

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-7-21>

УДК 551.515

## Волны тепла и блокирующие антициклоны летом 2021 года в прогнозах и наблюдениях

**И.А. Куликова<sup>1</sup>, Е.Н. Круглова<sup>1</sup>, К.А. Сумерова<sup>1</sup>, В.М. Хан<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова

Российской академии наук, г. Москва, Россия

*kulikova@mecom.ru, kruglova@mecom.ru, sum-ksusha@yandex.ru, khan@mecom.ru*

На основе данных реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов ERA5 о приземной температуре воздуха и геопотенциале поверхности 500 гПа с суточным разрешением рассматриваются основные особенности температурного режима и атмосферной циркуляции в Северном полушарии летом 2021 года. С использованием оперативной версии полулагранжевой модели атмосферы для долгосрочного прогноза Гидрометцентра России и Института вычислительной математики РАН (ИЛМ) определены возможности прогнозирования волн тепла и холода, а также индекса экстремальности EFI на фоне квазистойчивых режимов циркуляции типа блокирования. Показана зависимость качества прогнозов от фазы развития блокирующего антициклона (начало блокирования, зрелая фаза, разрушение блокинга). Полученные результаты могут использоваться при составлении прогнозов экстремальных метеорологических явлений на внутрисезонных масштабах времени.

*Ключевые слова:* экстремальные метеорологические явления, волны тепла и холода, блокирующие антициклоны, долгосрочные метеорологические прогнозы

## The forecasts and observations of heat waves and blocking anticyclones in the summer of 2021

**I.A. Kulikova<sup>1</sup>, E.N. Kruglova<sup>1</sup>, K.A. Sumerova<sup>1</sup>, V.M. Khan<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

<sup>2</sup> A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics

Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*kulikova@mecom.ru, kruglova@mecom.ru, sum-ksusha@yandex.ru, khan@mecom.ru*

The main features of the temperature regime and atmospheric circulation in the Northern Hemisphere in the summer of 2021 are considered based on the ERA5 reanalysis (ECMWF) of surface air temperature and 500 hPa geopotential height with a daily resolution. Using the operational version of the SL-AV semi-Lagrangian atmosphere model for long-term forecasting, the potential of forecasting heat and cold waves, as well as the Extreme Forecast Index (EFI) against a background of quasi-stable circulation modes of the blocking type are determined. The dependence of the forecast skill on the phase of development of the blocking anticyclone (initiation, mature phase, dissipation) is shown. The results can be used to make forecasts of extreme weather events on intraseasonal timescales.

*Keywords:* extreme weather events, heat and cold waves, blocking anticyclones, long-term weather forecasts

## Введение

Климат Земли никогда не отличался постоянством. Однако существуют убедительные доказательства, основанные на данных наблюдений и научных исследованиях, беспрецедентных темпов глобального потепления климата в последние десятилетия, связанные с антропогенными воздействиями. При этом каждая доля градуса при повышении температуры имеет значение и может привести к далеко идущим, а в некоторых случаях к катастрофическим последствиям. Лето 2021 года, бесспорно, внесет весомый вклад в глобальное потепление климата. По данным Национального центра прогнозов США (NCEP/NOAA) [[https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land\\_ocean/ytd/6/1880-2021](https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land_ocean/ytd/6/1880-2021)], оно стало одним из самых жарких в Северном полушарии за всю историю наблюдений начиная с 1880 г., лишь на десятую долю градуса уступив рекорду 2020 г. На территории России средняя температура лета повторила рекордное значение 2016 г., на азиатской части страны стало самым жарким, на европейской – вторым после 2010 г. Согласно новому межведомственному докладу «Единство в науке», 2021 год [<https://public.wmo.int/ru/>], концентрация парниковых газов в атмосфере продолжает оставаться на рекордном уровне, обрекая планету на опасное нагревание в будущем. Повышение глобальных температур усиливает разрушительные экстремальные погодные явления по всему миру, оказывая растущее воздействие на экономику и общество. В таких условиях исследования возможностей долгосрочного прогнозирования экстремальных метеорологических явлений (ЭМЯ) приобретают особую актуальность.

В данной статье рассматриваются основные особенности температурного режима и атмосферной циркуляции в Северном полушарии летом 2021 г. Отмечается значительное преобладание волн тепла по сравнению с волнами холода во всех регионах Северного полушария. Особое внимание уделяется режимам атмосферной циркуляции типа блокирования. С использованием оперативной версии полулагранжевой модели атмосферы для долгосрочного прогноза ПЛАВ дается оценка региональной предсказуемости волн тепла и индекса экстремальности EFI. Показана зависимость качества прогнозов от фазы развития блокирующего антициклона (начало блокирования, зрелая фаза, разрушение блокинга). Отмечается, что во всех регионах, хотя и в разной степени, прогностическая продолжительность волн тепла превосходит фактическую. Полученные результаты могут использоваться при составлении прогнозов ЭМЯ на внутрисезонных масштабах времени.

