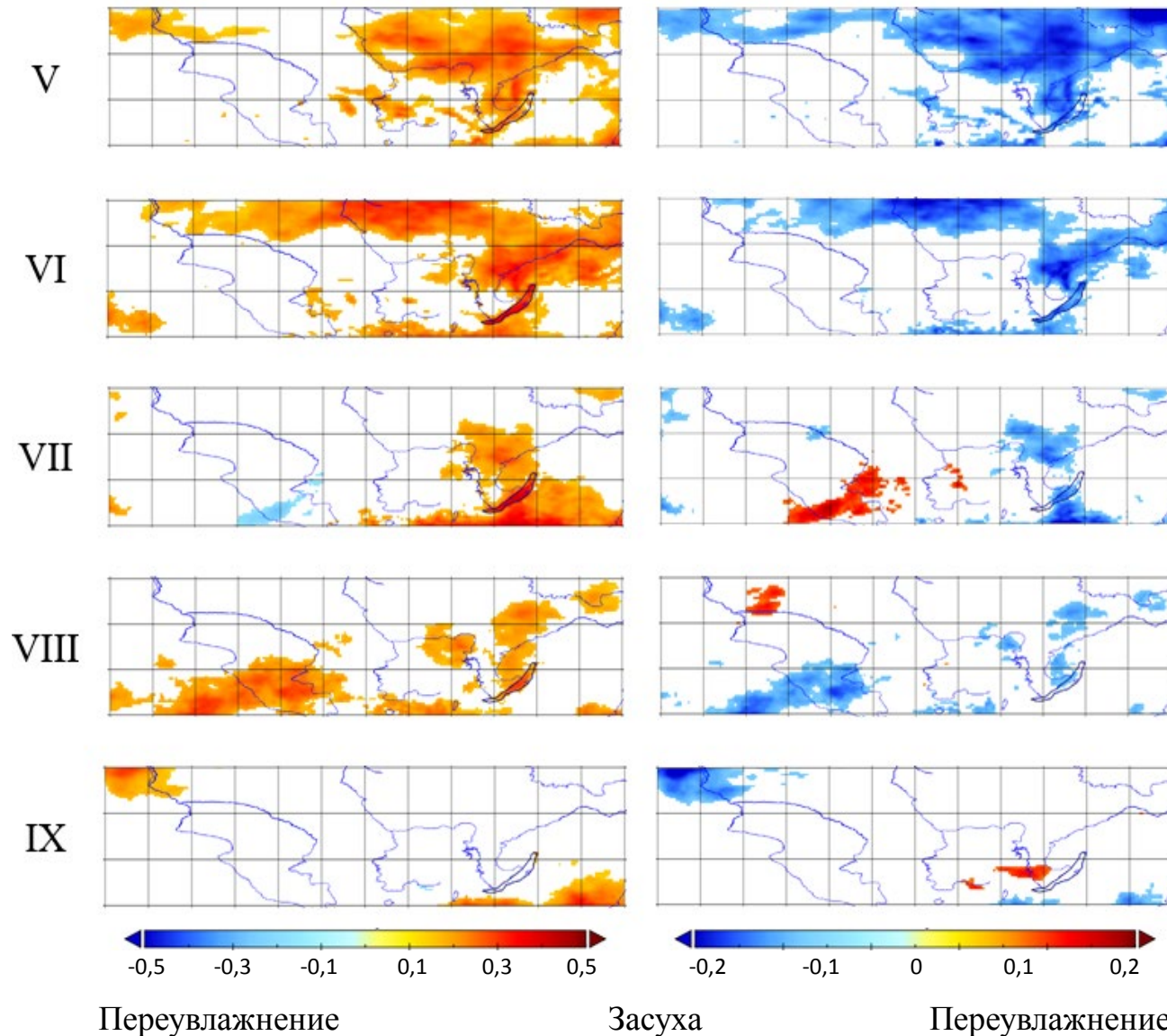
Классификация засух на основе индексов засушливости

Интенсивность	S	SPEI
слабая	$1 \leq S < 2$	$-2 < SPEI \leq -1$
умеренная	$2 \leq S < 3$	$-3 < SPEI \leq -2$
сильная	$3 \leq S < 4$	$-4 < SPEI \leq -3$
экстремальная	$S \geq 4$	$SPEI \leq -4$

Статистически значимые тренды (1940-2024), ед./10 лет

Индекс засушливости Педя (S)

SPEI



Случаи низкой урожайности яровой пшеницы при размещении первой культурой после пара (1986-2022 гг.)

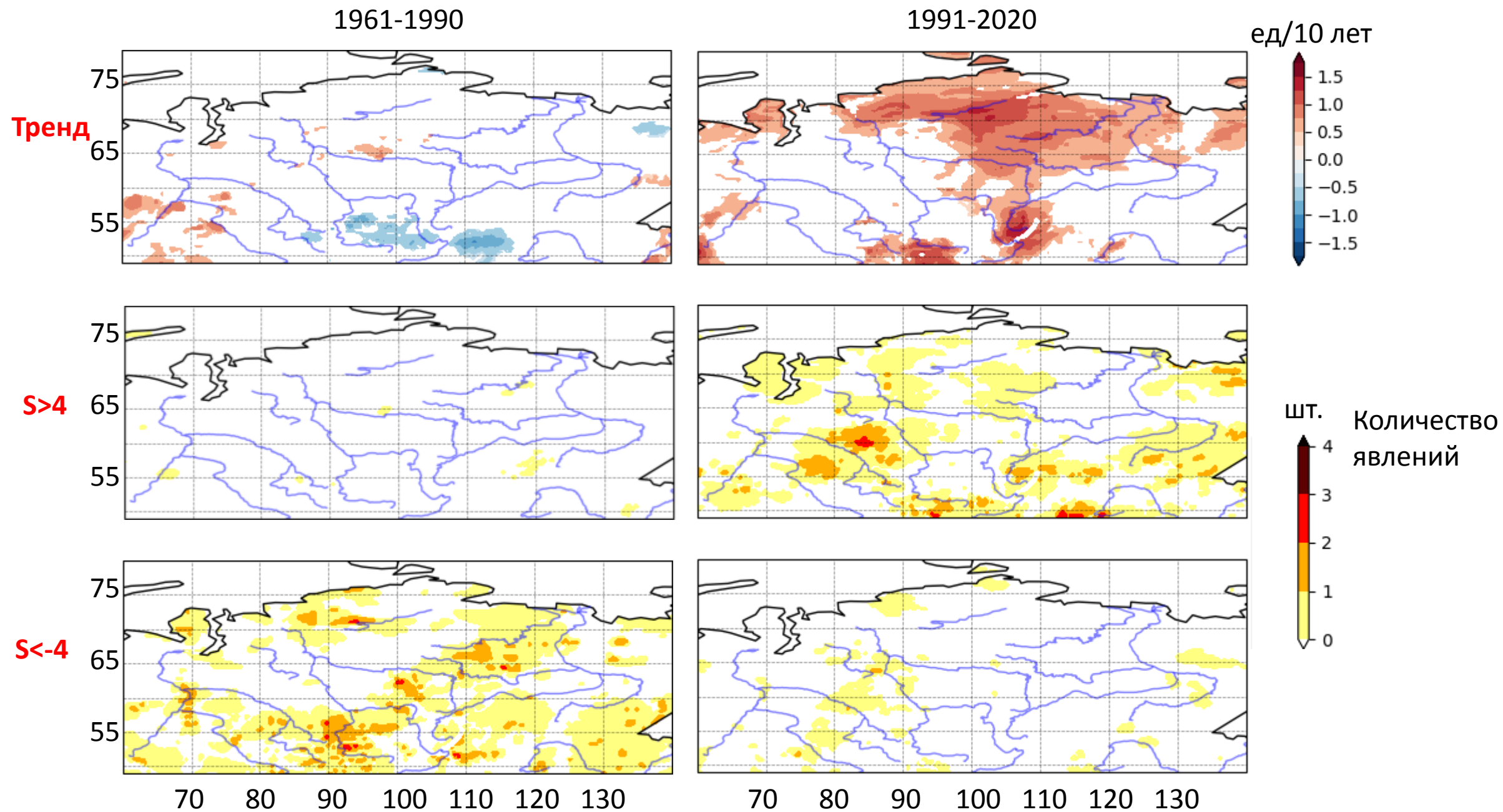
Год	Урожайность, т/га	Уровень интенсификации	Обработка почвы	Индексы, определившие засуху				
				S _{T,R,E}	S _{T,R}	SPI	SPEI	ГТК _{норм}
1990	1,9	0	без обработки					
2011	1,97	0	без обработки					
2012	1,12	0	без обработки					
2012	1,22	0	отвальная					
2012	1,24	0+Г	без обработки					
2012	1,26	0+Г	отвальная					
2012	1,91	УФГ	без обработки					
2012	1,86	УФГ	отвальная					
2020	0,35	0	без обработки					
2020	1,35	0	отвальная					
2022	1,25	0+Г	без обработки					
2022	1,7	0+Г	отвальная					

