

УДК 551.509

Прогнозирование волн тепла на внутрисезонных масштабах времени

Е.Н. Круглова, И.А. Куликова, В.А. Тищенко, В.М. Хан

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия*

kruglova@mecom.ru, kulikova@mecom.ru, tishchenko@mecom.ru, khan@mecom.ru

Рассматриваются возможности прогнозирования экстремальных метеорологических явлений на внутрисезонных (до 45 суток) интервалах времени на базе гидродинамического моделирования. В качестве исходной информации используются прогнозы средней суточной приземной температуры воздуха, полученные с использованием модели ЕЦСПП в рамках проекта S2S (Subseasonal to Seasonal Prediction Project), а также данные реанализа ERA Interim. С использованием модифицированного для среднесуточных данных индекса волн тепла (WSDI), рекомендованного ВМО, проводится исследование конкретных случаев (для различных дат прогноза и регионов), когда наблюдались значительные аномалии температуры воздуха. Дается краткая характеристика режимов атмосферной циркуляции, на фоне которых формируются волны тепла. На основе полученных оценок качества прогнозов с использованием индекса экстремальной зависимости EDI и его стандартного отклонения s делается вывод о наличии полезного сигнала на внутрисезонных интервалах времени. Полученные результаты могут оказаться полезными при составлении долгосрочных метеорологических прогнозов приземной температуры воздуха.

Ключевые слова: долгосрочные метеорологические прогнозы, волны тепла, режимы атмосферной циркуляции, верификация

Forecasting of Heat Waves on Subseasonal Timescales

E.N. Kruglova, I.A. Kulikova, V.A. Tishchenko, V.M. Khan

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
kruglova@mecom.ru, kulikova@mecom.ru, tishchenko@mecom.ru, khan@mecom.ru*

The possibilities of predicting extreme weather events on intraseasonal (to 45 days) time intervals based on the hydrodynamic modeling are considered. Background information is based on the forecasts of daily mean surface air temperature obtained with the ECMWF model in the framework of the S2S (Subseasonal to Seasonal Prediction Project) project, as well as on the ERA Interim reanalysis. The case studies (for different initial dates and regions) of significant temperature anomalies are investigated using the modified warm spell duration index (WSDI) recommended by WMO. The atmospheric circulation patterns affecting the heat wave formation are also considered. Based on the obtained skill scores of forecasts using EDI (Extremal Dependence Index) and its standard deviation s , a conclusion is made on the presence of the useful signal on intraseasonal timescales. The results can be useful in the practice of long-range meteorological forecasting of surface air temperature.

Keywords: long-range forecasts, heat waves, atmospheric circulation patterns, verification

Введение

За последние годы в области долгосрочных метеорологических прогнозов (ДМП) достигнут существенный прогресс. Несмотря на то, что основной продукцией ведущих метеорологических центров остаются прогнозы осредненных за тот или иной интервал времени (месяц, сезон) аномалий метеорологических величин и/или вероятностей их категорий, возрастает интерес и появляются реальные возможности для выпуска прогнозов экстремальных характеристик. Основной базой для реализации таких возможностей служат ансамблевые прогностические системы. В мировых метеорологических центрах в настоящее время при составлении ДМП используются ансамбли с размерностью порядка сотен прогностических реализаций, позволяющие построить различные характеристики экстремальности.

Наиболее простой способ связан с использованием экстремальных средних за период прогноза аномалий. Такие прогнозы выпускаются, например, ЕЦСПП, Азиатско-тихоокеанским климатическим центром (АРСС), Международным институтом климата и общества (IRI), Метеорологической службой Франции (Meteo-France). При этом экстремумы в средних сезонных значениях прогнозируются как вероятности попадания в верхний и нижний 15%-ные «хвосты» многолетнего распределения аномалий прогнозируемой величины [8]. Метеорологическая служба Великобритании использует 5-категорийную дискретизацию распределения вероятностей средних сезонных аномалий.