### 1. Исходные данные и методы исследования

Предсказуемость температурного режима и блокирующих антициклонов в летний период 2021 г. исследуется на основе оперативной версии полулагранжевой модели атмосферы для долгосрочного прогноза

ПЛАВ [2, 3]. В качестве характеристик температурного режима использовались индексы волн тепла WSDI и волн холода CSDI [9], а также индекс экстремальности EFI [1]. Количественными критериями блокирования служили индексы, предложенные в [8, 11]. Обзор и анализ основных недостатков и преимуществ различных индексов блокирования дается в [4]. Структура блокирующего образования характеризуется меридиональными градиентами в полях поверхности 500 гПа, которые рассчитываются для каждой долготы и для Северного полушария представляются следующим образом:

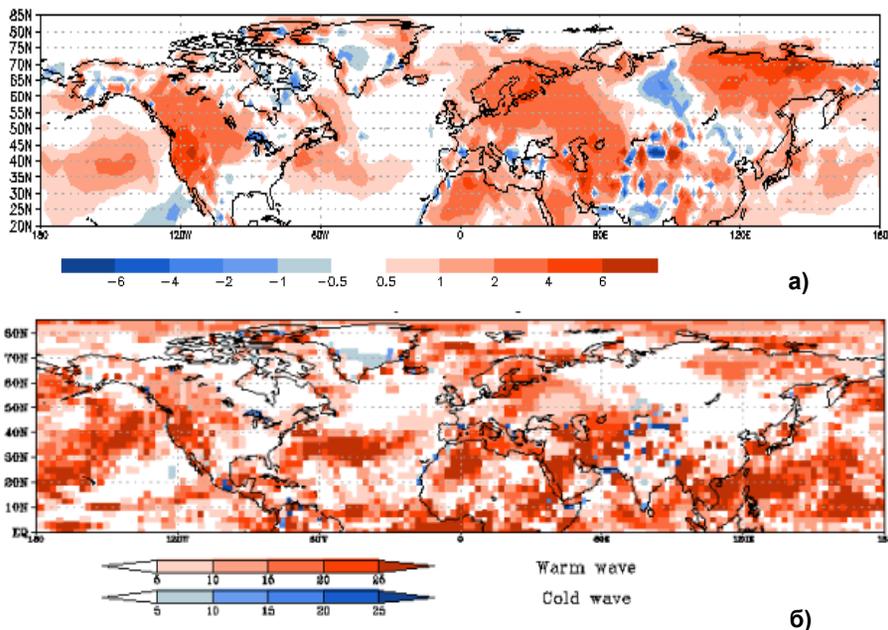
$$\text{GHGS} = \frac{Z(\varphi_0) - Z(\varphi_s)}{(\varphi_0 - \varphi_s)}, \quad \text{GHGN} = \frac{Z(\varphi_n) - Z(\varphi_0)}{(\varphi_n - \varphi_0)},$$

где  $Z$  – средние за пентаду значения H500;  $\varphi_n = 80^\circ \text{N} + \delta$ ;  $\varphi_0 = 60^\circ \text{N} + \delta$ ;  $\varphi_s = 40^\circ \text{N} + \delta$ ;  $\delta = 0^\circ \pm 5^\circ$ . Наличие блокинга на данной долготе в конкретный срок определяется, если хотя бы для одного значения индекса выполняются условия:  $\text{GHGS} > 0$  и  $\text{GHGN} < -10$  м/град.ш. (критерий ТМ). Критерий предполагает отсечение блокирующего антициклона с юга (полное или частичное с омегообразной конфигурацией изогипс), но не включает не отсекающиеся стационарные гребни. При этом к северу от блокирующего антициклона должен существовать хорошо выраженный западный поток. Несмотря на имеющиеся недостатки, данный критерий позволяет простым и удобным способ идентифицировать явление локального блокинга в любой конкретный срок.

Исходной информацией для расчета индексов WSDI, CSDI, EFI, а также критериев блокирования GHGN, GHGS и ТМ, служили архивы прогнозов (на 46 суток), средней суточной температуры и геопотенциала поверхности 500 гПа, стартовавшие от начальных данных за 13, 20 и 27 мая, 3, 10, 17 и 24 июня, 1, 8 и 15 июля 2021 года (10 начальных дат). Эталоном служили поля температуры воздуха и геопотенциала поверхности 500 гПа, полученные на базе реанализов ЕЦСПП (ERA5) с суточным разрешением за период с 1 июня по 31 августа 2021 года. В качестве базового периода использовался период 1985–2010 гг.

## 2. Температурный режим

В течение всего летнего периода на большей части территории Северного полушария преобладали положительные аномалии температуры воздуха. Наиболее значительные отклонения от климата в первой половине лета (рис. 1а) наблюдались в Северной Америке, в Европе, на Дальнем Востоке и в Якутии. В странах Западной Европы, на Европейской территории России и в Якутии во второй и третьей декаде июня, а также в первой и второй декаде июля были установлены новые рекорды тепла: температура поднималась выше  $+35^\circ$ , вплотную приближаясь к сорокоградусной отметке.



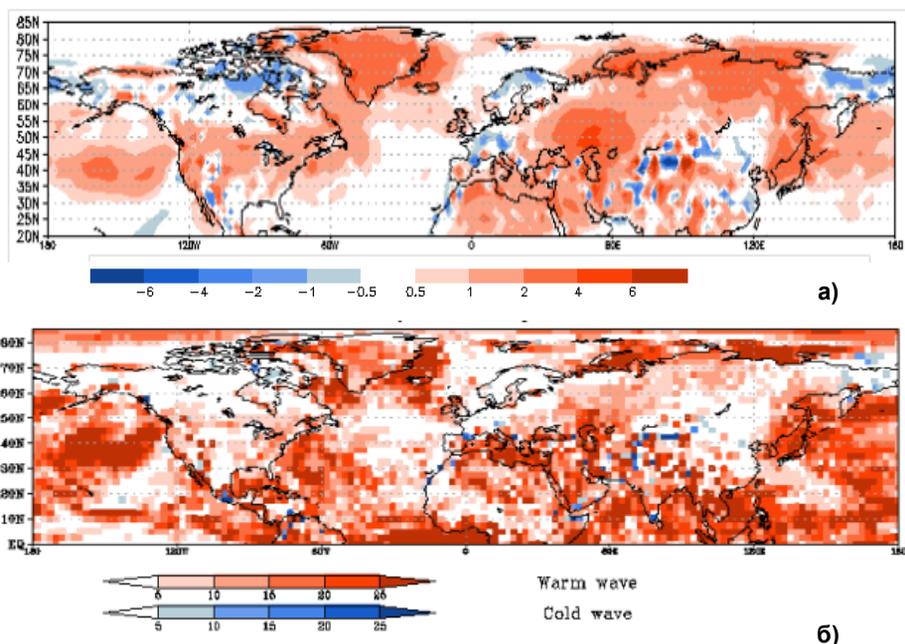
**Рис. 1.** Пространственное распределение аномалий приземной температуры воздуха (а) и индексов WSDI и CSDI (б) в первой половине лета 2021 г. Аномалии и индексы получены с использованием климата 1985-2010 гг. Исходными данными служили поля приземной температуры воздуха, полученные на основе суточных полей реанализа EЦСПП (ERA5).