Характеристика коэффициентов корреляции между метеохарактеристиками и урожайностью (18 экспериментов)

Индекс	Статистически значимые коэффициенты корреляции													
	Урожайность/индекс							Урожайность/модуль индекса						
	количество				максимум			количество				максимум		
	V	VI	VII	всего	V	VI	VII	V	VI	VII	всего	V	VI	VII
ГТК	7	2	11	20	59	54	68	0	0	1	1	44	-42	-51
S _{T,R}	7	6	14	27	54	79	78	4	5	16	25	61	-57	-67
SPI	10	0	17	27	66	46	77	0	0	15	15	38	-39	-70
SPEI	7	6	15	28	56	72	74	4	3	3	10	58	-58	-57
T	0	7	6	13	31	79	62							
Осадки	9	0	11	20	64	42	67							

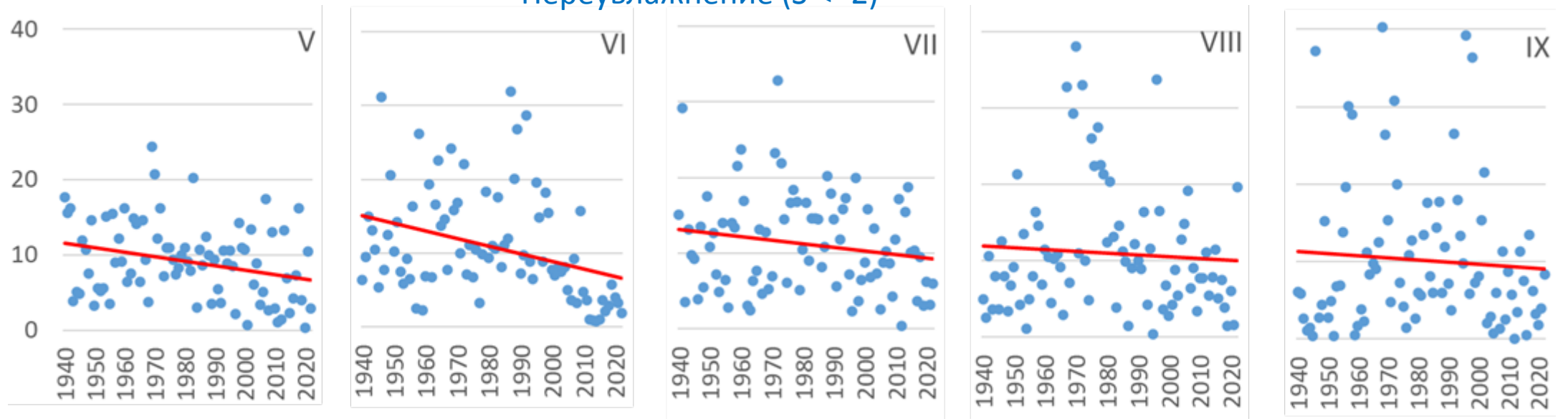
Примечание: желтым выделены максимальные (по модулю) коэффициенты корреляции для каждой метеорологической характеристики.

Индекс засушливости Педя (S). Среднее значение за июнь-август

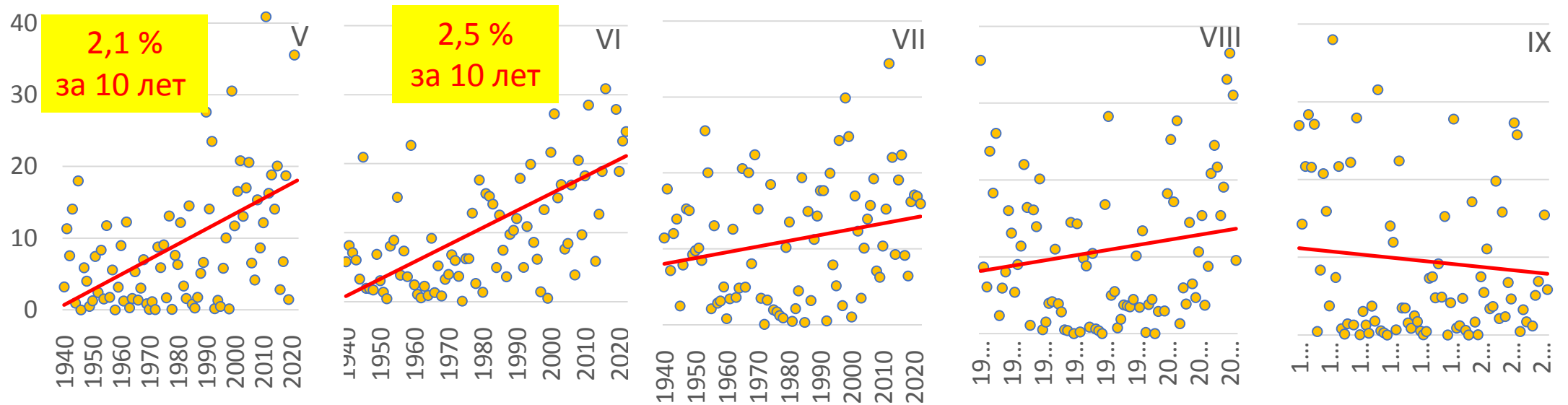


Многолетние изменения доли площади (%), занятой засухой/переувлажнением

Переувлажнение ($S < -2$)



Засуха ($S > 2$)



Годы, когда доля территории **с засухой/переувлажнением** умеренной (и более) интенсивности была больше 30%

Засуха

Год	Месяц	Территория (%)
1940	авг	36
1951	Сент	38
1966	Сент	32
1998	Авг	47
1999	Май	31
2011	Май	41
2012	Июнь, июль	43, 34
2016	Июнь, сент	31, 49
2017	Июнь	42
2018	Июнь	44
2019	Авг	37
2020	Май, авг, сент	43, 37, 42
2021	Май, авг	36, 31
2022	май	47

Переувлажнение

Год	Месяц	Территория (%)
1946	Июнь, сент	31, 37
1957	Сент	30
1967	Авг	33
1968	Сент	40
1970	Авг	38
1972	Июль, авг, сент	33,33, 31
1987	Июнь	32
1996	Авг, сент	34,39
1998	Сент	36

Периоды продолжительных засух/переувлажнений, когда явление наблюдалось на большей части территории

