



Долгопериодная изменчивость и предсказуемость волн тепла и холода

Р.М.Вильфанд¹, В.М.Хан¹, И.А.Куликова¹, М.Е.Макарова¹

¹ Гидрометцентр России

19-21 ноября 2024 г. Москва

Содержание

- 1 Определение и количественные критерии
- 2 Долгопериодная изменчивость
- 3 Лето 2024 г. в прогнозах и наблюдениях
- 4 Верификация прогнозов
- 5 Выводы

Определение и количественные критерии

ВОЛНА ХОЛОДА. Резкое понижение температуры, распространяющееся в определенном направлении и захватывающее с течением времени все большую территорию. Связано с вторжением холодной воздушной массы из высоких широт, а в Европе зимой — также с востока.

ВОЛНА ТЕПЛА. Значительное потепление, распространяющееся в определенном направлении, связанное с адвекцией теплой массы [Хромов и Мамонтова, 1974]

В работе [Груза и Ранькова, 2011] волна тепла ассоциируется с превышением аномалии приземной температуры воздуха величины стандартного отклонения на протяжении 7 дней и более с возможными отступлениями от этого правила (не ниже половины величины стандартного отклонения) в течение не более 3 дней.

Рочева [Рочева и Смирнов, 2013] для идентификации волны тепла предлагает использовать следующие три метрики: w_0 — интенсивность аномалии, d_0 — длительность ее существования, L_0 — пространственные размеры, определяемые градусами долготы внутри широтного пояса 45° - 55° с.ш. Анализ характеристик волн тепла выполнен для трех уровней интенсивности $w_0 = 0,5, 1,0$ и $2,0$ (аномалия выше $0,5\sigma, 1\sigma$ и 2σ), из которых наиболее удачным автору представляется $w_0=1$. В качестве волны тепла рассматривается период существования аномалии с характеристиками: $W_t \geq w_0, D \geq d_0, L \geq L_0$.

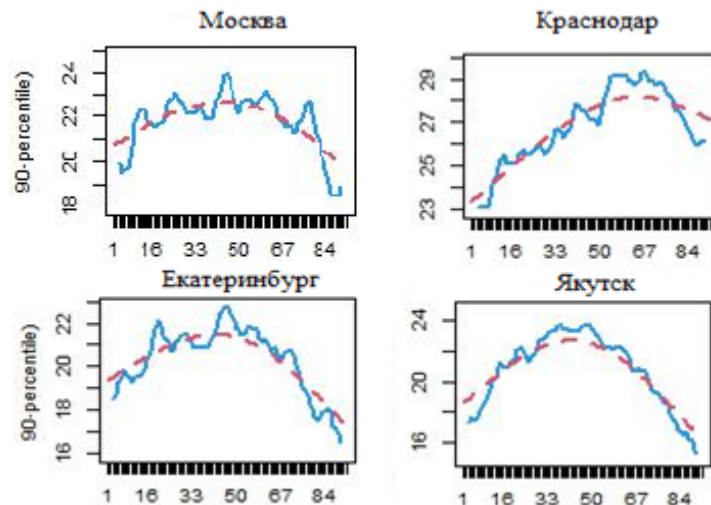
Многоаспектный характер воздействий волн тепла (на здоровье человека, сельское хозяйство, лесные пожары, транспорт, энергетику и т. д.) порождает обилие различных определений и специфических (ориентированных на различные сферы жизни общества) числовых показателей [Perkins and Alexander, 2012]. При этом рассматриваются различные метеорологические параметры (температура, влажность, скорость ветра и т.д.) или их комплексы. Предупреждения о возможных пороговых значениях таких индексов, идентифицирующих события, которые могут оказать негативное влияние на здоровье человека и вызвать физиологический стресс, выпускаются Национальной метеорологической службой (NWS) США.

Определение и количественные критерии

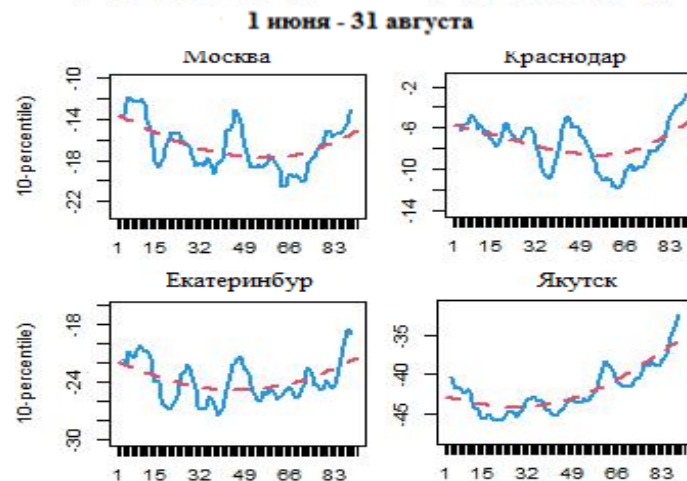
На длительных интервалах времени (от недели до месяца и сезона) наиболее целесообразным представляется использование в качестве характеристик экстремальных явлений климатических индексов. Обширный набор такого рода ежегодных индексов, рассчитываемых на основе ежесуточных рядов данных для приземной температуры и осадков, был рекомендован Экспертной группой по выявлению климатических изменений, мониторингу и индексам (<http://etccdi.pacificclimate.org/>) в рамках проекта CLIVAR. Наиболее распространенными на практике являются индексы волн тепла (WSDI) и холода (CSDI) (табл.1).

Таблица 1 - Климатические индексы (WSDI и CSDI), характеризующие температурный режим (<http://etccdi.pacificclimate.org/>).

ID	Название	Определение	Единицы измерения
WSDI	Волны тепла (Warm spell duration indicator)	Волны тепла: число дней в течение определенного периода, когда по меньшей мере в течение 5 последовательных дней температура воздуха > 90-го перцентиля	Дни
CSDI	Волны холода (Cold spell duration indicator)	Волны холода: число дней в течение определенного периода, когда по меньшей мере в течение 5 последовательных дней температура воздуха < 10-го перцентиля	Дни



a)



b)

Временной ход 90-го и 10-го перцентилей в течение летнего (a) и зимнего (б) периодов в точках сетки, ближайших к пунктам Москва, Краснодар, Екатеринбург и Якутск по данным реанализа ЕЦСПП (ERA5) (1991-2020 гг.

Долгопериодная крупномасштабная изменчивость

МЕТОДОЛОГИЯ:

1. Идентификация объектов, сравнимых по пространственным масштабам с длинными волнами Россби (не меньше 500-1000 км), решалась с учетом различных характеристик режима температуры. При этом исходные переменные с использованием различных пороговых значений представлялись в бинарном виде. Например, индекс WSDI конвертировался в переменную $WSDI_X$, принимающую бинарные значения:

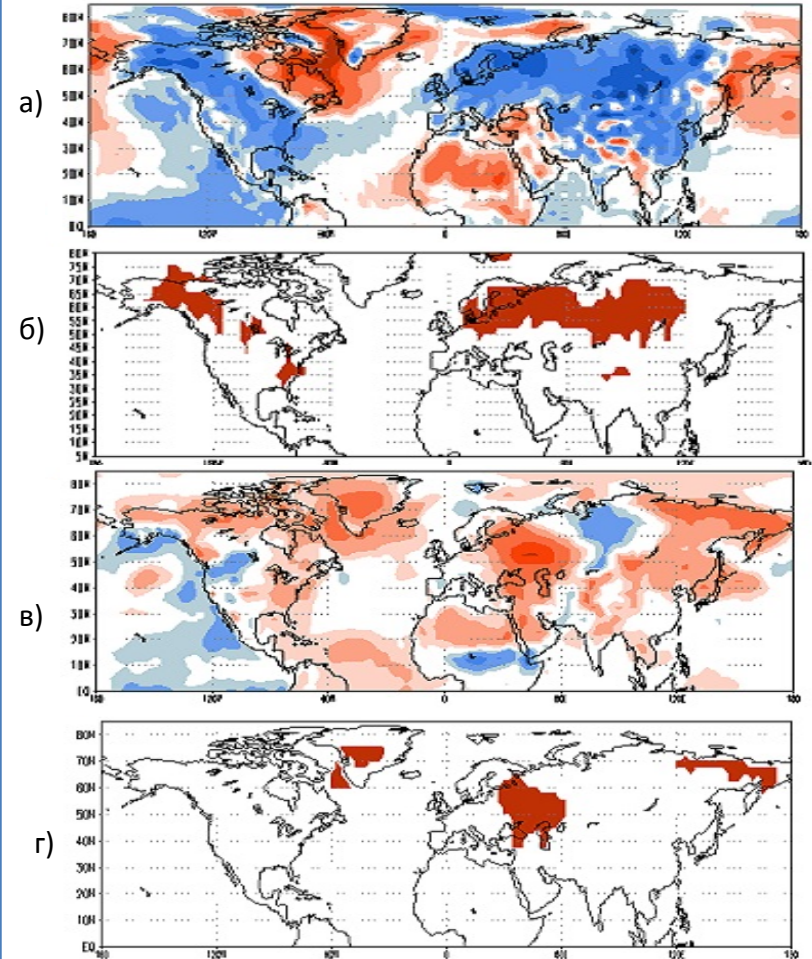
$$WSDI_X = 1, \text{ если } WSDI \geq C; \quad WSDI_X = 0 \text{ если } WSDI < C,$$

где C - пороговые значения, равные 5, 10, 15, 20 и т. д. суткам. Для аномалий температуры (АТ) воздуха выделялись объекты, ассоциируемые с различными пороговыми уровнями: $AT > 1, 2, 3, 4^\circ\text{C}$ и $AT < -1, -2, -3, -4^\circ\text{C}$. В результате автоматической идентификации в соответствии с заданными пороговыми значениями поля выбранных характеристик температурного режима (аномалий температуры воздуха, индексов WSDI и CSDI, и др.) были представлены в виде объектов, характеризующихся определенными свойствами (интенсивность, продолжительность, пространственная протяженность, географическая локализация). Такое представление позволяет анализировать долгопериодную изменчивость экстремальных метеорологических явлений (ЭМЯ) с учетом занимаемой ими площади.