Помимо экстремумов как крайних категорий средних за период значений рассматриваются экстремумы на фоне внутрисезонной и внутримесячной изменчивости, идентифицируемые с помощью различных климатических индексов (экстремальные значения средней суточной, максимальной и минимальной температуры, волны тепла и холода, индексы циркуляции и т. д.) [14]. Возможности такого рода прогнозов связаны с успехами, достигнутыми в области гидродинамического моделирования за последние десятилетия. Так, например, для осцилляции Маддена–Джулиана интервал времени, на котором прослеживается полезный прогностический сигнал, увеличился от 15 дней в 2002 г. до 25 дней в 2011 году [18].

В данной работе на примере конкретных случаев (для различных дат прогноза и регионов), когда наблюдались значительные аномалии температуры воздуха, рассматриваются возможности прогнозирования волн тепла на внутрисезонных (до 45 суток) интервалах времени с использованием модифицированного, рекомендованного ВМО индекса WSDI. В качестве исходной информации используются данные реализованного под эгидой Всемирной программы метеорологических исследований и Всемирной программы исследования климата ВМО проекта по внутрисезонному прогнозированию S2S (Subseasonal to Seasonal Prediction

Project). Расчеты проводятся на основе прогнозов приземной температуры воздуха, полученных с использованием модели ЕЦСПП. Рассмотрены режимы атмосферной циркуляции, на фоне которых формируются волны тепла. Показано, что практическая предсказуемость волн тепла меняется в зависимости от их пространственных размеров и устойчивости. Полученные результаты после проведения дополнительных исследований на более представительных выборках могут оказаться полезными при составлении ДМП прогнозов температуры воздуха.

1. Определение волны тепла

В настоящее время общепринятое определение волны тепла отсутствует. В России в синоптической практике волны тепла ассоциируются с вторжениями теплого воздуха и переходом последнего в малоподвижное стационарное состояние. При этом количественные оценки, связанные с интенсивностью и длительностью существования волн тепла, как правило, не используются. В историческом ракурсе, по аналогии с волнами холода [6], волны тепла связываются с повышением температуры, характеризующимся поступательным, подобным волне движением. В унисон с данным представлением в Метеорологическом словаре [7] волна тепла трактуется как «значительное потепление, распространяющееся в определенном направлении, связанное с адвекцией теплой массы».

За последние десятилетия, главным образом за счет появления количественных критериев, понятие волны тепла существенным образом трансформировалось. В [1] волна тепла ассоциируется с превышением аномалии приземной температуры воздуха величины стандартного отклонения на протяжении семи дней и более с возможными отступлениями от этого правила (не ниже половины величины стандартного отклонения) в течение не более трех дней. На примере аномальной жары 2010 года в России показана связь волн тепла с процессами блокирования.

Е.В. Рочева [5] 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 $45\text{--}55^\circ$ 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 $w_0 = 1,0$. В качестве волны тепла рассматривается период существования аномалии с характеристиками: $W_t \geq w_0, D \geq d_0, L \geq L_0$. Для каждого меридиана рассчитаны временные ряды NyL за каждый месяц и за первую половину лета (май-июнь) при критериях: $d_0 = \{4 | 8 | 10 | 15 | 25 \text{ дней и более}\}$ и $L_0 = \{10 | 15 \text{ градусов долготы и более}\}$ и получены их статистические характеристики за 1956–2010 и 1976–2010 годы.

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 [15]. При этом рассматриваются различные метеорологические параметры (температура, влажность, скорость ветра и т. д.) или их комплексы. Например, в [10] волны тепла рассматриваются как факторы риска для здоровья человека. На основе детального анализа конкретных событий продемонстрировано их влияние на организм человека.

В [16] подчеркивается необходимость разработки обоснованного метеорологического определения волны тепла и соответствующих количественных критериев. В качестве последних для оценки влияния на организм человека автор рекомендует использовать комплексные показатели (индексы тепла), построенные с учетом минимальной и максимальной суточной температуры воздуха, а также влажности воздуха. 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.

На длительных интервалах времени (месяц и сезон) наиболее целесообразным представляется использование климатологических 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. Примеры таких индексов, характеризующих температурный режим, приводятся в табл. 1.

В данной работе используется модифицированный для среднесуточных данных индекс волн тепла (WSDI), характеризующий число дней на интервале интегрирования модели ЕЦСПП (45 суток), когда по меньшей мере в течение пяти последовательных дней средняя суточная температура больше 90-й перцентили. При этом в качестве климата используются исторические прогнозы (1999–2015 гг.). В соответствии с данным определением проводятся также расчеты эталонных величин – волн тепла по данным анализа ERA Interim.