$1 \leq S$

	май	июнь	июль	август	сентябрь
1940	10	24	19	50	40
1943	43	15	28	48	59
1945	42	43	16	44	61
1998	10	26	50	68	7
2001	43	48	28	49	21
2011	62	55	26	36	47
2012	50	68	61	20	68
2016	24	51	42	36	78
2018	27	55	23	44	33
2019	32	43	46	57	20
2020	73	34	38	54	62
2021	56	45	38	62	34
2022	64	51	37	25	19

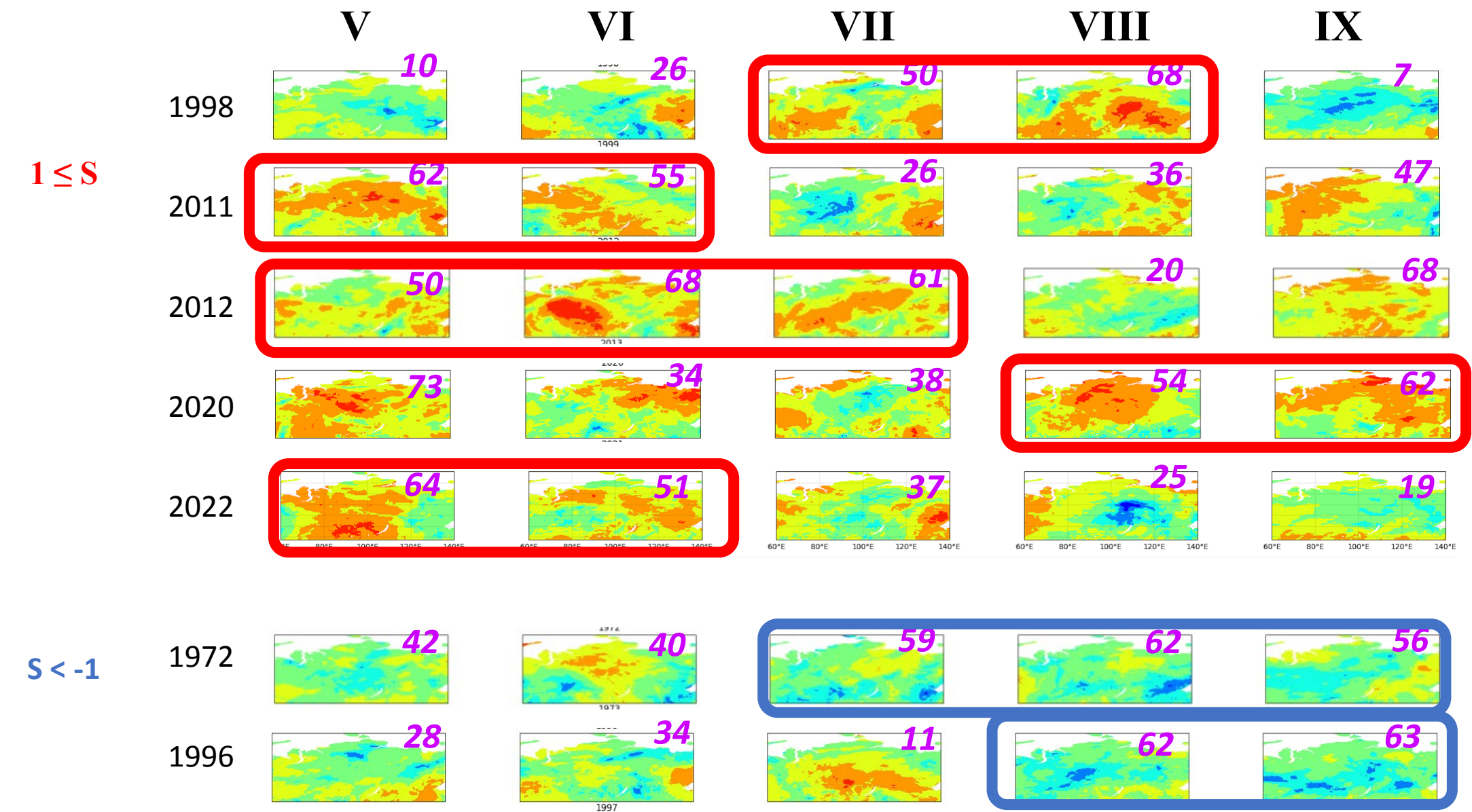
$S < -1$

	май	июнь	июль	август	сентябрь
1949	36	45	47	19	31
1960	29	25	41	41	14
1961	22	45	41	30	15
1966	36	40	41	19	26
1969	48	38	14	48	55
1970	51	48	20	69	27
1972	42	40	59	62	56
1977	19	13	42	52	35
1996	28	34	11	62	63

2016	сентябрь	78
2020	май	73

1946	сентябрь	62
1968	сентябрь	65
1970	август	69
1972	август	62
1996	август	62
	сентябрь	63