2. Для вычисления площади, занимаемой ЭМЯ различной интенсивности и продолжительности на поверхности земного шара, использовался известный способ вычисления площади сферического полигона по сферическому избытку.

3. Исходные данные:

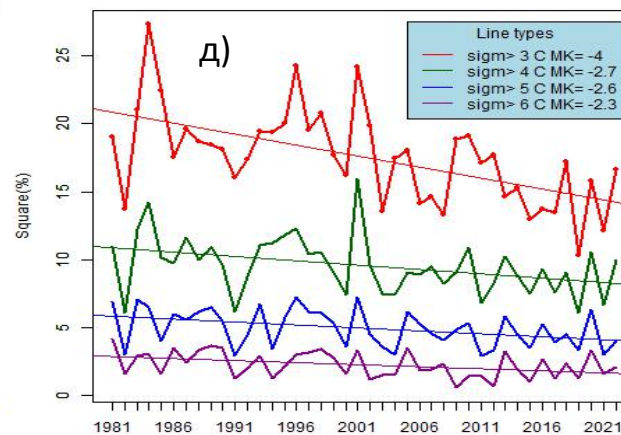
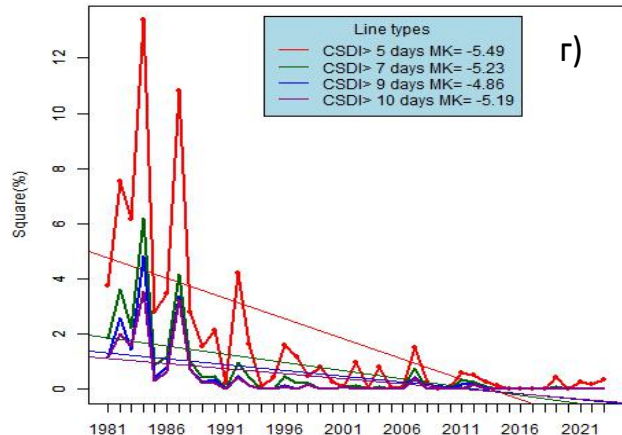
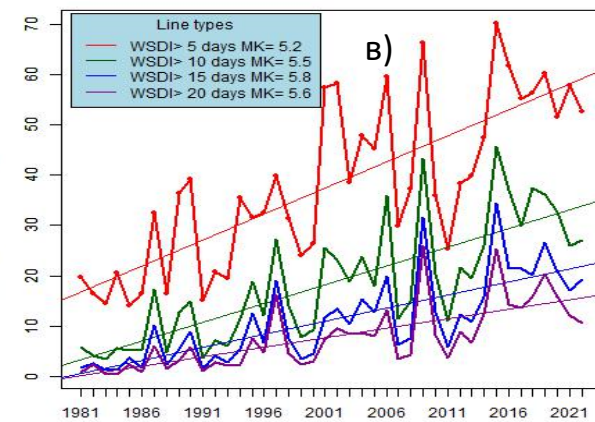
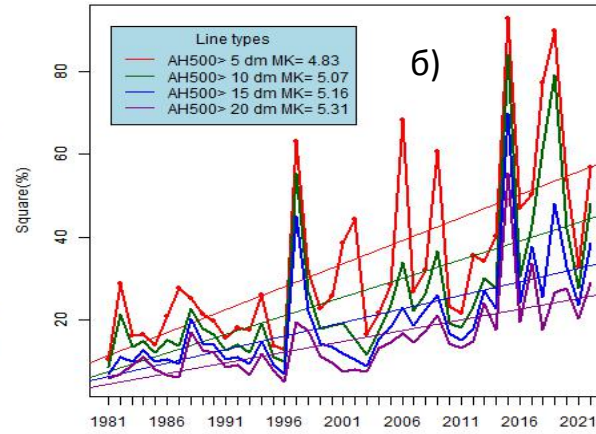
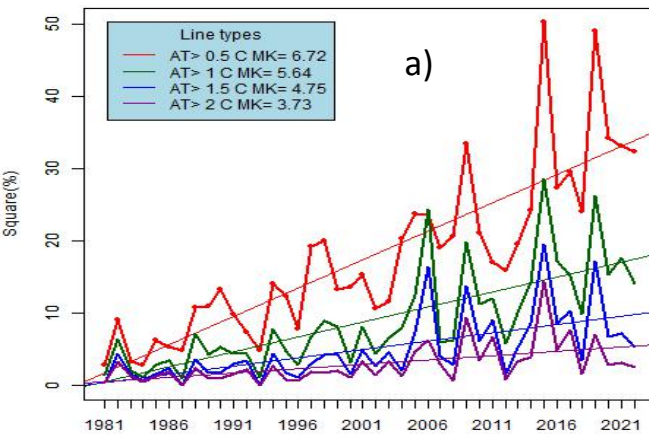
- 1) Данные о приземной температуре воздуха архива ЕЦСПП среднесуточных реанализов (ERA5) на сетке $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ на северном полушарии за летний и зимний периоды с 1981 по 2023 гг.
- 2) Производные, модифицированные для среднесуточных данных, архивы индексов волн тепла WSDI (волн холода CSDI) (табл. 1), получивших широкое распространение при оценках степени экстремальности климата.
- 3) Для характеристики внутрисезонной изменчивости режимов температуры на основе суточных данных рассчитывались значения среднего квадратического отклонения и его аномалии для рассматриваемого сезона. В качестве базового принимался период 1991 - 2020 гг.



Карты пространственного распределения аномалий температуры воздуха а) зимой 2010-2011 гг. и в) летом 2010 г. Области (выделены красным цветом: б), занятые отрицательными аномалиями температуры воздуха $< -2^\circ\text{C}$ зимой 2010-2011 гг. и г) положительными аномалиями $> 2^\circ\text{C}$ летом 2010 г.

Долгопериодная крупномасштабная изменчивость

Сезон: зима



Статистическая значимость полученных климатических трендов оценивалась с помощью теста Манна-Кендалла. Критическое значение критерия Манна-Кендалла (МК) при 5%-м уровне значимости равно 1.96. Если эмпирическое значение критерия МК > 1,96 (< -1.96), то нулевая гипотеза об отсутствии тренда отвергается.

Графики изменения площадей (в процентах от площади северного полушария), занятых положительными аномалиями а) температуры воздуха, б) Н-500, в) волнами тепла г) волнами холода различной суммарной продолжительности и д) аномалиями внутрисезонной изменчивости.

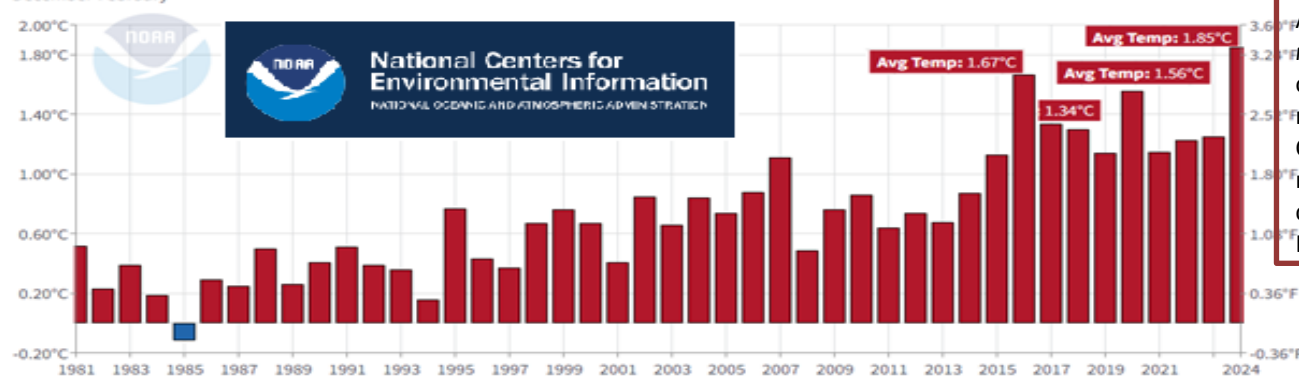
Долгопериодная крупномасштабная изменчивость

Сезон: зима

Каталог лет, ранжированных (на интервале 1981-2023 гг.) в порядке убывания площади (% от общей площади северного полушария), занимаемой аномалиями средней за сезон температуры воздуха (АТ) и H-500 (АН), волнами тепла (WSDI), волнами холода (CSDI) и областями внутрисезонной изменчивости (sigm)