2. Исходные данные

На основе пространственно-временной локализации аномалий температуры воздуха и синоптических ситуаций (с точки зрения их пространственной однородности) для исследования возможностей прогнозирования волн тепла были выбраны следующие даты прогноза и регионы: европейская Россия – Западная Сибирь (регион, ограниченный 30–80° в. д. и 50–85° с. ш.) для начальной даты прогноза 21 июля 2016 г.; Западная Европа (регион, ограниченный 0–40° в. д. и 40–75° с. ш.) для начальной даты прогноза 5 июля 2018 года.

Таблица 1. Климатические индексы, характеризующие температурный режим (<http://etccdi.pacificclimate.org>)**Table 1.** Climatic indices characterizing daily temperature (<http://etccdi.pacificclimate.org>)

ID	Название	Определение	Единицы измерения
SU25	Летние дни (Summer days)	Число дней, когда максимальная температура TX > 25 °C	Дни
ID0	Ледяные дни (Ice days)	Число дней, когда TX < 0 °C	Дни
TR20	Тропические ночи (Tropical nights)	Число дней, когда минимальная температура TN > 20 °C	Дни
FD0	Морозные дни (Frost days)	Число дней, когда TN < 0 °C	Дни
TXx	Максимум Tmax (Max Tmax)	Ежемесячное максимальное значение дневной максимальной температуры	°C
TNx	Максимум Tmin (Max Tmin)	Ежемесячное максимальное значение дневной минимальной температуры	°C
TXn	Минимум Tmax (Min Tmax)	Ежемесячное минимальное значение дневной максимальной температуры	°C
TNn	Минимум Tmin (Min Tmin)	Ежемесячное минимальное значение дневной минимальной температуры	°C
TXx	Максимум Tmax (Max Tmax)	Ежемесячное максимальное значение дневной максимальной температуры	°C
DTR	Дневной температурный диапазон (Diurnal temperature range)	Температурный диапазон: среднемесячная разница между TX и TN	°C
WSDI	Волны тепла (Warm spell duration indicator)	Волны тепла: число дней в году, когда по меньшей мере в течение 6 последовательными дней TX > 90-й процентиля	Дни
CSDI	Волны холода (Cold spell duration indicator)	Волны холода: число дней в году, когда по меньшей мере в течение 6 последовательных дней TN < 10-й процентиля	Дни

Для этих дат были сформированы:

– архивы прогностических полей средней суточной температуры воздуха (интервал интегрирования 45 суток, 51 член ансамбля, один из них контрольный), а также ретроспективных прогнозов для тех же двух дат (с 1997 по 2015 г., 11 членов ансамбля, один из них контрольный) по данным гидродинамической модели ЕЦСПП, участвовавшей в международном проекте S2S (Subseasonal to Seasonal Prediction Project, <http://s2sprediction.net/>);

– эталонные архивы на базе реанализов ЕЦСПИ (ERA-Interim), подготовленные в виде массивов с файловой организацией данных – глобальных полей средней суточной температуры воздуха на сетке $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ за период с 1997 по 2018 год;

– полученные на базе вышеуказанной информации производные архивы глобальных прогностических и фактических (по данным реанализа) полей характеристик волн тепла за период с 1997 по 2017 год.

Для характеристики режимов циркуляции, наблюдавшихся в течение указанных выше периодов, использовались индексы дальних связей, полученные на основе архивов Центра климатических прогнозов США (Climate Prediction Centre, CPC) <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/wp.shtml> и Гидрометцентра России <http://meteoinfo.ru>.