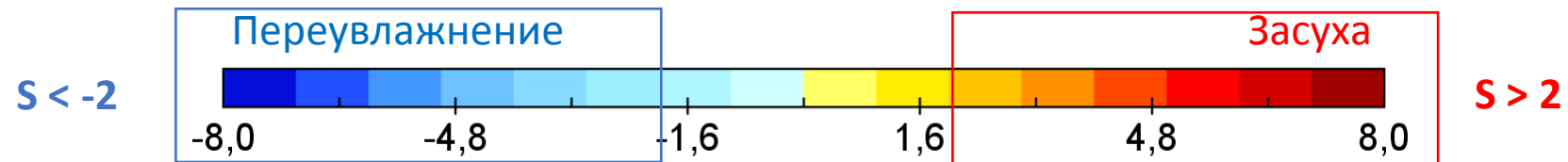
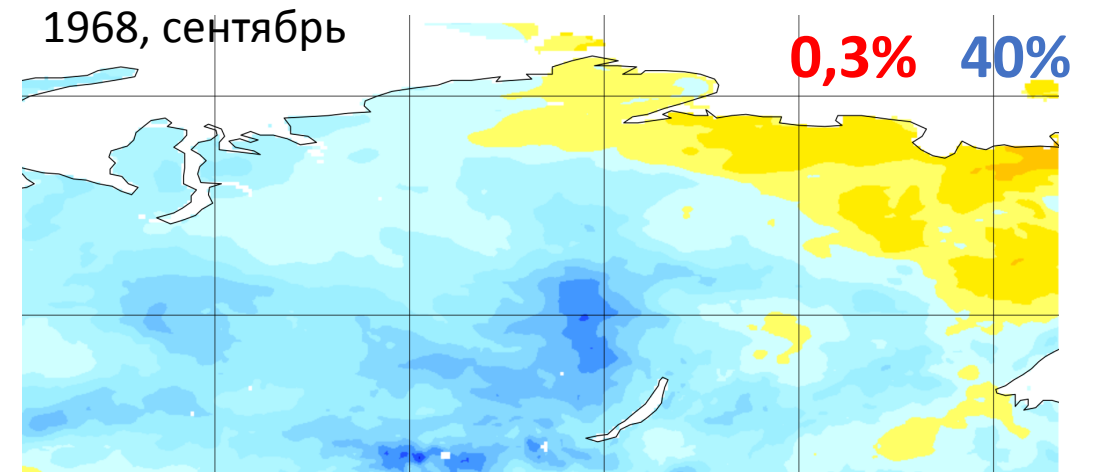
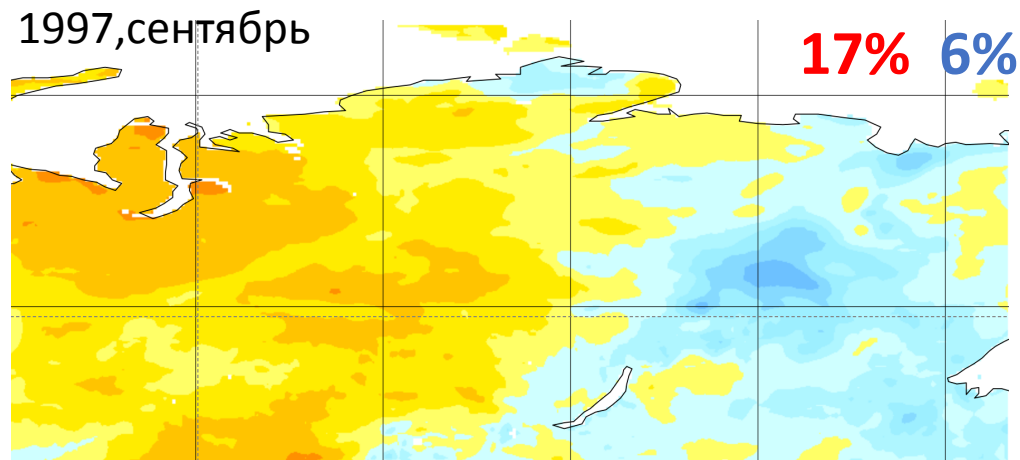
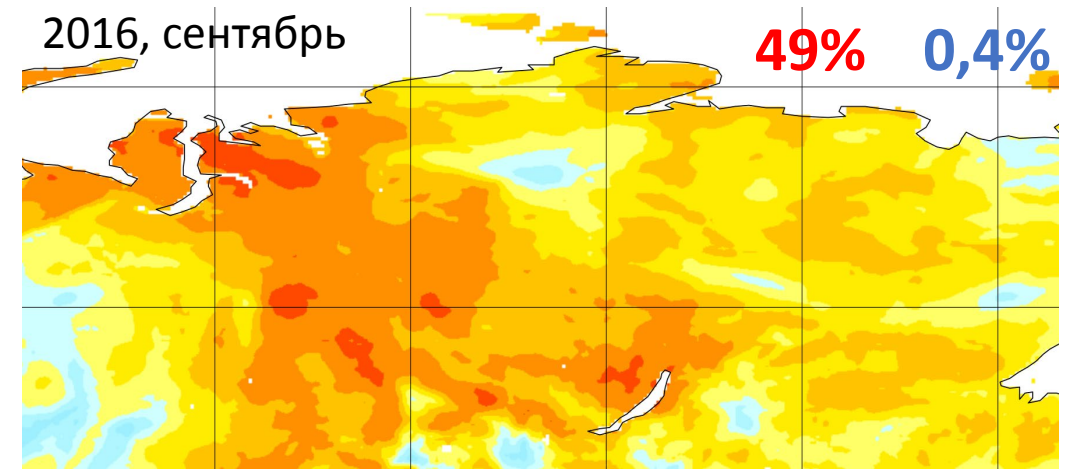
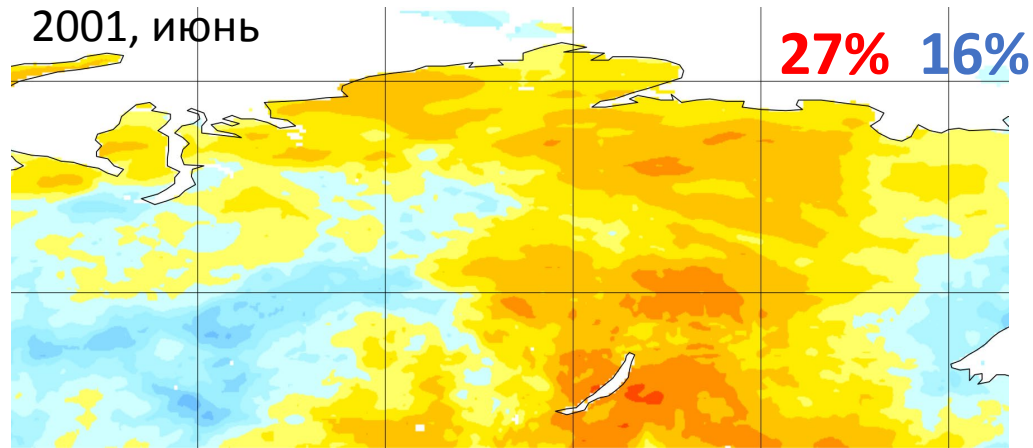
Более 50% территории охвачена засухой, продолжавшейся 1—5 месяцев, в 1998, 2011, 2012, 2020, 2022 гг. Наибольшее по площади переувлажнение в течение вегетационного сезона наблюдалось в 1972, 1996 гг.



Индекс засушливости Педя

1940-2024 гг. , май-сентябрь

Доля территории (%) **с засухой**/переувлажнением средней (и более) интенсивности



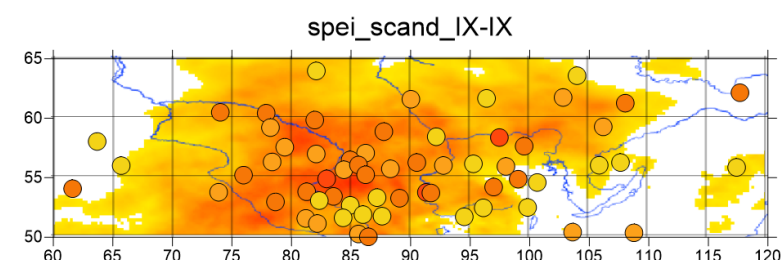
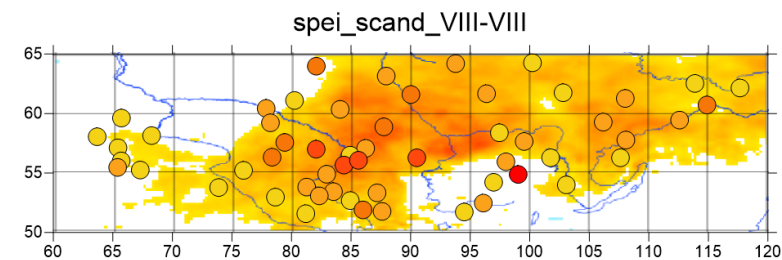
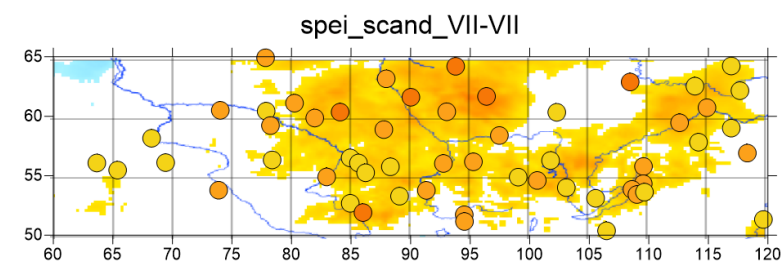
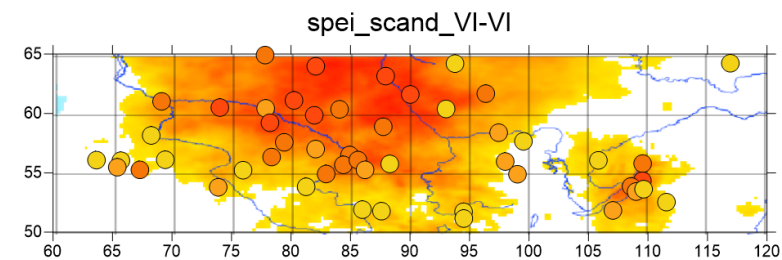
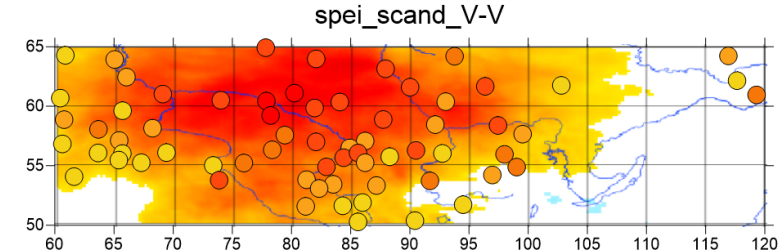
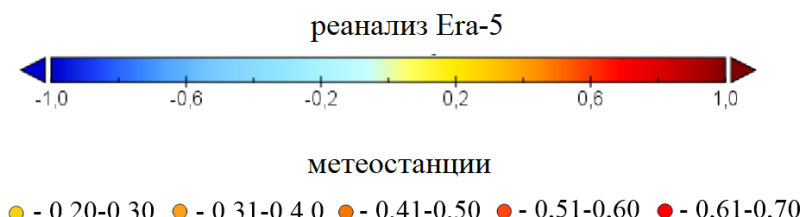
Оценка связи между циркуляционными и гидротермическими индексами