АТ>3° C	АН>10 дам	WSDI>20 дней	CSDI>10 дней	sigm> 6° C
2015 (7.49 %)	2015 (96.06 %)	2009 (26.01 %)	1984 (7.61 %)	1981 (4.15 %)
2019 (5.33 %)	2019 (95.40 %)	2015 (25.21 %)	1988 (5.04 %)	1989 (3.67 %)
2017 (4.58 %)	2016 (87.06 %)	1997 (20.40 %)	1982 (3.46 %)	2005 (3.51 %)
.....			после 1994 г.	
1989 (0.00 %)	1995 (16.51 %)	1981 (0.88 %)	0.00 %	2015 (1.00 %)
1993 (0.00 %)	1996 (16.18 %)	1986 (0.74 %)	0.00 %	2012 (0.66 %)
1996 (0.00 %)	1981 (12.81 %)	1984 (0.43 %)	0.00 %	2009 (0.60 %)

Northern Hemisphere Land and Ocean Average Temperature Anomalies
December-February



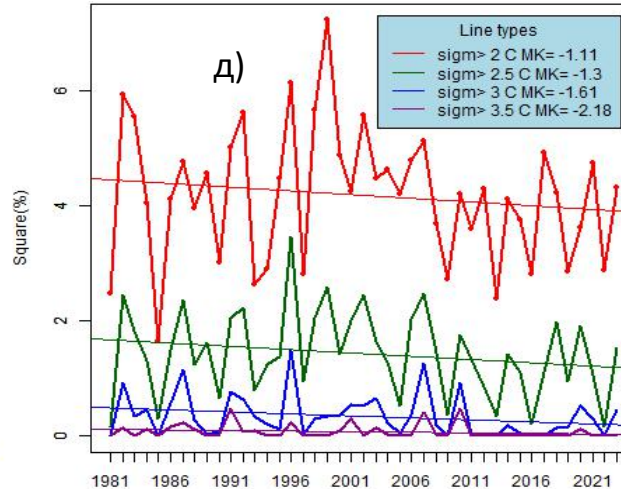
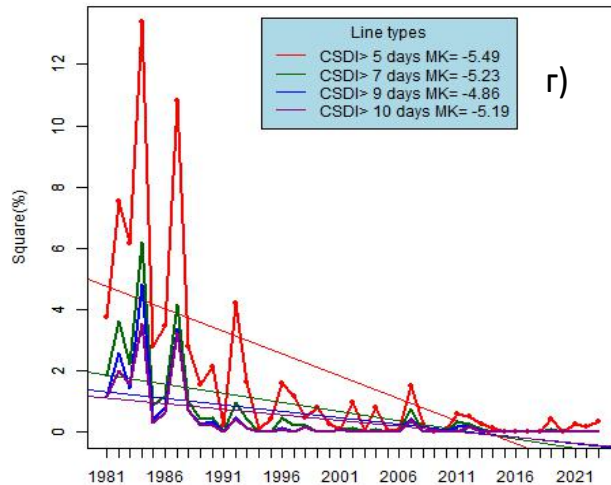
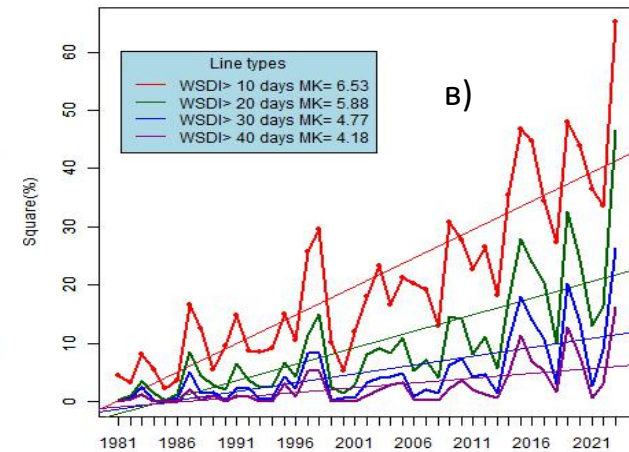
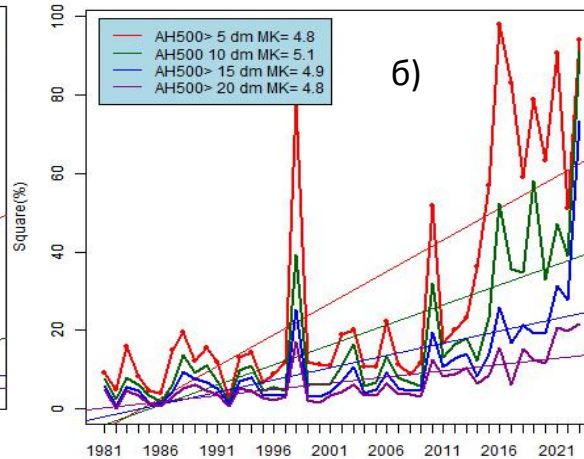
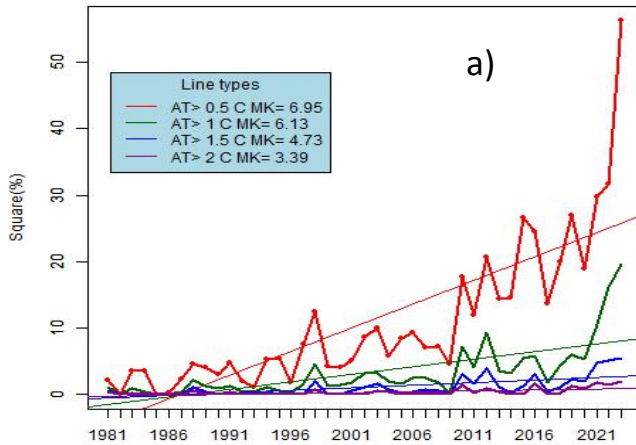
В соответствии с положительной климатической тенденцией в первую (последнюю) 10-ку аномально теплых лет входят годы, относящиеся к нынешнему (прошлomu) столетию.

В целом по северному полушарию самыми теплыми с точки зрения занимаемой положительными аномалиями площади стали зимние сезоны 2015-2016 гг., 2019-2020 гг. и 2017-2018 гг. По данным NOAA NCER, именно эти сезоны характеризуются рекордными (более чем за 140-летнюю историю наблюдений) аномалиями в целом по северному полушарию (1.67°C, 1.56°C и 1.30°C), уступая лишь зимнему сезону 2023-2024 гг. (аномалии 1.85 °C). В изменениях площади объектов, ассоциированных с волнами тепла, проявилось влияние термического состояния океана, - экстремальные зимние сезоны 1997-1998 гг., 2009-2010 гг., 2015-2016 гг., совпали с эпизодами явления Эль-Ниньо.

Аномально холодные зимние сезоны в масштабах всего северного полушария отмечались преимущественно в 80-х годах прошлого столетия. Сезоны с наибольшей (наименьшей) изменчивостью температуры воздуха соответствовали явлениям Ла-Нинья (Эль-Ниньо).

Долгопериодная крупномасштабная изменчивость

Сезон: лето



Статистическая значимость полученных климатических трендов оценивалась с помощью теста Манна-Кендалла. Критическое значение критерия Манна-Кендалла (МК) при 5%-м уровне значимости равно 1.96. Если эмпирическое значение критерия МК > 1.96, то нулевая гипотеза об отсутствии тренда отвергается.

Графики изменения площадей (в процентах от площади северного полушария), занятых а) положительными аномалиями температуры воздуха, б) N-500, в) волнами тепла г) волнами холода различной суммарной продолжительности и д) аномалиями внутрисезонной изменчивости.

Долгопериодная крупномасштабная изменчивость

Сезон: лето

Каталог лет, ранжированных (на интервале 1981-2023 гг.) в порядке убывания площади (в % от общей площади северного полушария), занимаемой аномалиями средней за сезон температуры воздуха (AT) и H-500 (AH), волнами тепла (WSDI), волнами холода (CSDI) и областями внутрисезонной изменчивости (sigm)

AT>1° C	AH>20 дам	WSDI>40 дней	CSDI>10 дней	sigm> 3° C
2023 (19.60 %)	2023 (21.62 %)	2023 (16.19 %)	1984 (3.54 %)	1996 (1.49 %)
2022 (16.08 %)	2021 (20.67 %)	2019 (12.75 %)	1988 (3.24 %)	1987 (1.15 %)
2021 (10.50 %)	2022 (19.86 %)	2015 (11.37 %)	1982 (2.01 %)	1982 (0.92 %)
.....			...после 1999 г.	
1986 (0.05 %)	1986 (0.81 %)	1993 (0.00 %)	0.00 %	2016 (0.01 %)
1985 (0.01 %)	1992 (0.58 %)	1999 (0.00 %)	0.00 %	2017 (0.01 %)
1982 (0.01 %)	1982 (0.00 %)	2001 (0.00 %)	0.00 %	2022 (0.00 %)

В соответствии с положительной климатической тенденцией в первую (последнюю) 10-ку аномально теплых лет входят годы, относящиеся к нынешнему (прошлomu) столетию.

В целом по северному полушарию самыми теплыми с точки зрения занимаемой положительными аномалиями площади стали летние сезоны 2023, 2022 и 2021 гг. По данным NOAA NCEP, именно эти сезоны характеризуются рекордными (более чем за 140-летнюю историю наблюдений) аномалиями в целом по северному полушарию (1.45°C, 1.17°C и 1.14°C), уступая лишь летнему сезону 2024 гг. (аномалии 1.51°C).

В изменениях площади объектов, ассоциированных с волнами тепла, как и в зимний период, проявилось влияние термического состояния океана, - экстремальные летние сезоны 2023, 2019 и 2015 гг., совпали с эпизодами явления Эль-Ниньо.