3. Краткая характеристика режимов циркуляции

Рассмотрим более подробным образом синоптические ситуации, на фоне которых сформировались волны тепла, наблюдавшиеся на территории Европы и Сибири в июле-августе 2016 и 2018 гг. В полях аномалий, рассчитанных для 45 суток от начальной даты 21 июля 2016 г. (рис. 1а), наиболее значительные отклонения от климата (аномалии до 4–6 °С) прослеживаются над Европейской территорией России, Уралом, Западной Сибирью и прилегающими акваториями Карского и Баренцева морей. Значения индекса WSDI (рис. 1г) в этих регионах местами превышают 20 и 30 дней. Данные аномалии температурного режима наблюдаются на фоне квазиустойчивых атмосферных режимов, связанных с отрицательной фазой индекса EA/WR (East Atlantic/Western Russia). При этом знак индекса EA/WR не меняется в течение всего летнего периода, а его среднемесячное значение в августе 2016 г. составляет -3,3 (табл. 2).

Отрицательная фаза индекса EA/WR, как известно [9], ассоциируется с антициклоническими формами атмосферной циркуляции над территорией европейской России, Урала и Западной Сибири. По данным Гидрометцентра России (<https://meteoinfo.ru>), в августе наиболее значительные аномалии геопотенциала (до +17 дам) отмечались над Западной Сибирью. При этом планетарная высотная фронтальная зона (ПВФЗ) располагалась намного севернее своего климатического положения (до 12 °С).

Другой интересной особенностью августа 2016 г. является необычайно высокая активность Полярного колебания. При этом средние месячные значения индекса P/EU (Polar/Eurasian) в августе составили 2,43 (табл. 2). Данное обстоятельство свидетельствует о значительном усилении циркумполярного вихря, ассоциирующегося с положительными аномалиями температуры воздуха на территории Восточной Сибири. Околополярный циклон был чрезвычайно глубоким – среднемесячные аномалии геопотенциала в нем составили -16 дам. Данная ситуация способствовала увеличению продолжительности существования волн тепла на территории Сибири и их распространению на восток.

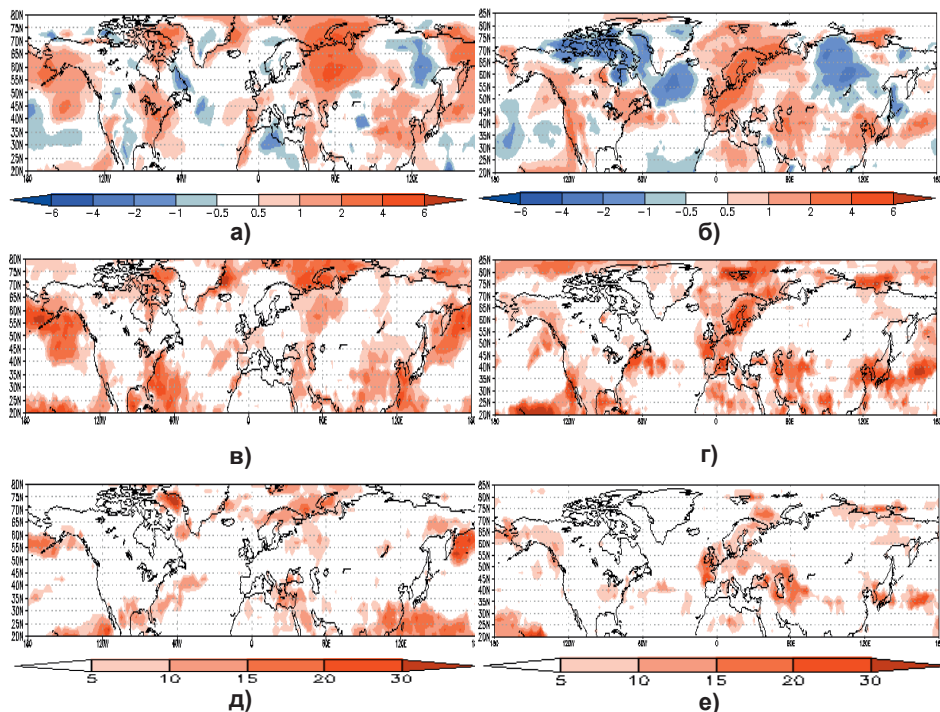


Рис. 1. Аномалии приземной температуры воздуха (для 45 суток в °С) (а) и (б) и волны тепла (в днях), полученные по данным ранализа (в) и (г) и гидродинамического моделирования (д) и (е) для начальных дат: 21 июля 2016 г. (слева) и 5 июля 2018 г. (справа).