Гидротермические характеристики (ГТК, S, SPI, SPEI) – данные – температура воздуха, суммы атмосферных осадков (Era 5 (корр)), метеорологические станции [<http://www.meteo.ru>]

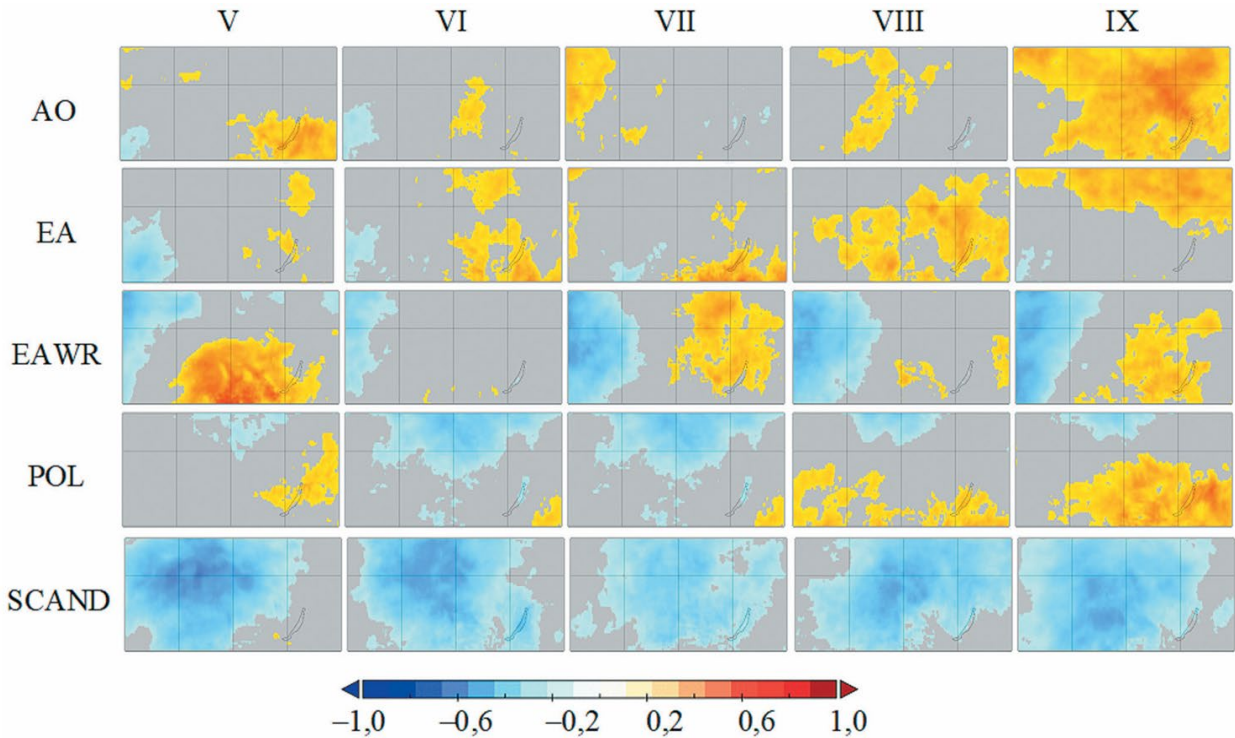
Характеристики атмосферной циркуляции:

- 1) Продолжительность ЭЦМ (по Дзердзиевскому) по типам (зональная циркуляция, нарушения зональной циркуляции, меридиональная северная, меридиональная южная) [<https://atmospheric-circulation.ru/datas/>];
- 2) телеконнекционные индексы, описывающие основные циркуляционные режимы (EA, EAWR, EPNP, ExplVar, NAO, PNA, POL, PT, SCAND, AO, TNH, WP) [<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>]

Распределение статистически значимых коэффициентов корреляции (SPEI / SCAND)



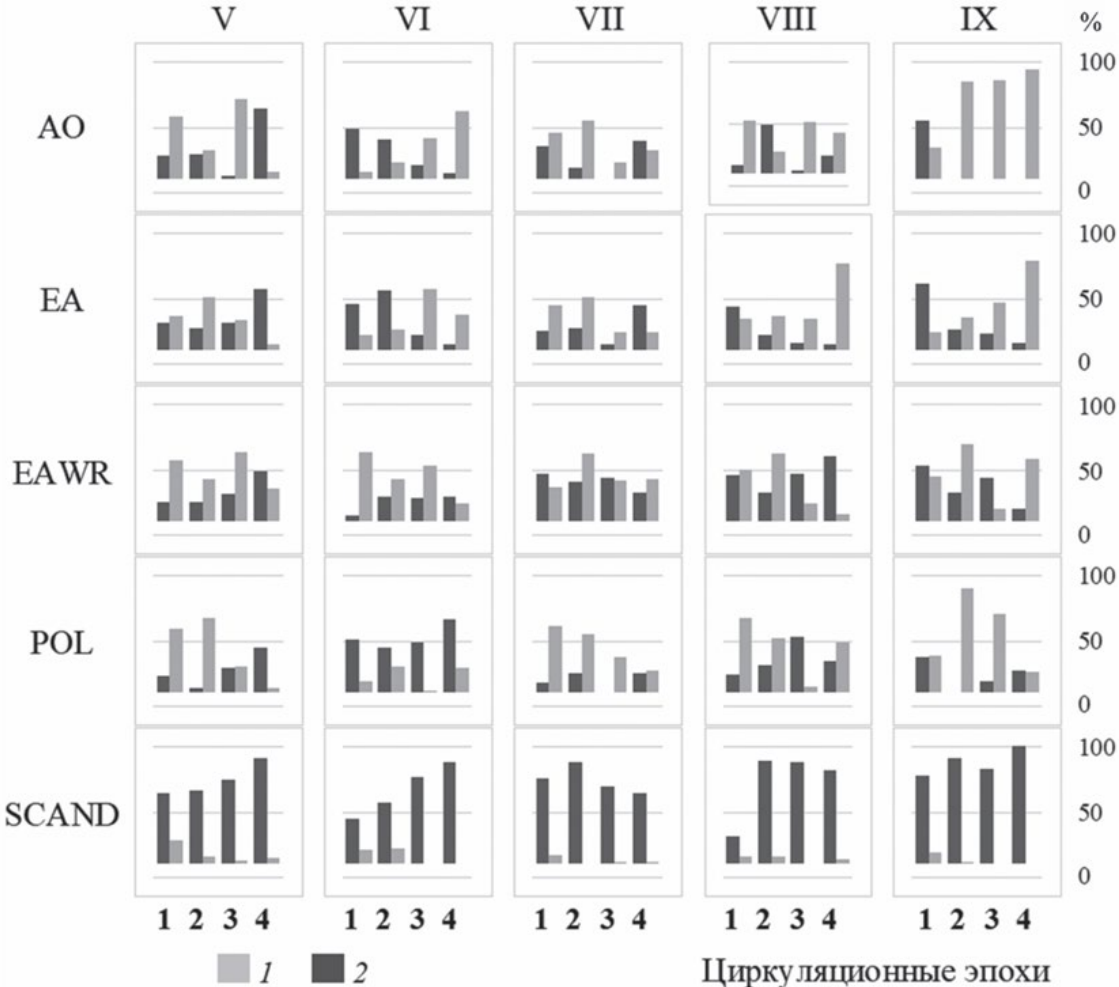
Статистически значимые коэффициенты корреляции ($\alpha < 0,05$)
индекс засушливости Педя / циркуляционные индексы
1941-2020 гг.