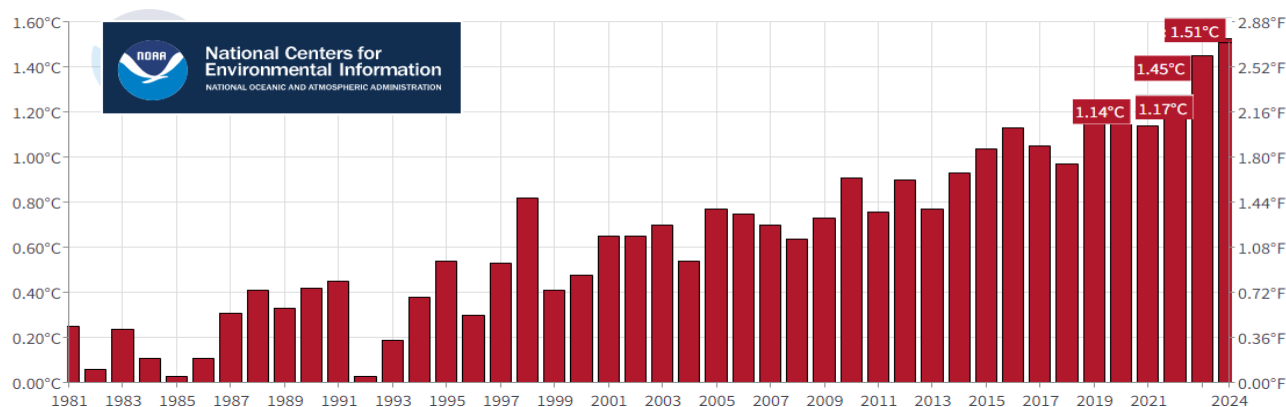
Аномально холодные летние сезоны в масштабах всего северного полушария отмечались преимущественно в 80-х годах прошлого столетия.

Внутрисезонная изменчивость, как и следовало ожидать, в летний период значительно уступает зимней.

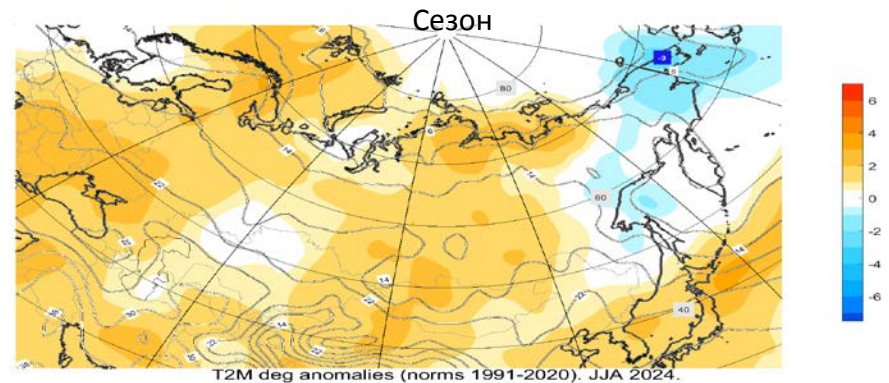
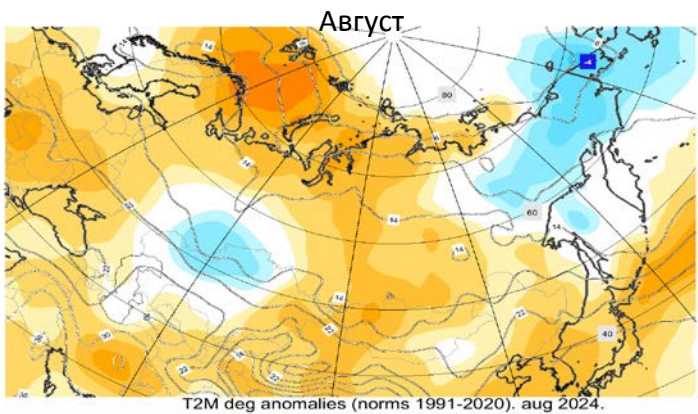
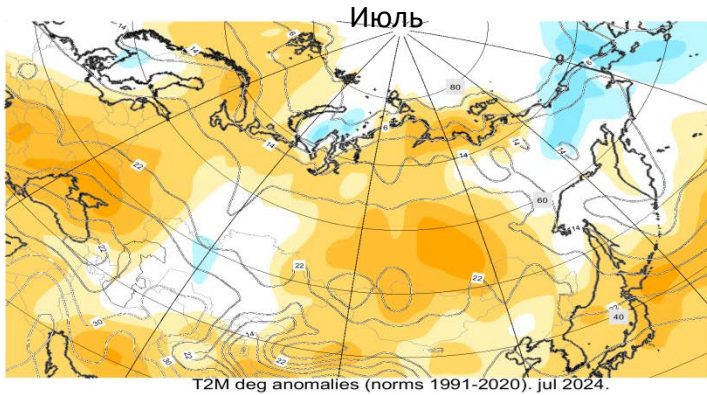
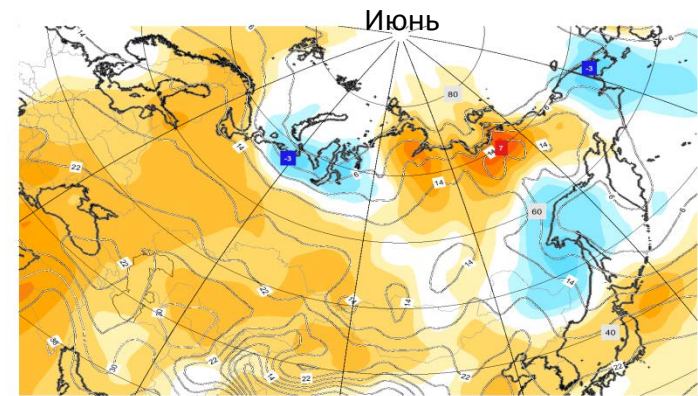
Минимальная изменчивость температурного режима отмечалась летом 2016, 2017 и 2022 гг.

Northern Hemisphere Land and Ocean Average Temperature Anomalies

June-August



Лето 2024 по данным наблюдений



Территория	Средняя температура за сезон в °C	Ранг		Аномалия
		Текущий год	1-й в ряду	
Северное полушарие	23,7	1		0,7
Европа	21,5	1		1,5
Россия	16,5	1 (2016,2021)		0,9
ЕТР	19,3	4	2010	1,5
АЧР	15,7	3	2023	0,7
Федеральные округа:				
Центральный	20,9	4	2010	1,8
Северо-западный	15,5	3-6 (с 2016, 1972, 2013)	2022	1,7
Приволжский	19,8	12	2010	0,8
Северо-Кавказский	26,7	2	2010	2,3
Южный	25,7	2	2010	2,1
Уральский	14,8	15-17 (с 2000 и 1923)	2016	0,6
Сибирский	18,7	1		1,6
Дальневосточный:				
север	12,9	18	2023	0,1
юг	16,2	22-26 (с 1950, 1988, 2005, 2006)	2021	0

Лето 2024: волны тепла на территории России Июнь

Северо-запад ЕТР

В период с 28.05 по 3.06 **аномально жаркая погода** со среднесуточной температурой воздуха выше климатической нормы: в г. Санкт-Петербург на **7-9°**, в Ленинградской области и на юге Республики Карелия на **7-10°**, в Новгородской и Псковской областях на **7-8°**.

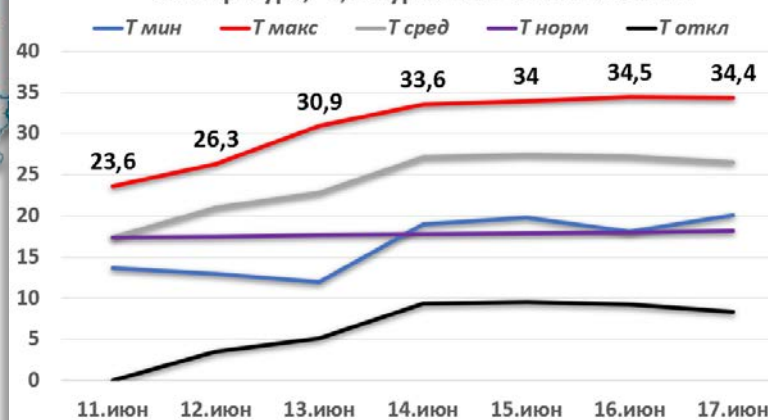
Сибирь

Жаркая погода с максимальной температурой воздуха: **13-17.06** местами в Новосибирской и Томской областях **30...33°**; **14-16.06** в центральных, южных районах Красноярского края, в республиках Хакасия и Тыва **33...34°**.

Урал

12-16.06 в Пермском крае и Свердловской и Челябинской областях **аномально жаркая погода** со среднесуточной температурой воздуха выше климатической нормы на **7-12°**, в Курганской области с максимальной температурой воздуха **34...35°**.

Температура, °С, в Кургане 11-17 июня 2024 г.



Лето 2024: волны тепла на территории России Июль

Северо-восток Европейской России

3-10.07 в Республике Коми **аномально жаркая погода** со среднесуточной температурой воздуха выше климатической нормы на **7-10°**.

Центр ЕТР

В первой половине июля **сильная жара** с максимальной температурой воздуха: в г. Москве до **33.5°**, в Воронежской области **35.1...37.6°**, в Курской, в Белгородской, в Воронежской, в Липецкой и Тамбовской областях до **35.0...37.5°**, **14-18.07** в Белгородской области **аномально жаркая погода** со среднесуточной температурой воздуха **28...29°**, что выше климатической нормы на **7-8°**.