**Fig. 1.** Spatial distribution of surface air temperature anomalies (a) and WSDI and CSDI indices (б) in the first half of summer 2021. Anomalies and indices were obtained using the 1985-2010 climate. The initial data were the surface air temperature fields obtained on the basis of the ECMWF daily reanalysis fields (ERA5).

В последнюю декаду июня жара захватила западные территории США и Канады. В канадской провинции Британская Колумбия зафиксирован исторический максимум: 29 июня днем столбики термометров поднимались до отметки  $+49.5^\circ$ , в Сиэтле, столице штата Вашингтон, температура впервые в истории перешагнула рубеж в  $40^\circ$ , а в Долине Смерти достигла  $+54^\circ$ . При этом наиболее значительные по продолжительности (более 20 дней) волны тепла наблюдались в странах Восточной Европы, на северо-западе европейской России, на севере Якутии и на западе США (рис. 1б).

Во второй половине лета эпицентрами жаркой погоды стали южные районы европейской России (рис. 2а), где жаркая погода сохранялась до конца августа. Аномальное тепло захватило почти всю, за исключением северо-востока, территорию России. В Якутии и на Дальнем Востоке (Хабаровский край, Амурская, Сахалинская и Магаданская обл.) даже в августе местами температура воздуха достигала  $30\text{--}35^\circ$ . В итоге в России

прошедший август стал самым жарким за всю историю метеорологических наблюдений, не уступив рекорду 2016 года.



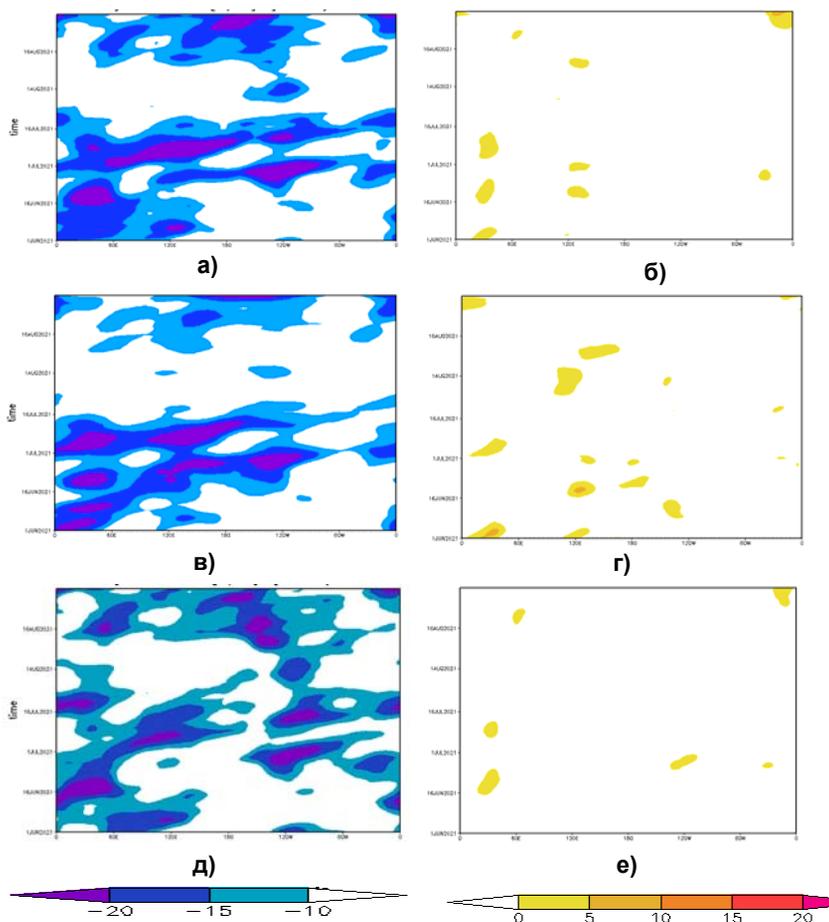
**Рис. 2.** Пространственное распределение аномалий приземной температуры воздуха (а) и индексов WSDI и CSDI (б) во второй половине лета 2021 г. Аномалии и индексы получены с использованием климата 1985-2010 гг. Исходными данными служили поля приземной температуры воздуха, полученные на основе суточных полей реанализа ЕЦСПП (ERA5).

**Fig. 2.** Spatial distribution of surface air temperature anomalies (a) and WSDI and CSDI indices (b) in the second half of summer 2021. Anomalies and indices were obtained using the 1985-2010 climate. The initial data were the surface air temperature fields obtained on the basis of the ECMWF daily reanalysis fields (ERA5).

В августе жара захватила юг и восток Европы. На юге Италии, на Мальте, в Греции и ряде Балканских стран, а также в Испании температура воздуха достигала 40–45°. На Сицилии был зафиксирован новый абсолютный максимум температуры для континента +48.8°. Новые рекорды были установлены во многих пунктах Испании и Франции, в том числе в Мадриде. Абсолютный рекорд достигнут в Исландии +29.4°. В Северной Америке положительные аномалии стали преобладающими на северо-востоке региона, особенно в арктической хоне. На востоке Гренландии за полярным кругом 29 июля впервые в метеорологической истории была зарегистрирована температура +23.4°. В странах Средиземноморья, на юге европейской России и Урала, на северо-востоке Канады продолжительность волн тепла превысила 20 дней (рис. 26).