Циркуляционные эпохи (Кононова Н.К. , 2015):

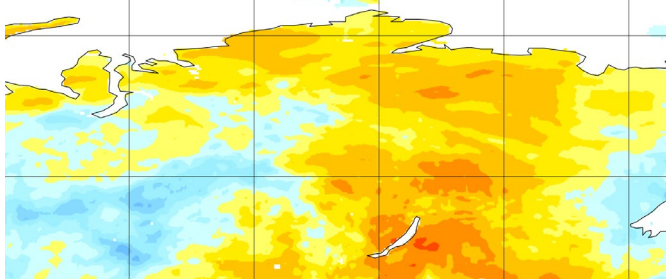
- 1 — 1935—1962 гг. — зональная;
- 2 — 1963— 1976 гг. — меридиональная;
- 3 — 1977—2005 гг. — зональная;
- 4 — 2006—2020 гг. — меридиональная.

Процент территории, где в разные
циркуляционные эпохи зафиксированы
положительные (1) или отрицательные
(2) коэффициенты корреляции между
индексом засушливости Педя S и
индексами циркуляции атмосферы

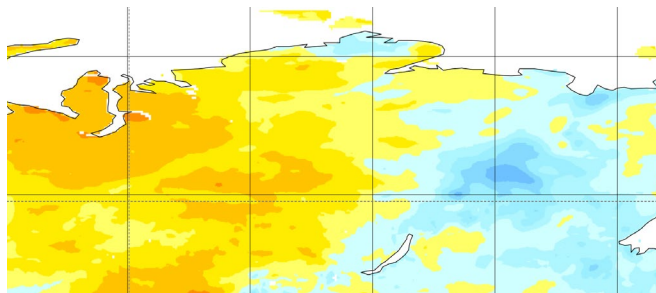


Индекс засушливости Педя (S)

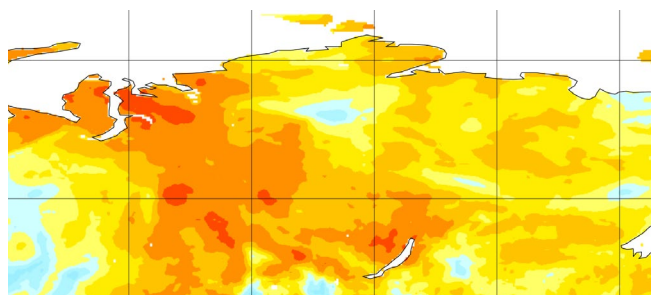
2001,
июнь



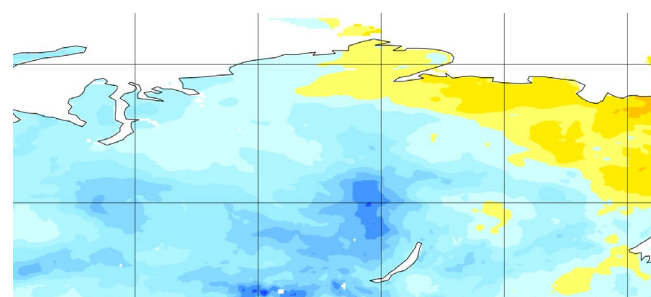
1997,
сент.



2016,
сент.

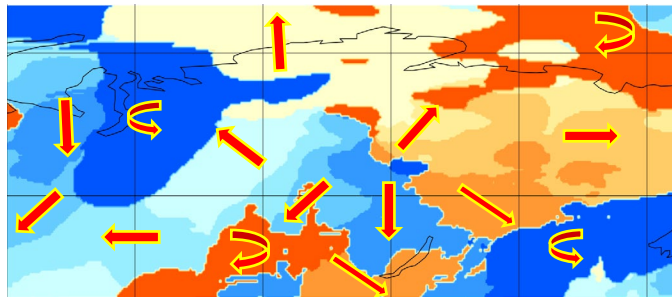
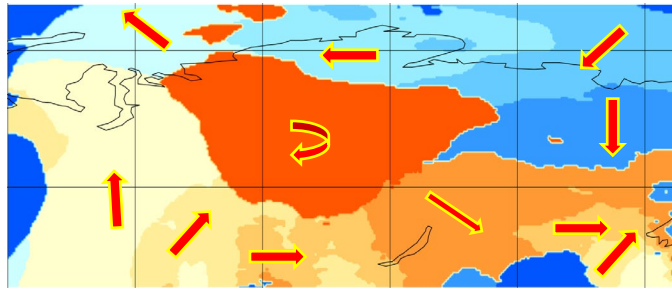
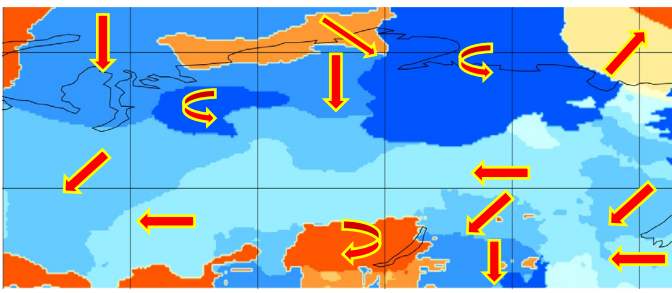
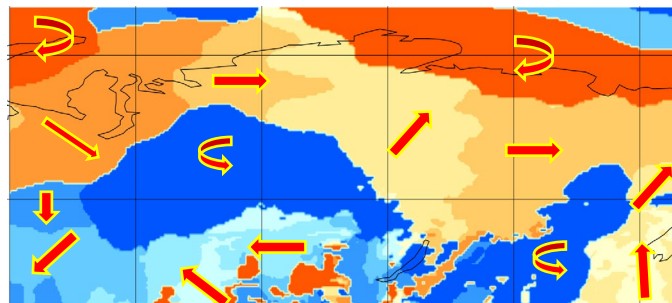


1968,
сент.