Ущерб: количество обратившихся по поводу теплового перегрева превышало средние показатели теплого периода, в Белгородской области отмечалось снижение урожайности озимых культур и ярового ячменя, плохое формирование бобов на растениях сои.

Поволжье

Сильная жара: **2-6.07** в Нижегородской, Кировской областях, республиках Мордовия, Чувашия и Марий Эл местами **35...36°**, **3.07** в Республике Мордовия **35.0°**. **4-8.07** в Удмуртской Республике **аномально жаркая погода** со среднесуточной температурой воздуха выше климатической нормы на **7-11°**.

Юг ЕТР

5-9.07 на большей части Краснодарского края **39.1...40.6°**, на Черноморском побережье до **39.5°**; в Астраханской области до **40.3...41.5°**; в Запорожской области и в Луганской Народной Республике до **40.3°**.

Сильная жара с максимальной температурой воздуха: в Краснодарском крае **11-19.07** до **39.0...40.0°**; в Запорожской области до **41.6°**, в Калмыкии до **42.0...42.5°**.

15-19.07 в Республике Крым по данным АМЦ Симферополь **аномально жаркая погода** со среднесуточной температурой воздуха **27.1...30.7°**, что выше климатической нормы на **7-10°**. Ущерб: в связи с большой нагрузкой энергетических сетей в отдельных районах Крыма происходили временные отключения электроэнергии.

Лето 2024: волны тепла на территории России Август

Центр ЕТР

Во второй половине августа жаркая погода **20-22.08** в Воронежской, Белгородской и Курской с максимальной температурой воздуха **35.0...36.8**,

Сибирь

Сильная жара с максимальной температурой воздуха: **15-16.08** в южных районах Красноярского края **35.0...37.2°**; **16.08** в Республике Хакасия, **16-18.08** в Республике Тыва **35.0...37.6°**. Ущерб: отмечалась активизация лесных пожаров в Республике Тыва.

Юг ЕТР

Во второй половине августа жаркая погода **21.08** на Черноморском побережье Краснодарского края до **37.3°**, в Ставропольском крае до **38.8°**. **21-25.08** в Республике Крым по аномально-жаркая погода с максимальной температурой воздуха выше климатической нормы на 7.0-7.9° (среднесуточная температура **26.3...26.8°**). Ущерб: в связи с большой нагрузкой энергетических сетей в отдельных районах Крыма происходили аварийные отключения электроэнергии.



Лето 2024: волны тепла на территории России Сентябрь

Северо-запад ЕТР

13-17.09 в Ленинградской и Новгородской областях, в Республике Карелия и г. Санкт-Петербург аномально жаркая погода со среднесуточной температурой воздуха **16...22°**, что **выше климатической нормы** в Ленинградской и Новгородской областях на **7-9°**, в Республике Карелия на **7-11°**.

Поволжья

10-18.09 в Нижегородской и Кировской областях, республиках Мордовия и Марий-Эл, Чувашской Республике аномально жаркая погода со среднесуточной температурой воздуха **выше климатической нормы на 7-10°** (норма 9...14°).

Центр ЕТР

1.09 на территории г. Москва **сильная жара** с максимальной температурой воздуха: на мс Балчуг **30.3°**, АМСГ Внуково **30.2°**, амс Строгино **30.1°**.
12-18.09 в Калужской, **12-16.09** в Тульской, Рязанской и Костромской областях аномально жаркая погода со среднесуточной температурой воздуха **выше климатической нормы на 7-10°**.

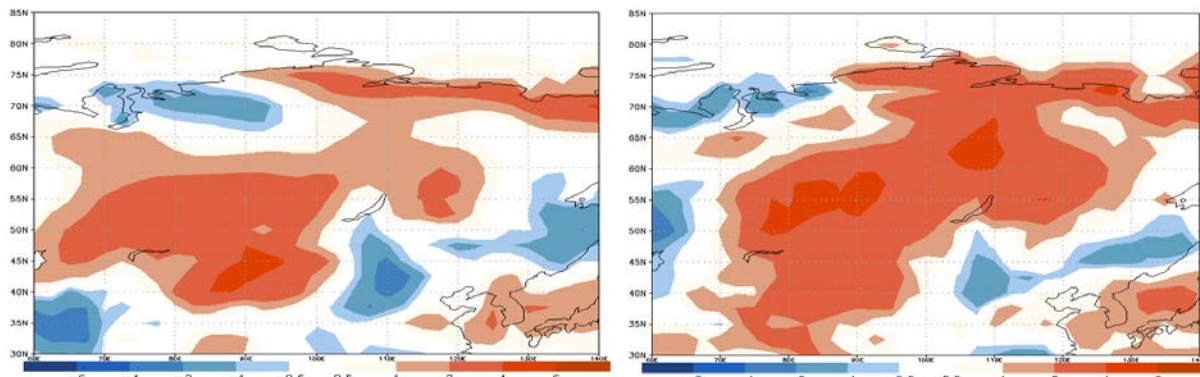
Юг ЕТР

Днем 11.09 в Краснодарском крае **сильная жара** с максимальной температурой воздуха: на черноморском побережье по данным ГМБ Туапсе **38.8°**, на территории г. Сочи по данным амс Кичмай **39.1°**, по данным амс Лазаревская **38.5°**.

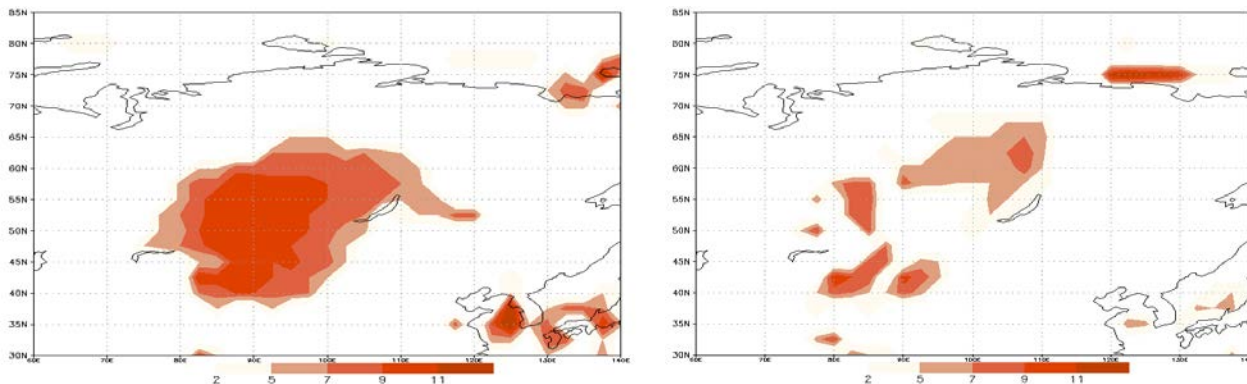


Лето 2024: волны тепла на территории России

Сибирский федеральный округ



Осредненные за 14 дней (21 июня-5 июля) аномалии температуры воздуха (слева - прогноз, начальная дата прогноза 20 июня 2024 г., справа - реанализ ЕЦСПП (ERA5))

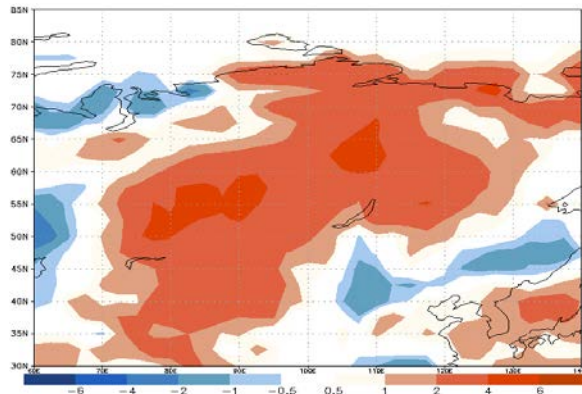
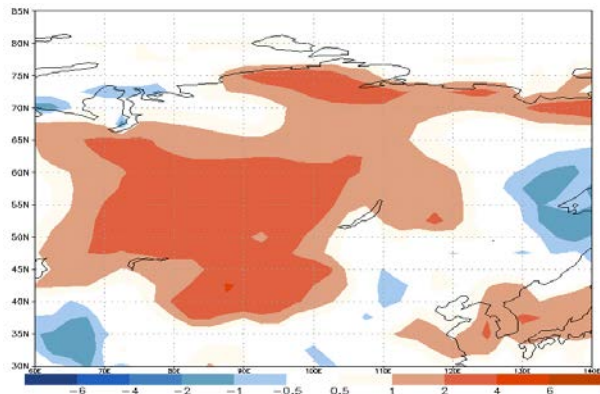


Волны тепла (продолжительность в днях, слева – прогноз на 14 дней, начальная дата прогноза 20 июня 2024 г., справа - реанализ ЕЦСПП (ERA5))

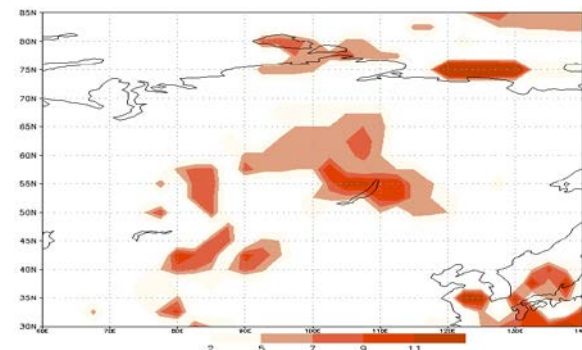
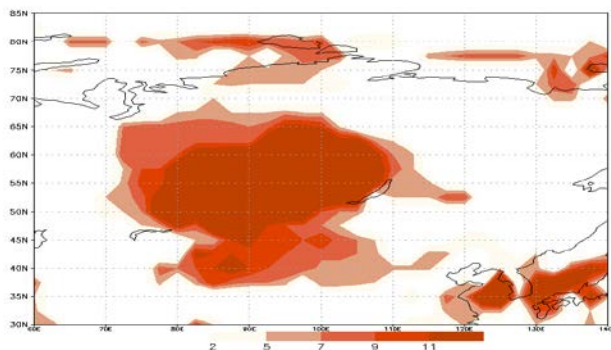
По данным Гидрометцентра России: Во второй половине июня и в начале июля 2024 г. в южных и центральных районах Сибири наблюдалась аномально жаркая погода. В период 21 июня -2 июля на большей части территории Томской, Новосибирской, Кемеровской областей, Алтайского края и Республики Алтай максимальная температура воздуха достигала 30...37°, на 3-х метеостанциях Алтайского края в течение 4 дней 35...40°, в центральных, южных районах и Эвенкийском муниципальном районе Красноярского края 35...38°, 29.06-2.07 в Иркутской области 35...39°. Ущерб: из-за сильной жары увеличилось число очагов лесных пожаров.