### 3. Режимы атмосферной циркуляции

Во всех рассмотренных случаях крупные аномалии температурного режима сформировались на фоне квазистойчивых атмосферных режимов типа блокирования. На рис. 3 приводятся диаграммы Ховмюллера, построенные для индексов GHGN и GHGS, характеризующих атмосферную циркуляцию на уровне поверхности 500 гПа, соответственно, в высоких ( $55\text{--}85^\circ$  с. ш.) и более низких ( $35\text{--}65^\circ$  с. ш.) широтах Северного полушария летом 2021 года.



**Рис. 3.** Пространственно-временные диаграммы индексов блокирования: GHGN1 (а); GHGN2 (в), GHGN3 (д); GHGS1 (б); GHGS2 (г); GHGS3 (е). Лето 2021 г. Исходными данными служили средние суточные поля H500, полученные на основе реанализа ЕЦСПП (ERA5).

**Fig. 3.** Space-time diagrams of blocking indices: GHGN1 (a), GHGN2 (b); GHGN3 (d); GHGS1 (б); GHGS2 (г); GHGS3 (e). Summer 2021. The initial data were the average daily fields of H-500, obtained on the basis of ECMWF reanalysis (ERA5).

Как видно на рис. 3а, 3в и 3д, в первой половине лета наиболее значительные отрицательные значения индекса ( $GHGN < -10$  м/град.ш.) наблюдались над западом Северной Атлантики и Европой.

Начиная со второй декады июня и до середины июля благоприятные (при отрицательных значениях индекса  $GHGN < -10$  м/град.ш.) условия для процесса обрушения волн Россби и развития блокирования в средней тропосфере отмечались практически во всех регионах Северного полушария. При этом циркумполярный вихрь был довольно активным: аномалии геопотенциала в районе полюса по абсолютной величине превышали 10 дам. Над западом Северной Америки мощный гребень блокировал движение тихоокеанских циклонов на восток, обусловив тем самым продолжительную волну тепла. В то же время низкие широты оказались более спокойными: возмущения, характеризуемые индексами  $GHGS$  ( $GHGS > 0$ ), носили эпизодический и кратковременный характер (рис. 3б, 3г и 3е).

Наибольшее количество эпизодов блокирования в течение лета наблюдалось в Европе и на севере Азии. Интересной особенностью лета 2021 г. являлась необычайно высокая активность Восточно-Атлантического колебания. При этом средние месячные значения индекса EA (Eastern Atlantic oscillation) по данным Центра климатических прогнозов США (Climate Prediction Centre, CPC, – <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/wp.shtml>) в июле составили 2.2. В течение всего месяца в средней тропосфере над Атлантикой и севером Африки преобладающими были антициклонические формы атмосферной циркуляции, обеспечивающие вынос тропических воздушных масс в страны Средиземноморья, Восточной Европы и на запад Европейской территории России.

Специфическая особенность атмосферной циркуляции над Европой проявилась в крупномасштабной неустойчивости зонального потока, ставшей причиной образования мощной системы взаимодействующих антициклона над севером и востоком Западной Европы (по данным CPC значения индекса Скандинавского колебания SC в июле составили 1.5) и циклона над Черным морем, – блокирования расщепляющегося типа. При такой конфигурации изогипс в средней тропосфере циклоны, огибая блоки, смещались намного севернее или южнее своих обычных траекторий (наводнения в Германии, Австрии и Швейцарии, ливни в Москве). Наиболее значительные положительные аномалии геопотенциала (до 10 дам) в июле наблюдались над севером Атлантики и западом Тихого океана.

Во второй половине лета степень меридиональности атмосферной циркуляции значительно увеличилась. В августе мощные антициклоны (аномалии до 12 дам) утвердились над севером Атлантики и Уралом. В течение всего летнего периода 2021 г. знак индекса EA/WR (East Atlantic/Western Russia) по данным Центра климатических прогнозов

США (СРС) оставался отрицательным – наибольшее его среднемесячное значение в августе составило -2.4. Как известно [5], отрицательная фаза индекса EA/WR ассоциируется с антициклоническими формами атмосферной циркуляции над территорией европейской России, Урала и Сибири. Мощные гребни (аномалии до 10 дам) в августе отмечались также над востоком Тихого океана и севером Дальнего Востока. На Якутию по западной периферии гребня с юго-западными ветрами продолжилось наступление теплого воздуха.

#### 4. Верификация прогнозов

Качество прогнозов рассматривалось для отдельных случаев, ассоциируемых с волнами тепла различной продолжительности, конкретными значениями индекса экстремальности EFI, а также наличием или отсутствием с точки зрения критерия ТМ блокинга. При этом волны тепла с использованием пороговых значений, равных 5, 6, ..., 15 дням, представлялись как простые бинарные (дихотомические) да/нет события, а их прогнозы, в свою очередь, как да/нет категориальные прогнозы. Для индекса EFI порогами служили значения, равные 0.3, 0.4, ..., 0.8. При всем разнообразии используемых статистик основой для верификации прогнозов бинарных событий (категориальных прогнозов) служат двухходовые таблицы сопряженности прогнозов и наблюдений конкретного явления. Обозначим через  $a$  и  $b$  – число оправдавшихся и неоправдавшихся прогнозов соответственно,  $c$  – число пропущенных (не предсказанных) событий,  $d$  – число правильных прогнозов отсутствия явления. Подробный обзор мер качества для двухходовых таблиц сопряженности представлен в [7, 12].