Переувлажнение

Засуха



aZn

C3

3

ЮЗ

Ю

ЮВ

В

СВ

С

Zn

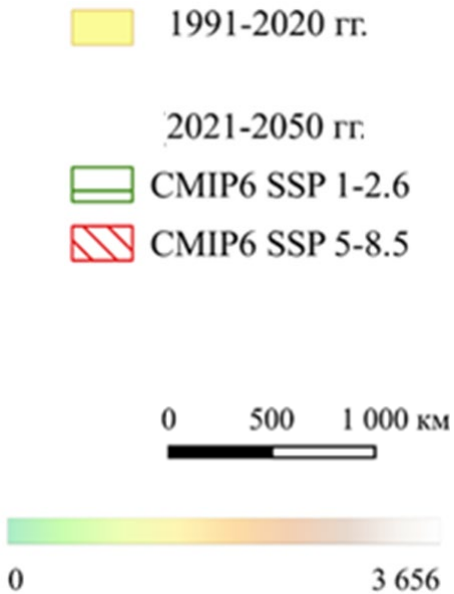
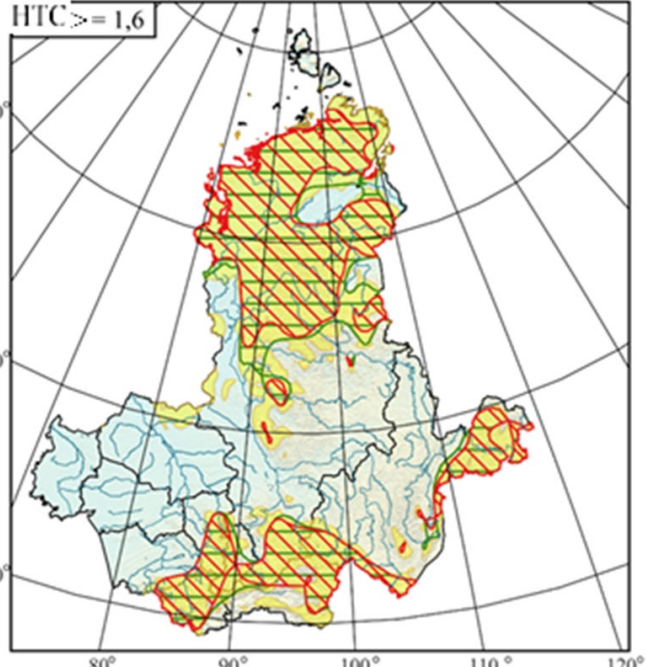
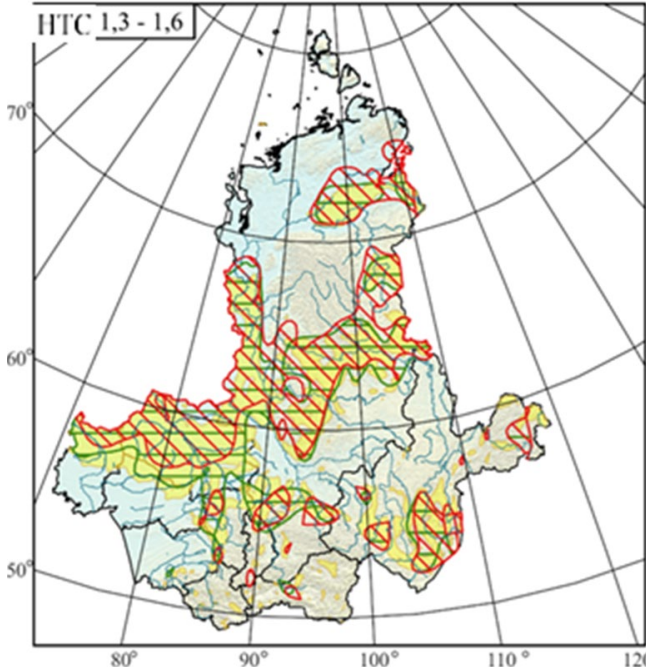
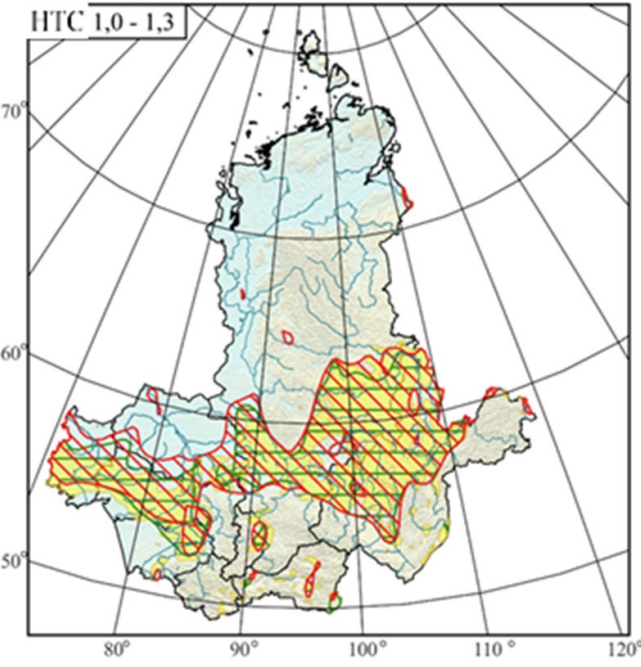
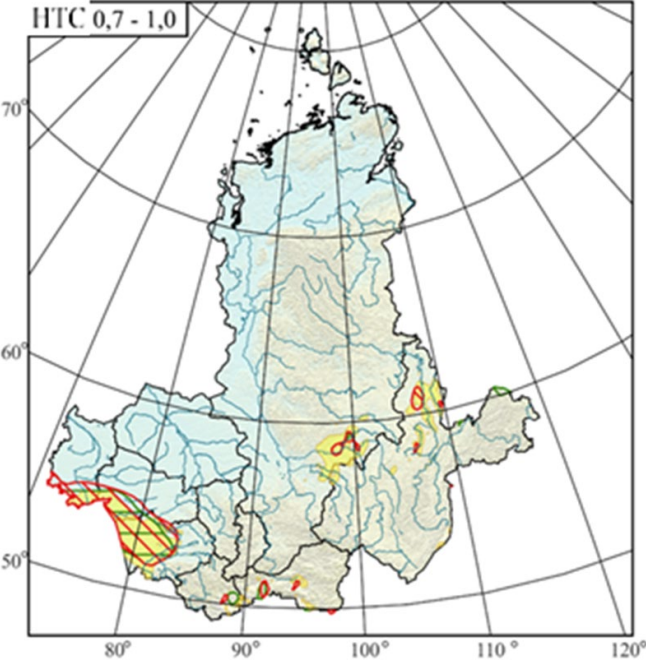
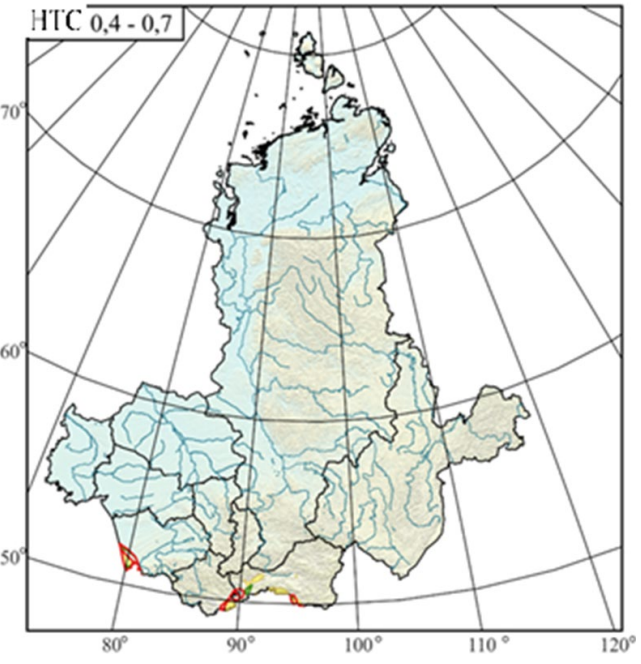
Распределение типов циркуляции (метод Дженкинсон-Коллисона)

в месяцы, когда наблюдается одна из типичных ситуаций распределения индекса засушливости Педя