Лето 2024: волны тепла на территории России

Сибирский федеральный округ



Осредненные за 21 день (21 июня-11 июля) аномалии температуры (слева - прогноз, начальная дата прогноза 20 июня 2024 г., справа - реанализ ЕЦСПП (ERA5) воздуха



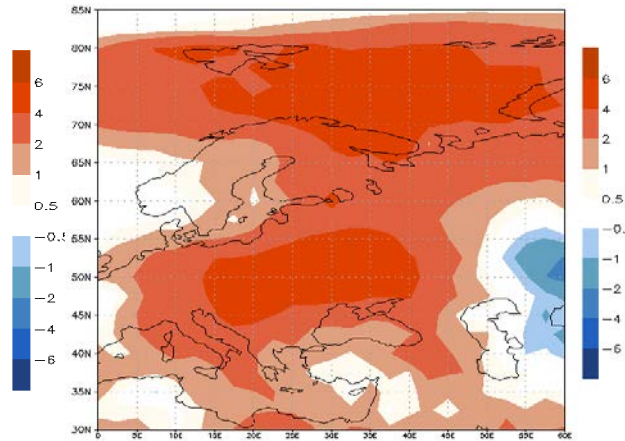
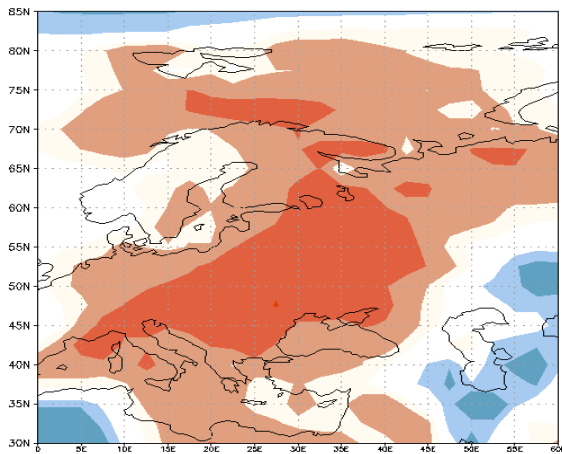
Волны тепла (продолжительность в днях, слева – прогноз на 21 день, начальная дата прогноза 20 июня 2024 г., справа - реанализ ЕЦСПП (ERA5))

По данным Гидрометцентра России: атмосферные процессы в течение рассматриваемого периода не отличались устойчивостью. Июль в Западной Сибири начался с ослабления жары, увеличения грозовой деятельности и осадков. Жаркая погода под влиянием выноса теплых воздушных масс с юга в первых числах июля отмечалась лишь в отдельных районах Восточной Сибири, а волны тепла постепенно сместились на восток, - в период с 1-6 июля в Республике Бурятия и Забайкальском крае наблюдалась сильная жара с максимальной температурой воздуха 35...39°.

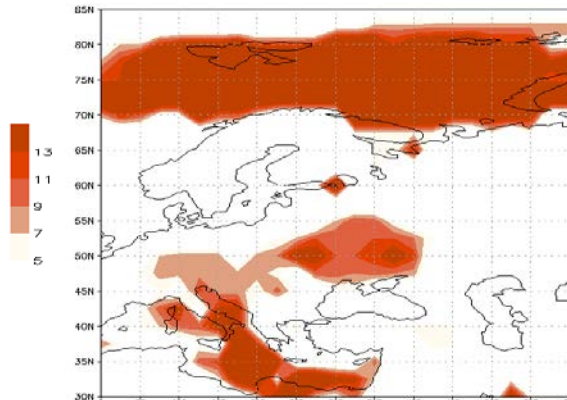
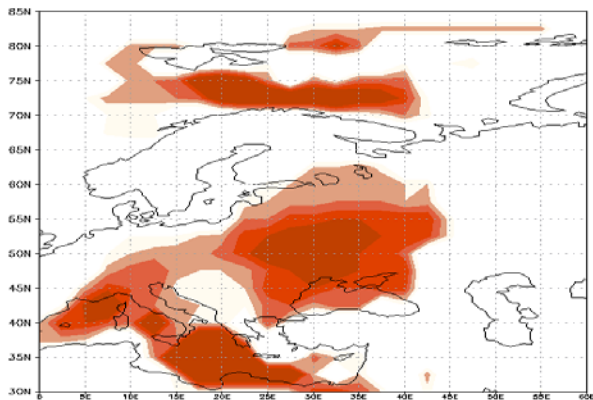
По промежуточным подсчётам, лесные пожары на территории Сибирского федерального округа в 2024 году нанесли ущерб в 1,2 млрд рублей, а их общая площадь составила 315 тыс. га. Это превышает прошлогодние показатели в три раза, сообщает ТАСС.

Лето 2024: волны тепла на территории России

(Европейская Россия)



Осредненные за 21 день (16 -29 августа) аномалии температуры воздуха , слева - прогноз, начальная дата прогноза 15 августа 2024 г., справа - реанализ ЕЦСПП (ERA5)

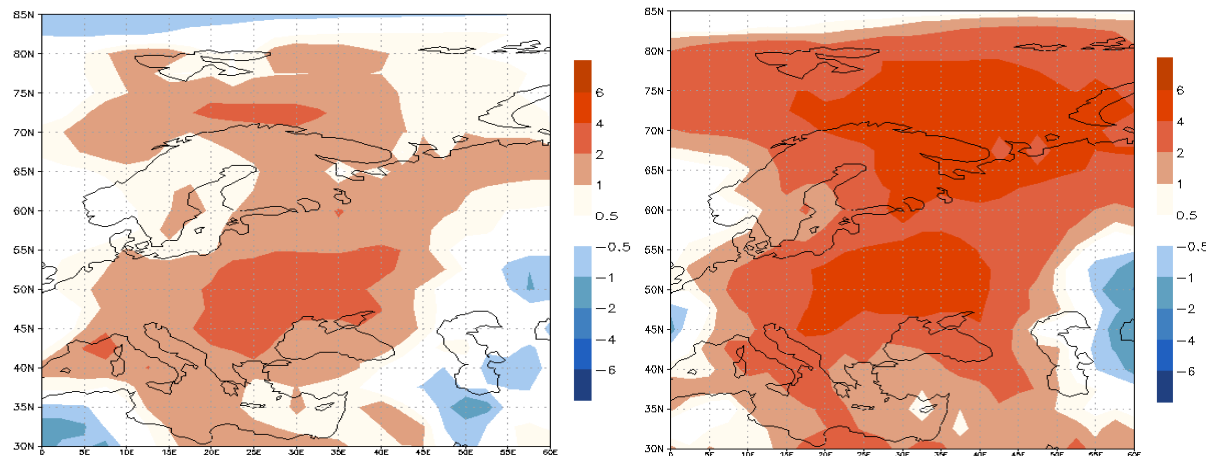


Волны тепла (продолжительность в днях, слева – прогноз на 21 день, начальная дата прогноза 15 августа 2024 г., справа - реанализ ЕЦСПП (ERA5))