Fig. 1. Anomalies of surface air temperature (for 45 days in °C) (a) and (б) and heat waves (in days), obtained from the reanalysis data (в) and (г) and hydrodynamic modeling data (д) and (е) For starting dates: July 21, 2016 (left) and July 5, 2018 (right).

Таблица 2. Средние месячные значения индексов Восточно-Атлантического (East Atlantic/Western Russia, EA/WR), Полярного (Polar/Eurasian, P/EU) и Северо-Атлантического (North Atlantic, NAO) колебаний по данным Центра климатических прогнозов США (Climate Prediction Centre, CPC) (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/wp.shtml>)

Table 2. Monthly average values of the East Atlantic/Western Russia (EA / WR), Polar/Eurasian (P / EU) and North Atlantic (NAO) indices according to the US Climate Prediction Center

Индекс	Годы/месяцы	VI	VII	VIII
EA/WR	2016 г.	-1,85	-1,01	-3,30
P/EU	2016 г.	-1,07	-0,24	2,43
NAO	2018 г.	1,09	1,39	1,97

В полях аномалий, рассчитанных для 45 суток от начальной даты 5 июля 2018 г. (рис. 1б), положительные значения прослеживаются на большей части территории Северной Евразии (за исключением Сибири). Наиболее значительные отклонения от климата (до 4–6 °С) отмечаются над Скандинавией. Значения индекса WSDI на севере и западе Европы местами превышают 20–30 дней (рис. 1д). Характерной особенностью атмосферной циркуляции на территории Европы является преобладание (в течение довольно длительного периода) режимов циркуляции, связанных с положительной фазой индекса NAO (табл. 2). При этом атмосферные процессы отличаются необычайно высокой устойчивостью – знак индекса NAO в период с апреля по октябрь остается положительным.

Одним из механизмов, определяющих длительность существования макроциркуляционных процессов, как известно, является взаимодействие атмосферы и океана. Во многих исследованиях [2, 3, 13] при исследовании влияния термического состояния Северной Атлантики на температурный режим Европы рассматриваются эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) полей аномалий ТПО, интерпретируемые как моды изменчивости. В течение рассматриваемого периода распределение аномалий ТПО в Северной Атлантике соответствовало положительной фазе так называемого «триполя» (основной моде изменчивости ТПО, объясняющей около 20 % суммарной дисперсии), характеризующейся отрицательными аномалиями ТПО в центральной части Северной Атлантики. В то же время в Мексиканском заливе и в районе Гольфстрима в течение довольно продолжительного периода (лето и осень 2018 г.) наблюдались значительные положительные аномалии ТПО. Данное обстоятельство способствовало усилению контрастов между теплой водой и холодным воздухом.

В результате адвекции тепла Североатлантическим течением и возрастания ветровых напряжений западно-восточный перенос в атмосфере умеренных широт интенсифицировался. Для высоких широт Северной Атлантики усиление западно-восточного переноса в средних широтах привело к интенсификации Североатлантического, Восточно-исландского, Норвежского течений, а также течения Ирмингера и, как следствие, появлению положительных аномалий в северной части акватории (к северу от Исландии). Сигнал со стороны океана, связанный с положительной фазой Северо-Атлантического «триполя», способствовал сохранению положительной фазы Северо-Атлантического колебания (NAO) и стал одной из причин аномальной циркуляции в средней тропосфере. По данным Гидрометцентра России, средняя месячная величина аномалии H-500 в июле над северной Европой составила +17 дам. Значительным отклонением от климата к северу (над Восточной Европой до 25°) характеризовалось положение ПВФЗ. Таким образом, рассмотренные выше эпизоды характеризовались на редкость устойчивыми режимами атмосферной циркуляции.