Среди характеристик таблиц сопряженности различают описательные и содержательные меры качества (descriptive and performance measures). Первые представлены «выборочной климатологией», или «наблюденной частотой явления» (base rate, sample climate),  $= (a+c)/n$ , и «прогностической частотой явления» (forecast rate),  $= (a+b)/n$ , где  $n=a+b+c+d$ . Среди содержательных мер, которые в отечественной литературе носят названия «критериев качества», далее будут использованы: вероятность обнаружения или «доля попаданий» (Hit Rate),  $HR = a/(a+c)$ ; «доля ложных тревог» (False Alarm Ratio),  $FAR = b/(a+b)$ ; коэффициент успеха (Success Ratio), равный доле оправдавшихся прогнозов в общем числе прогнозов явления,  $SR=a/(a+b)=1-FAR$ ; индекс смещения частот (Frequency Bias Index),  $FBI=(a+b)/(a+c)$ , характеризующий соотношение повторяемости прогностических и фактических событий; «критерий Пирса» (Peirce skill score),  $PSS = HR-FAR$ . Наглядным способом анализа таблиц сопряженности является построение характеристических диаграмм (performance diagram) [10], агрегирующих сразу несколько показателей качества прогноза (HR, SR и FBI).

Более универсальными, обладающими рядом преимуществ (независимость от частоты явления, невырожденность предела, ограниченность диапазона и т. д.), позволяющими оценивать качество прогноза, в том числе, очень редких событий, являются показатели EDS (Extreme Dependency Score), EDI (Extremal Dependence Index) и их симметризованные варианты SEDS и SEDI [6, 7]. Воспользуемся наиболее простым показателем, а именно: индексом экстремальной зависимости EDI, который вместе со стандартным отклонением  $S$  выражается следующим образом:

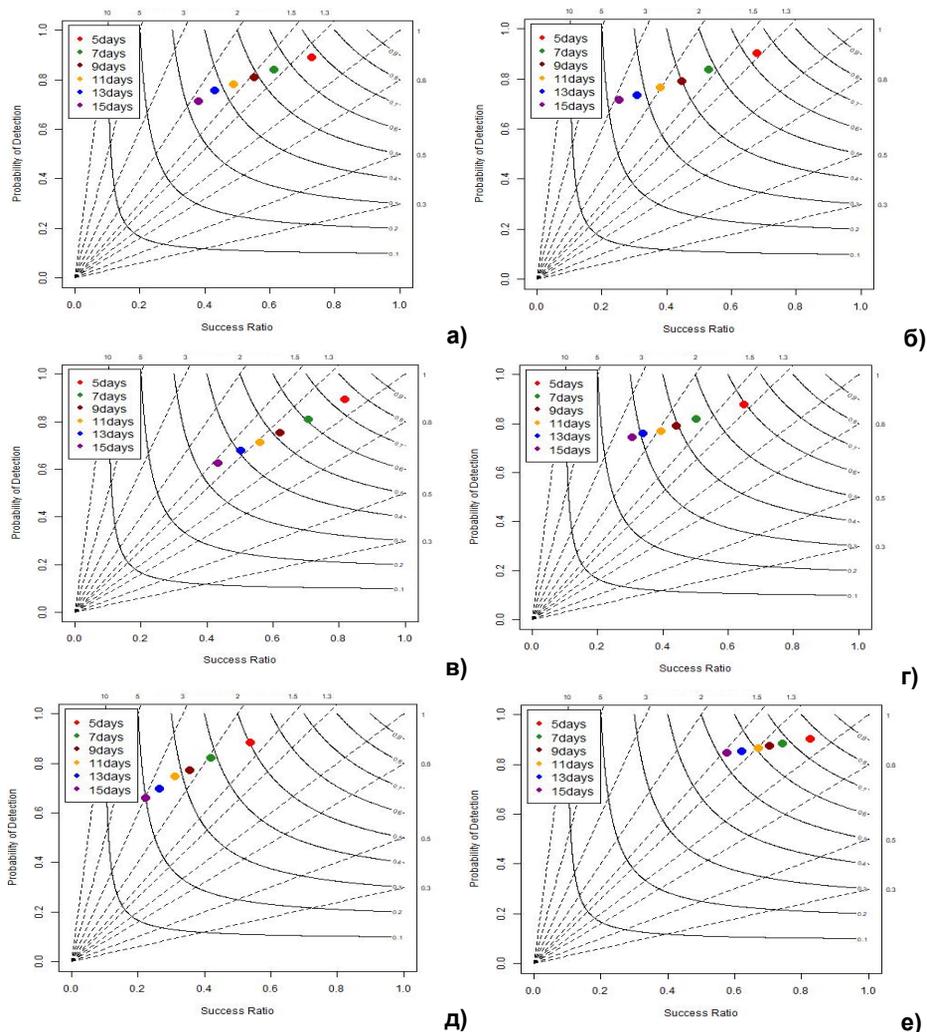
$$EDI = \frac{\log F - \log H}{\log F + \log H};$$

$$S = \frac{2 \log F + \left( \frac{H}{1-H} \right) \log H}{H(\log F + \log H)^2} \sqrt{\frac{H(1-H)}{np}}.$$

В предположении нормальности распределения стандартные ошибки  $S$ , будучи умноженными на 1.96, дают приблизительную оценку 95%-го доверительного интервала.

При расчетах показателей качества используется метод агрегирования, или пулинга, при котором игнорируются различия между пространственными и временными измерениями, и выборки по всем точкам на пространственно-временных разрезах сливаются в один ансамбль, для которого проводится расчет всех характеристик таблицы сопряженности. При этом доверительные интервалы для характеристик таблиц сопряженности рассчитываются в предположении нормальности распределения, что позволяет избежать зависимости оценок интервалов от объема выборки для случаев, если объем является достаточно представительным (около сотни пар прогнозов и наблюдений). Координаты регионов и временные интервалы, для которых проводится агрегирование обозначены ранее.