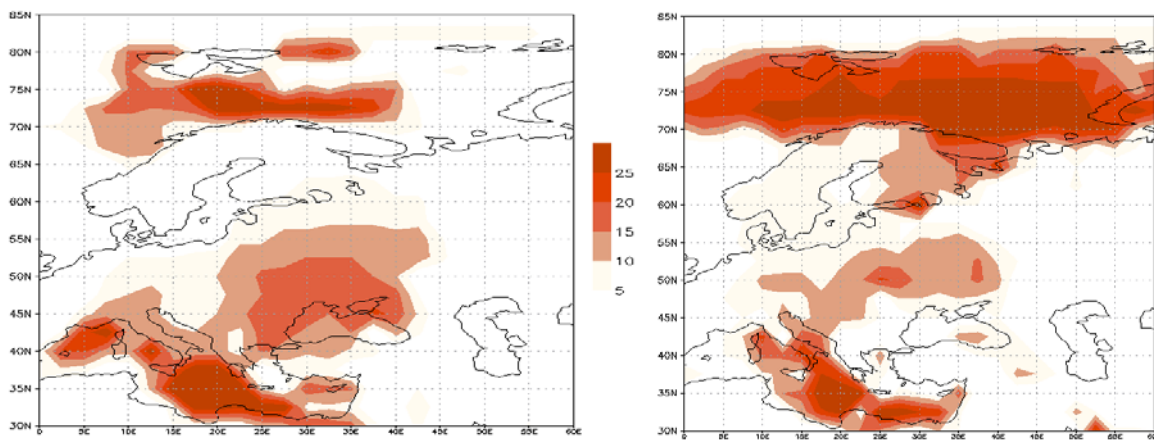
На большей части европейской территории России, начиная со второй половины августа, установилась аномально жаркая погода. Антициклон, смещаясь с юга на север, постепенно распространил свое влияние на огромную территорию вплоть до акватории Баренцева моря. В Центральной России и на севере месячные аномалии достигли 4°...6° и более. В центре России, в Черноземье, Краснодарском крае, Крыму, а также в Ленинградской, Псковской обл. и Республике Карелия регистрировались новые суточные максимумы температуры. Днем температура повышалась: на севере и северо-западе 20...25°, в центре - до 23...28°, в Черноземье - до +31...+36°, а в южных регионах - до +39°. В условиях преобладания антициклональной погоды местами наблюдалась атмосферная засуха средней и сильной интенсивности, в Оренбургской, Пензенской, Самарской, Саратовской, Ульяновской областях, Марий-Эл и Мордовии, Белгородской, Воронежской, Курской, Липецкой, Орловской и Тамбовской областях, а также в Ростовской и Волгоградской областях наблюдалась почвенная засуха.



Лето 2024: волны тепла на территории России (Европейская Россия)



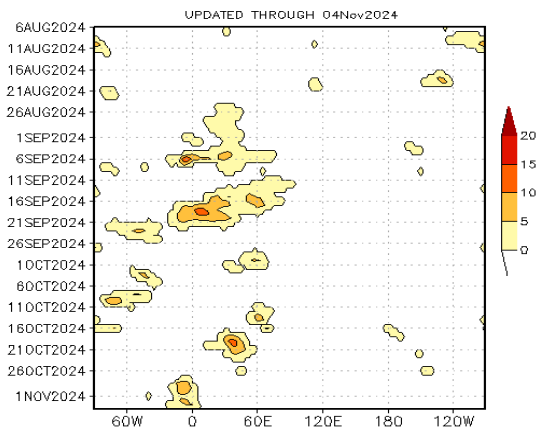
Осредненные за 30 дней (16 августа -14 сентября) аномалии температуры воздуха, слева - прогноз, начальная дата прогноза 15 августа 2024 г., справа - реанализ ЕЦСПП (ERA5)



Волны тепла (продолжительность в днях, слева – прогноз на 30 дней, начальная дата прогноза 15 августа 2024 г., справа - реанализ ЕЦСПП (ERA5))

В августе – сентября аномалии температурного режима на территории Европы сформировались на фоне квазиустойчивых атмосферных режимов типа блокирования. По данным СРС, в сентябре значения индексов NAO и АО составили соответственно -1.43 и -0.62. Другая интересная особенность августа – сентября - пониженная активность циркумполярного вихря, что также свидетельствует о возрастании степени меридиональности атмосферной циркуляции. Устойчивость режимов атмосферной циркуляции позволила расширить интервал практической предсказуемости волн тепла до месяца.

Индекс блокирования GHGS



Верификация прогнозов

МЕТОДОЛОГИЯ

Верификация экстремальных явлений является не менее трудной задачей, чем их моделирование и прогноз. Недостатком «точечных» критериев, основанных на сравнении прогнозов и наблюдений «точка в точку», является эффект «двойного штрафа», обусловленный возможными небольшими сдвигами прогнозов и наблюдений относительно друг друга как в пространстве, так и во времени [Киктев и др. Методические рекомендации]. Один из возможных подходов к решению данной проблемы связан с использованием методов пространственной верификации. Остановимся более подробным образом на одном из методов пространственной верификации, а именно: методе окрестностей и оценке FSS (Fraction Skill Score), которую в дальнейшем, следуя [Муравьев и др., 2018], будем называть «критерием пространственных долей». Подробное описание данной категории методов дается [Ebert, 2009; Gilleland et al., 2009; Gilleland et al., 2010; ForVer, 2012; Roberts and Lean, 2008; Зарипов и др. 2018]. Хотя при использовании методов пространственной верификации точность и строгость в определении оценок качества прогнозов теряются, они могут оказаться весьма полезными при сравнении эффективности рассмотренных ранее расчетных методов и определении пространственных масштабов сетки, для которых прогноз считается полезным.

Метод окрестностей предполагает разбиение рассматриваемого региона (исходной области) на ряд подобластей (окрестностей), каждая из которых представляет собой центрированную группу ячеек сетки. В основе FSS лежит модифицированный критерий Брайера (Brier skill score или Fractions Brier Score, FBS), который для i -группы ячеек сетки (i -го окна или подобласти) представляется следующим образом:

$$FBS = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} (P_{F(i)} - P_{O(i)})^2$$

где $P_{F(i)}$ и $P_{O(i)}$ - соответственно прогностическая и наблюденная частота ячеек в пределах данного i -го окна (или выбранной подобласти N_w верификации). FBS принимает значения от 0 (в случае идеального прогноза) до максимально возможного для наихудшего прогноза FBS_{worst}

Оценка FSS строится путем сравнения FBS с эталоном FBS_{worst}

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{FBS_{worst}}$$

Уровень полезного прогноза [Roberts and Lean 2008]: $FSS_{useful} = 0.5 + \frac{f_0}{2}$
 f_0 - наблюденная частота явления

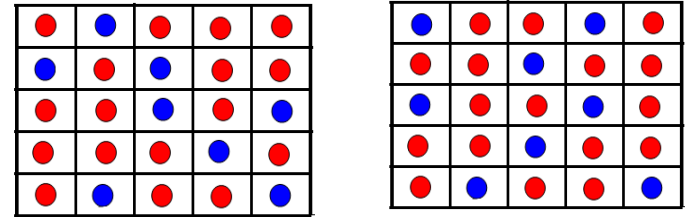


Схема выделения подобластей (или окон) для расчета параметра FSS на примере окна 3 для 5x5 узлов сетки. Красным цветом выделены ячейки, в которых событие наблюдалось (а)/прогнозировалось (б), синим цветом - ячейки, в которых событие не наблюдалось (а)/не прогнозировалось (б)

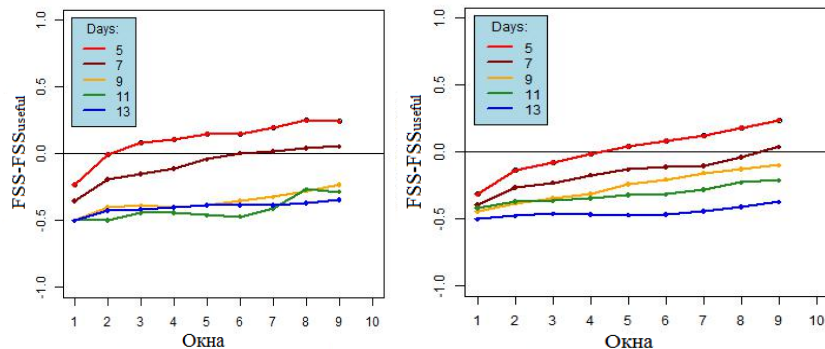
FSS изменяется от 0 (в случае не оправдавшегося прогноза) до 1 (в случае идеального прогноза). При расчетах FSS выбираются неперекрывающиеся прямоугольные подобласти. Размер рассматриваемой окрестности возрастает от 1x1 (окно 1), 3x3 (окно 2) узлов сетки и далее – до наибольшего размера, допустимого для данной области расчетов. Окно 1 соответствует поточечному сравнению прогнозов и наблюдений в пределах всего выбранного региона. При шаге сетки 2.5°x2.5° длина окна 2 составляет 5° (примерно 555 км), окна 3 - 10° (примерно 1100 км) и т. д.

Верификация прогнозов

Оценки качества ретроспективных прогнозов

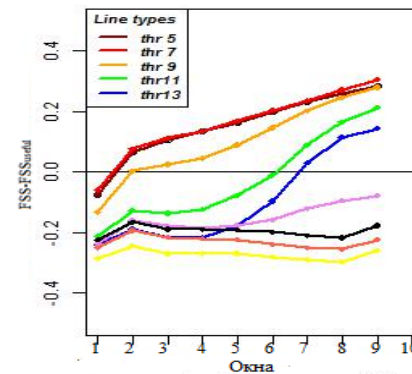
(1991-2015 гг.)

Исходная информация. Для расчета индексов волн тепла (WSDI) и холода (CSDI) использовались глобальные поля на сетке $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ретроспективных прогнозов приземной средней суточной температуры воздуха, стартовавшие от различных начальных дат летнего и зимнего сезонов, за период с 1991 по 2015 гг. на интервале интегрирования 46 суток новой версии модели ПЛАВ072L96. Для выбранных дат были созданы необходимые для верификации прогнозов соответствующие эталонные архивы полей приземной средней суточной температуры с использованием реанализов ЕЦСПП (ERA-5) с суточным разрешением на сетке $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. На базе данных архивов были выполнены соответствующие расчеты и сформирован унифицированный набор прогнозов (средних по ансамблю) и реанализов индексов волн тепла (WSDI) и холода (CSDI) на интервалах интегрирования 14, 21 и 30 суток. При расчетах выборки по всем точкам, расположенным на территории Северной Евразии (30° - 85° с.ш. и 0° - 140° в.д., 1311 узлов сетки), сливались в один ансамбль, для которого проводился расчет всех основных характеристик качества прогнозов.