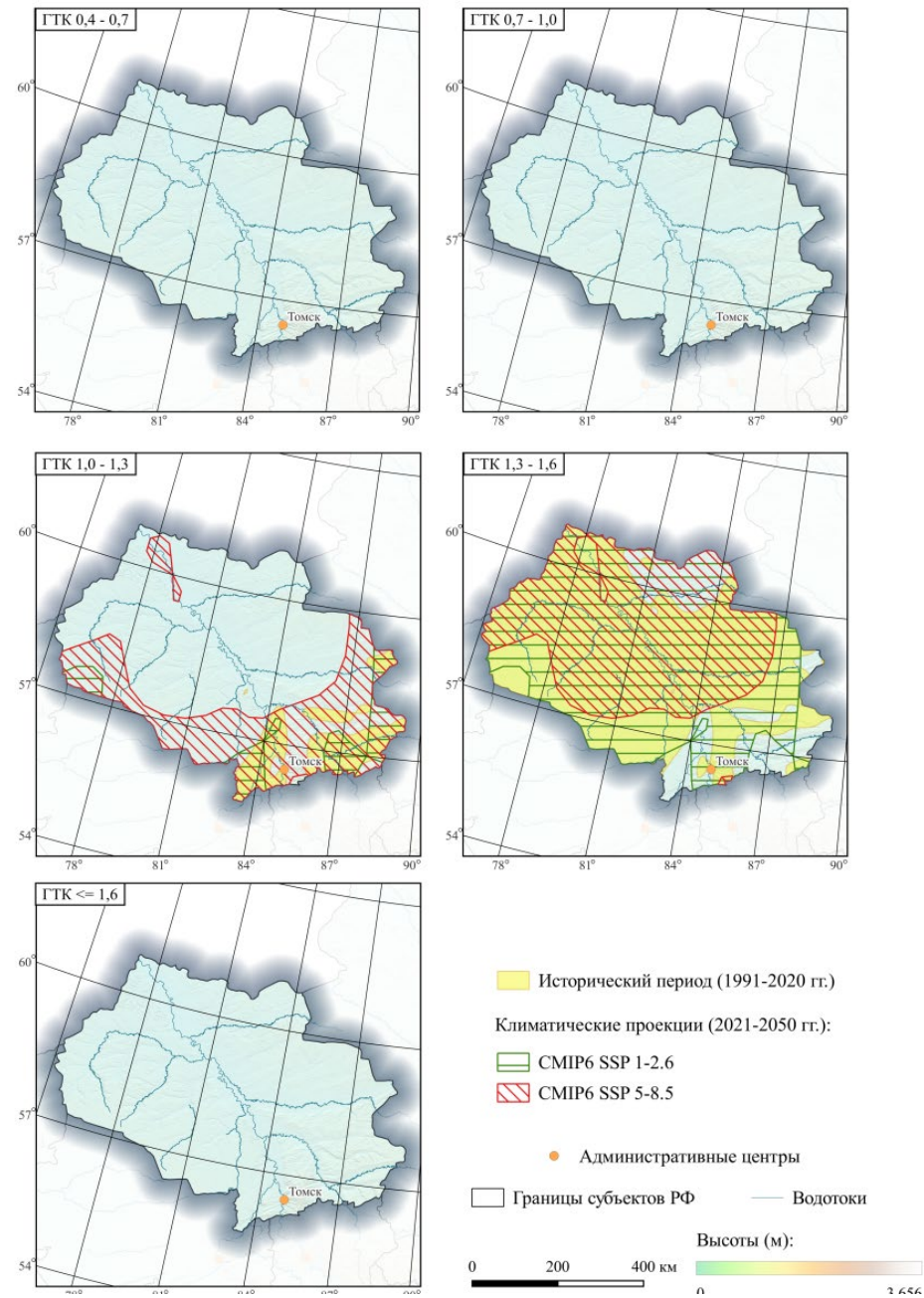
Программа на Python в открытом доступе GitHub (<https://github.com/PedroLorme/ndeZ/jcclass>)

Зоны увлажнения по значениям ГТК (Шашко, 1967)

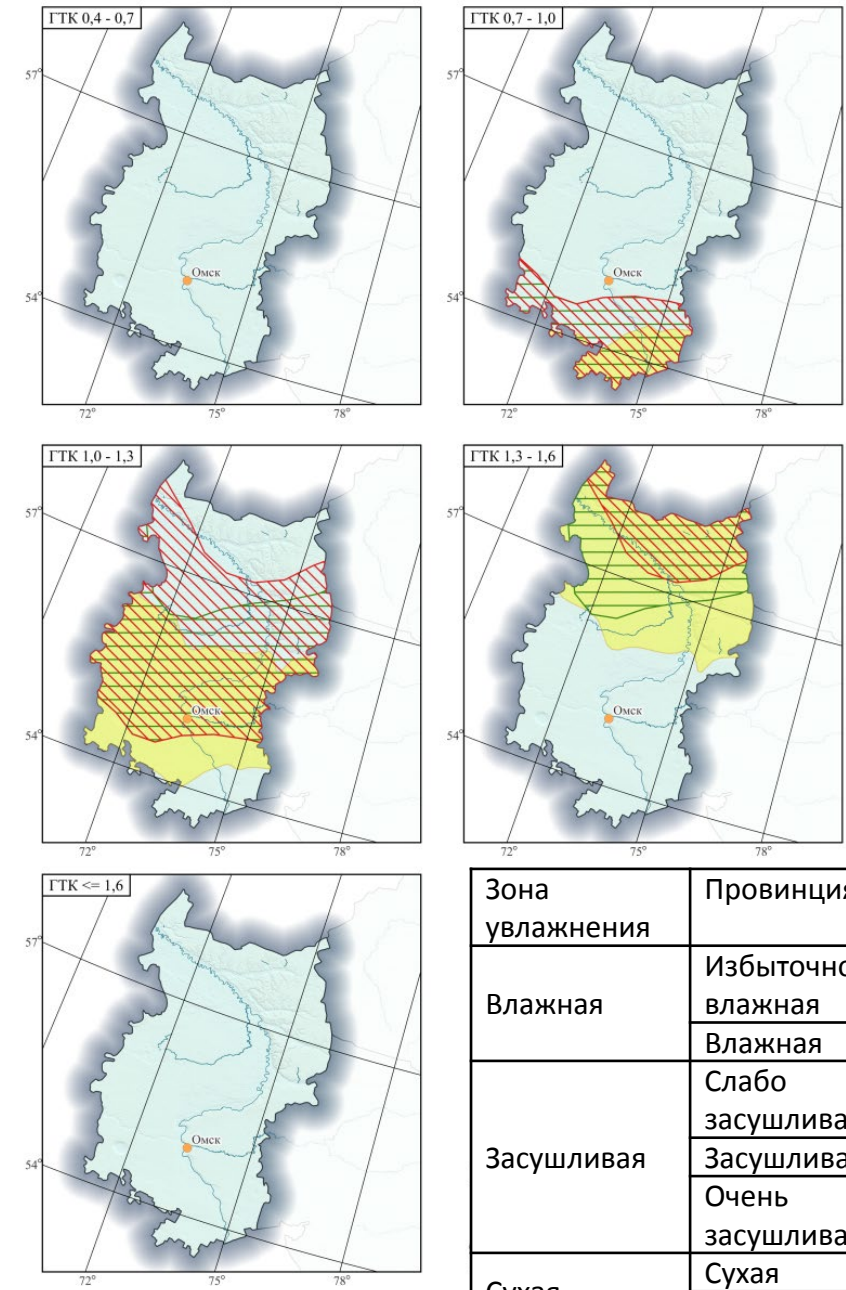
Зона увлажнения	Провинция	Природная зона	ГТК
Влажная	Избыточно влажная	Тайга	$\geq 1,6$
	Влажная	Тайга, листв. леса	1,6-1,3
Засушливая	Слабо засушливая	Лесостепь	1,3-1,0
	Засушливая	Степь	1,0-0,7
	Очень засушливая		0,7-0,4
Сухая	Сухая	Полупустыня	0,4-0,2
	Очень сухая	Пустыня	$< 0,2$



Томская область



Омская область



Зона увлажнения	Провинция	Природная зона	ГТК
Влажная	Избыточно влажная	Тайга	≥ 1,6
	Влажная	Тайга, листв. леса	1,6-1,3
Засушливая	Слабо засушливая	Лесостепь	1,3-1,0
	Засушливая	Степь	1,0-0,7
	Очень засушливая		0,7-0,4
Сухая	Сухая	Полупустыня	0,4-0,2
	Очень сухая	Пустыня	< 0,2