Для наглядного представления региональной предсказуемости волн тепла строились характеристические диаграммы (performance diagram) (рис. 4) отдельно для регионов: Северное полушарие (0–360°, 40–70° с. ш.), Арктика (0–360°, 70–85° с. ш.), Тропики (0–360°, 20° ю. ш. – 20° с. ш.), Европа (10–60° в. д., 35–70° с. ш.), Северная Азия (60–190°, 40–75° с. ш.), Северная Америка (60–120° з. д., 40–70° с. ш.) на основе осредненных (для 10 начальных дат прогноза) значений оценок HR, SR, FBI и CSI. Заметим, что успешность прогнозов на диаграмме тем выше, чем ближе расположение точки к верхнему правому углу квадрата. Как видно (рис. 4а), для Северного полушария в целом оценки FBI, характеризующие соотношение повторяемости прогностических и фактических событий, моделью ПЛАВ завышаются, а качество прогнозов волн тепла продолжительностью более 10 дней оказываются ниже уровня случайного.



**Рис. 4.** Характеристические диаграммы успешности прогнозов волн тепла различной (от 5 до 15 дней) продолжительности для 6 регионов: Северное полушарие (а); Арктика (б); Европа (в); Северная Азия (г); Северная Америка (д); Тропики (е). Сплошные кривые – изолинии CSI, пунктирные линии – FBI.

**Fig. 4.** Characteristic charts of the success of forecasts of heat waves of various (from 5 to 15 days) duration for 6 regions: Northern Hemisphere (a); Arctic (б); Europe (в); North Asia (г); North America (д); Tropics (е). Solid curves – CSI isolines, dashed lines – FBI.

Для Арктики (рис. 4б) значения FBI возрастают, а «предел предсказуемости» волн тепла уменьшается до 7 дней. Более успешными оказываются прогнозы для региона Европа (рис. 4в), где значения индекса смещения частот FBI приближаются к 1, а «предел предсказуемости»

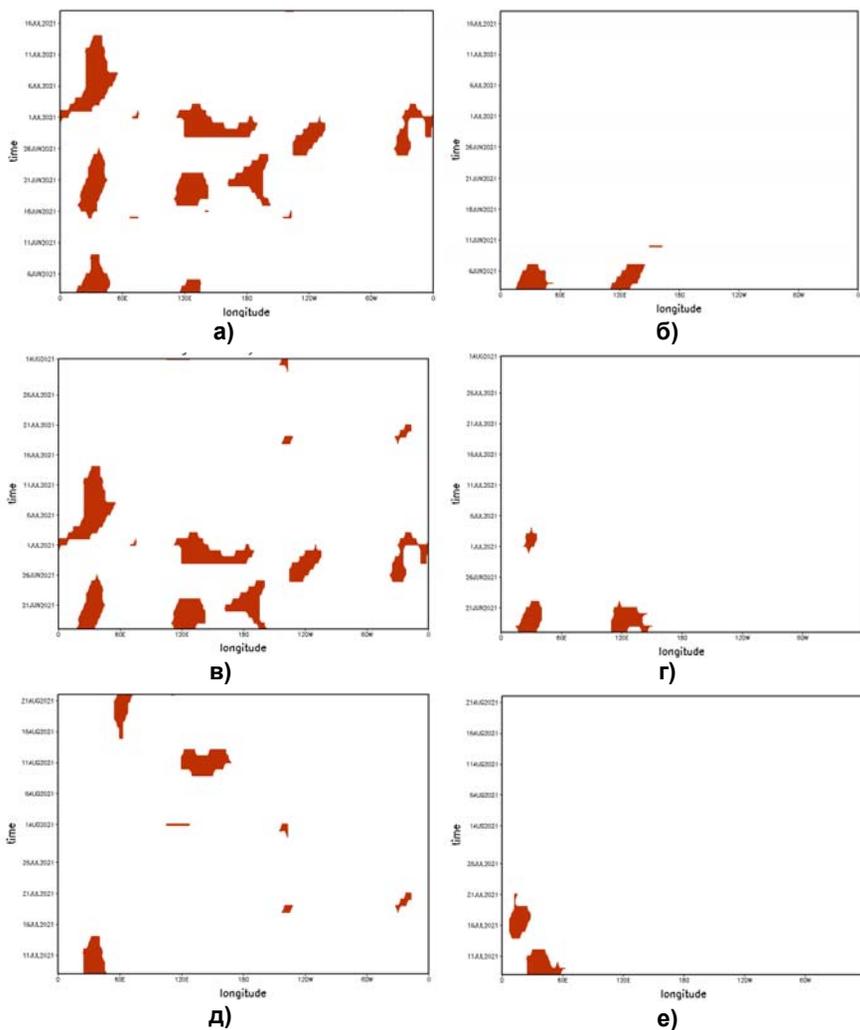
увеличивается до 2 недель. Регион Северная Азия (рис. 4г) по предсказуемости приближается к Арктике и намного уступает региону Европа. Наихудшие оценки получены для Северной Америки (рис. 4д). Наиболее успешными, как и следовало ожидать, оказались прогнозы в тропиках (рис. 4е), где прогностическая повторяемость волн тепла приблизилась к фактической, а доля оправдавшихся прогнозов составила 60–80 %. При этом во всех регионах, хотя и в разной степени, прогностическая продолжительность волн тепла превосходила фактическую, что может служить косвенным признаком наличия погрешностей в радиационном блоке модели, в частности в завышении (занижении) потоков коротковолновой и нисходящей длинноволновой радиации (эффективного излучения).