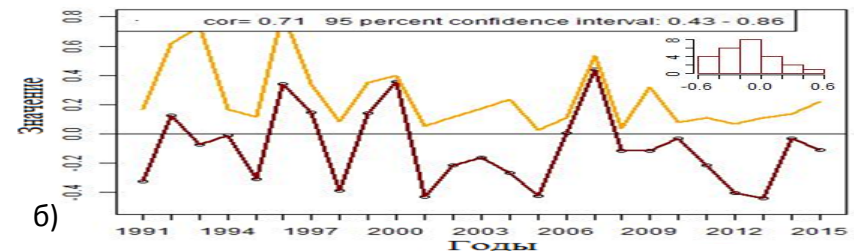
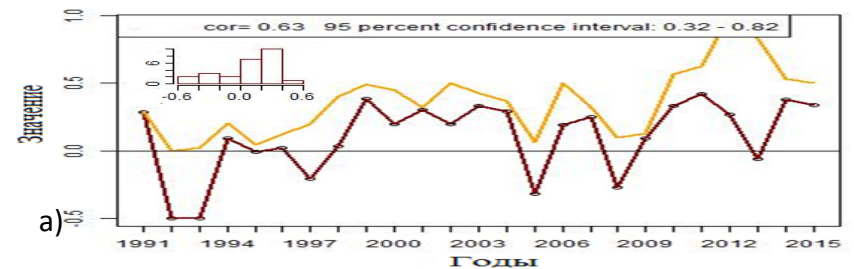


Отклонения медианы распределения параметра FSS от уровня полезного прогноза ($FSS - FSS_{\text{useful}}$), полученные на базе ретроспективных прогнозов (1991-2015 гг.) модели ПЛАВ на интервале интегрирования 14 (слева) и 30 (справа) дней в зависимости от продолжительности волн тепла и размера окрестности на территории Северной Евразии

Анализ конкретных случаев



Отклонения параметра FSS от уровня полезного прогноза ($FSS - FSS_{\text{useful}}$), полученные на базе прогнозов волн тепла модели ПЛАВ в режиме реального времени на интервале интегрирования 21 день (начальная дата прогноза 15 августа 2024 г.)

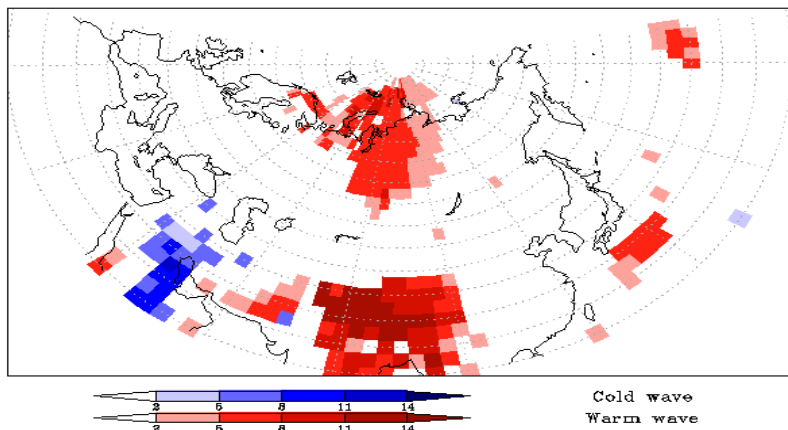


Изменения параметра $FSS - FSS_{\text{useful}}$ и $10 \cdot f_0$ - наблюдаемой частоты явления в пределах всей рассматриваемой области для волн тепла (а) и волн холода (б) (начальная дата прогноза 11 июля, интервал интегрирования 14 дней)

Прогнозы экстремальных явлений на сайте СЕАКЦ (<https://seakc.meteoinfo.ru/ru/>)

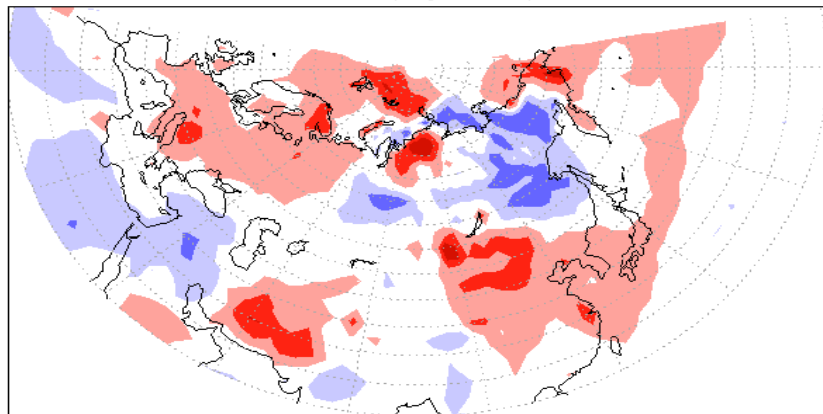
Модель ПЛАВ (интервал интегрирования 14 дней)

Duration (days) of cold ($P < 10\%$) and warm ($P > 90\%$) waves
HMC forecast for 14 days started on: 20241024



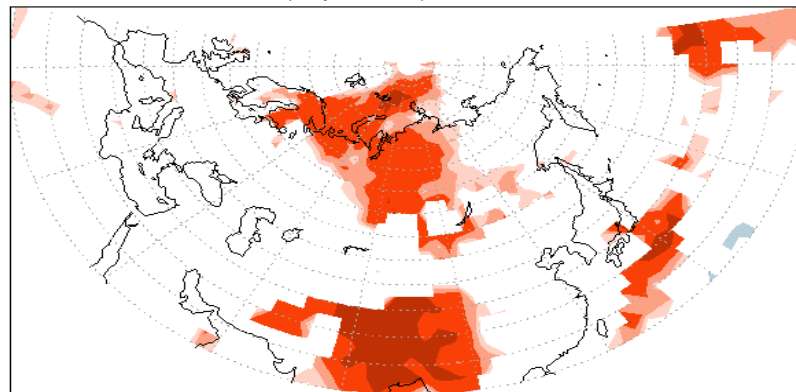
Продолжительность волн тепла и холода (в днях)

Standard Deviation (day 1–14) 20241024



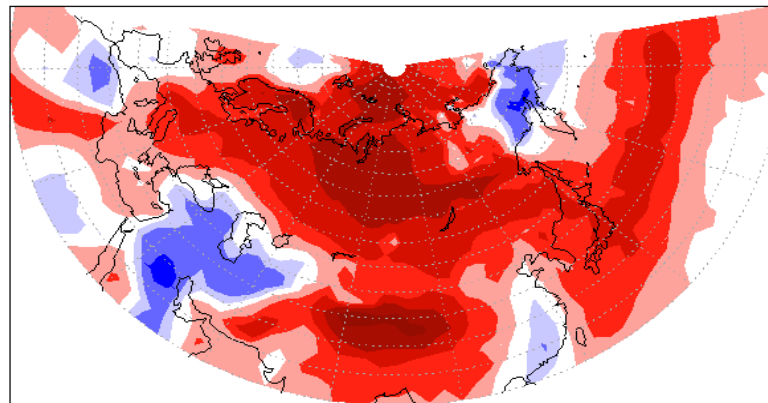
Аномалии изменчивости температуры воздуха

EFI (day 1–14) 20241024



Индекс экстремальности EFI

Mean anomaly t2m, model SLAV (n=14) 20241024



Осредненные за 14 дней аномалии температуры воздуха

Выводы

Многоаспектный характер воздействий волн тепла и холода порождает обилие различных определений и специфических (ориентированных на различные сферы жизни общества) числовых показателей. Отсутствие единого подхода к определению волн тепла и холода создает дополнительные трудности при проведении диагностических исследований и сравнении качества результатов гидродинамического моделирования.

Одним из проявлений глобального потепления климата является увеличение площади, занятой положительными аномалиями температуры воздуха и волнами тепла различной продолжительности в Северном полушарии. Положительные тенденции хорошо выражены не только вблизи земной поверхности, но и в средней тропосфере (на уровне поверхности 500 гПа).

В отличие от волн тепла, площадь, занятая волнами холода, уменьшается, - последние десятилетия (после 1994) крупномасштабные долгоживущие структуры, связанные с волнами холода, в пределах северного полушария практически отсутствовали.

Характерной особенностью, прежде всего зимнего периода, является уменьшение внутрисезонной изменчивости температурного режима на фоне значительной межгодовой изменчивости. В то же время для межгодовой изменчивости статистически значимых тенденций не обнаружено.

Результаты пространственной верификации ретроспективных прогнозов, полученных на базе новой версии модели ПЛАВ072L92, свидетельствуют о наличии полезного сигнала для волн тепла (холода) на интервале интегрирования 14 суток в летнее (зимнее) время года.

Оценки качества прогнозов волн тепла и холода сильно варьируют в зависимости от региона, сезона и устойчивости атмосферной циркуляции. В случае устойчивых атмосферных процессов (например, август – сентябрь 2024 г. на Европейской территории России) предел практической предсказуемости может быть увеличен до 30 дней, а разрешающая способность модели до 10-15 суток.

Полученные результаты могут оказаться полезными для пользователей климатической и прогностической информацией в контексте принятия решений (административных, управленческих, экономических, социальных и др.).

Спасибо за внимание!