Прогнозы индекса экстремальности EFI в контексте региональной предсказуемости нельзя признать удовлетворительными. При этом повторяемость прогностических значений уступает фактической: оценки индекса смещения частот FBI значительно меньше 1, особенно для градаций, превышающих 0.7 и 0.8. Наилучшие оценки предсказуемости, так же как и для волн тепла, получены для тропиков и региона Европа.

Оценки качества прогнозов волн тепла и индекса экстремальности EFI в значительной степени зависят от устойчивости режимов атмосферной циркуляции. Летом 2021 г., особенно в первой его половине, режимы атмосферной циркуляции типа блокирования с точки зрения критерия ТМ наблюдались практически во всех регионах Северного полушария (рис. 5).

По данным реанализа (рис. 5а) в начале лета блокирующие антициклоны сформировались на Европейской территории России и в Якутии. Прогнозы факта наличия или отсутствия блокирования от 3 июня (рис. 5б), приходящиеся на период зрелой фазы, хорошо согласуются с фактическими данными. Значения параметра EDI (ошибки прогноза) для первой прогностической недели составляют 0.88 (0.05) и 0.90 (0.10), соответственно, для Европы и Якутии. Более мощное развитие на Северном полушарии процессы блокирования получили во второй половине июня (рис. 5в), когда блокирующие антициклоны были отмечены не только в Европе, Якутии, на Дальнем Востоке, но также в Тихом океане, в Северной Америке и на востоке Атлантики.

Однако в модельных данных (начальная дата прогноза 10 июня) блокирующие образования отсутствуют, т. е. начальная фаза развития блокирования моделью ПЛАВ не была предсказана. Более удачными на фоне уже сложившихся блокингов оказались прогнозы от 17 июня (рис. 5в и 5г), значения параметра EDI (ошибки прогноза) для Европы составили 0.88 (0.04) и 0.54 (0.03), соответственно, на недельном и месячном интервале интегрирования. Даты окончания «блокирующего» периода на территории Европы, полученные по данным реанализа и гидродинамического моделирования от 7 июля расходятся (рис. 5д и рис. 5е).

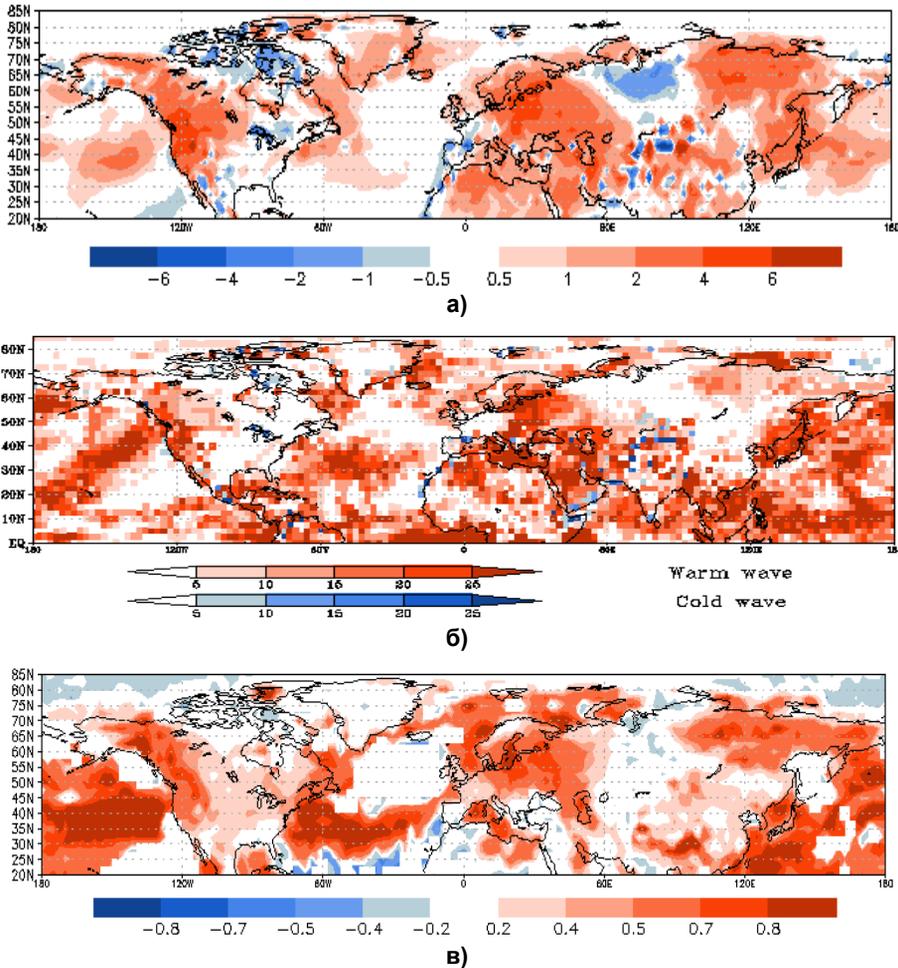


**Рис. 5.** Диаграммы Ховмюллера. Наличие блокинга (выделено красным цветом) по критерию ТМ по данным реанализа (а, в, д) и гидродинамического моделирования (б, г, е). Лето 2021 г.

**Fig. 5.** Hovmüller diagrams. The presence of blocking (highlighted in red) according to the TM criterion according to reanalysis data (a, в, д) and hydrodynamic modeling (б, г, е). Summer 2021.

На рис. 6 представлены карты пространственного распределения аномалий полей приземной температуры воздуха (рис. 6а), волн тепла (рис. 6б), полученных по данным реанализа, а также прогностических значений индекса экстремальности EFI (рис. 6в) для 46-дневного периода для начальной даты прогноза 17 июня 2021 г. На фоне квазистойчивых режимов атмосферной циркуляции, установившихся на большей части территории Северного полушария с середины июня, прогнозы индекса

экстремальности EFI оказались довольно успешными. На территории Европы оценки прогнозов PSS (критерий Пирса) для начальных дат прогноза 17 и 24 июня и порогового значения индекса  $EFI=0.5$  составили, соответственно, 0.63 и 0.54. Для остальных дат прогноза на фоне смены режимов атмосферной циркуляции оценки качества прогнозов индекса EFI оказались ниже уровня случайного.



**Рис. 6.** Пространственное распределение аномалий приземной температуры воздуха (а) и волн тепла (б), полученных по данным реанализа и прогностических значений индекса EFI для 46 периода. Начальная дата прогноза – 17 июня 2021 г.

**Fig. 6.** Spatial distribution of surface air temperature anomalies (a) and heat waves (б) obtained from reanalysis data and predicted values of the EFI index for 46 period. Initial forecast date – June 17, 2021.

## Заключение

С использованием данных реанализа ЕЦСПП (ERA5) рассмотрены основные особенности температурного режима и атмосферной циркуляции в Северном полушарии летом 2021 г. На фоне квазиустойчивых режимов атмосферной циркуляции типа блокирования отмечено значительное преобладание волн тепла по сравнению с волнами холода.

Качество прогнозов волн тепла на базе полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ можно признать удовлетворительным. При этом наилучшие результаты получены для региона Европы и тропиков. Во всех регионах, хотя и в разной степени, прогностическая продолжительность волн тепла оказалась немного завышенной. Прогнозы индекса EFI в большинстве случаев – ниже уровня случайного.

Показана зависимость качества прогнозов блокирующего антициклона от фазы его развития (начало блокирования, зрелая фаза, разрушение блокинга). Наиболее сложной для гидродинамического моделирования оказалась начальная фаза блокирования. В период зрелой фазы (наличие блокирования в начальных данных модели) полезный сигнал был отмечен не только на недельном, но и на месячном интервале интегрирования.

Полученные результаты могут использоваться при прогнозировании ЭМЯ на внутрисезонных интервалах времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение №075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН).

## Список литературы

1. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Об оценке индекса экстремальности EFI // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 5-22.
2. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. Обнинск: ФАО ФОП, 2010. 111 с.
3. Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Толстых М.А., Травова С.В., Мизяк В.Г., Рогутев В.С., Алипова К.А. Развитие системы долгосрочного прогноза Гидрометцентра России в 2020 году // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. №1 (379). С. 58-72.
4. Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман Б.А., Скриптунова Е.Н. Блокирование: условия лета 2010 г. в контексте современных знаний // Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года (сб. докладов). М.: Триада ЛТД, 2011. С. 6-21.
5. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. 1987. Vol. 115. P. 1083-1126.
6. Ferro C.A.T., Stephenson D.B. Extremal dependence indices: improved verification measures for extreme events and warnings // Wea. Forecast. 2012. Vol. 26. P. 699-713.
7. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide. Second Ed., Eds. I. Jolliffe and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.

8. Lejenas H., Okland H. Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data // *Tellus*. 1983. Vol. 35A. P. 350-362.

9. Peterson T.C. Climate Change Indices // *WMO Bulletin*. 2005. Vol. 54 (2). P. 83-86.

10. Roebber P.J. Visualizing multiple measures of forecast quality // *Wea. Forecast.* 2009. Vol. 24. P. 601-608.

11. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // *Tellus*. 1990. Vol. 42A. P. 343-365.

12. Wilks D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. London: Academic Press, 2011. 676 p.

### References

1. Kiktev D.B., Kруглова E.N., Куликова I.A. On the Evaluation of the Extremality Index EFI. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 1-12. DOI: 10.3103/S106837392001001X.

2. Tolstykh M.A. Global'naya polulagranzheva model' chislennogo prognoza pogody. Obninsk, FAO FOP, 2010, 111 p. [in Russ.].

3. Fadeev R. Yu., Shashkin V.V., Tolstykh M.A., Travova S.V., Mityak V.G., Rogurov V.S., Alipova K.A. Development of the long-range forecast system at Hydrometcentre of Russia in 2020. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 379, no. 1, pp. 58-72 [in Russ.].

4. Shakina N.P., Ivanova A.R., Birman B.A., Skriptunova E.N. Blokirovaniye: usloviya leta 2010 g. v kontekste sovremennykh znaniy. Analiz usloviy anomal'noy pogody na territorii Rossii letom 2010 goda (sb. dokladov). Moscow, Triada LTD, 2011, pp. 6-21 [in Russ.].

5. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, vol. 115, pp. 1083-1126.

6. Ferro C.A.T., Stephenson D.B. Extremal dependence indices: improved verification measures for extreme events and warnings. *Wea. Forecast.*, 2012, vol. 26, pp. 699-713.

7. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide. Second Ed., Eds. I. Jolliffe and D. Stephenson. *John Wiley & Sons Ltd*, 2012, 274 p.

8. Lejenas H., Okland H. Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data. *Tellus*, 1983, vol. 35A, pp. 350-362.

9. Peterson T.C. Climate Change Indices. *WMO Bulletin*, 2005, vol. 54, no. 2, pp. 83-86.

10. Roebber P.J. Visualizing multiple measures of forecast quality. *Wea. Forecast.*, 2009, vol. 24, pp. 601-608.

11. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking. *Tellus*, 1990, vol. 42A, pp. 343-365.

12. Wilks D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. London: Academic Press, 2011, 676 p.

Поступила 27.01.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;  
принята в печать 30.03.2022.

Submitted 27.01.2022; approved after reviewing 17.03.2022;  
accepted for publication 30.03.2022.