Как показали результаты многочисленных исследований [например, 17], для гидродинамических моделей отрезков времени, называемый интервалом практической предсказуемости, за пределами которого качество прогнозов резко падает, составляет примерно 5–7 суток. По различным оценкам, он может быть увеличен до 2–3 недель в зависимости от сезона, региона и устойчивости атмосферной циркуляции. Наиболее вероятными кандидатами увеличенной предсказуемости (extended range) являются в основном тропосферные блокирующие ситуации, с которыми, как правило, ассоциируются волны тепла, как это имело место и для рассмотренных выше случаев. На рис. 1е и 1ж приводятся карты пространственного распределения индекса WSDI, полученные по данным гидродинамического моделирования. Как видно, в контексте географической локализации прогностические и фактические (полученные по данным реанализа – рис. 1в и 1г) поля довольно хорошо согласуются друг с другом. Однако, по сравнению с фактическими, прогностические значения оказываются существенным образом заниженными. Помимо визуального сравнения весьма полезными могут оказаться расчетные методы. Остановимся на некоторых количественных оценках качества прогнозов более подробным образом.

4. Верификация прогнозов

Волны тепла можно представить как простые бинарные (дихотомические) да/нет события, а их прогнозы или предупреждения, в свою очередь, как да/нет категориальные прогнозы. В этих целях представим среднее по ансамблю значение индекса WSDI в виде переменной X , принимающей бинарные значения:

$$X = 1, \text{ если } WSDI > C,$$

$$X = 0, \text{ если } WSDI \leq C,$$

где c – пороговые значения, равные 5, 6, 7, 8, 9, 10 дням.

При всем разнообразии используемых статистик, основой для верификации прогнозов бинарных событий (категориальных прогнозов) служат двухвходовые таблицы сопряженности прогнозов и наблюдений конкретного явления (табл. 3). Подробный обзор мер качества для двухвходовых таблиц сопряженности представлен в [12, 19]. Среди характеристик таблиц сопряженности различают описательные и содержательные меры качества (descriptive and performance measures) [12]. Первые представлены «выборочной климатологией», или «наблюденной частотой явления» (base rate, sample climate), $clim = (a+c)/n$; и «прогностической частотой явления» (forecast rate), $for = (a+b)/n$. Ко вторым относятся «доля попаданий» (hit rate) $H = a/(a+c)$; «доля ложных тревог» $F = b/(b+d)$ и «критерий Пирса» (Peirce skill score) $PSS = H - F$. Заметим, что все числа таблицы сопряженности выражаются через четыре величины (H , F , p , n), в то время как все содержательные характеристики можно выразить всего через три величины (H , F , p).

Таблица 3. Таблица сопряженности для прогнозов и наблюдений (по данным реанализа) индекса волн WSDI (Пороговые значения: 5, 6, 7, 8, 9 и 10 дней)

Table 3. Contingency table for forecasts and observations (according to reanalysis) of the WSDI wave index (Thresholds: 5, 6, 7, 8, 9 and 10 days)

WSDI > порогового значения	Наблюдалось	Не наблюдалось	
Прогнозировалось	a (попадания)	b (ложные тревоги)	a + b
Не прогнозировалось	c (промахи)	d (верные отрицания)	c + d
	a + c	b + d	n = a + b + c + d

Для прогноза редких явлений, к которым относятся волны тепла, рекомендуется [12] использовать разнообразные характеристики таблиц сопряженности, в том числе показатели EDS (Extreme Dependency Score), EDI (Extremal Dependence Index) и их симметризованные варианты SEDS и SEDI. Воспользуемся наиболее простым показателем, а именно: индексом экстремальной зависимости EDI, который вместе со стандартным отклонением s выражается следующим образом:

$$EDI = \frac{\log F - \log H}{\log F + \log H}, \quad s = \frac{2 \left| \log F + \left(\frac{H}{1-H} \right) \log H \right|}{H (\log F + \log H)^2} \sqrt{\frac{H(1-H)}{np}}.$$

В предположении нормальности распределения стандартные ошибки s , будучи умноженными на 1,96, дают приблизительную оценку 95%-ного доверительного интервала. В [4] подчеркиваются основные преимущества индекса EDI, определяемые такими его свойствами, как «статистическая обоснованность», невырожденность предела, независимость от частоты явления, регулярность, асимптотическая объективность и т. д.

При расчетах используется метод агрегирования, или пулинга, при котором игнорируются различия между пространственными и временными измерениями, и выборки по всем точкам 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, для которых проводится агрегирование, обозначены ранее.

На рис. 2 приводятся оценки качества прогноза (EDI и s) как функции от пороговых величин совместно с относительными выборочными частотами рассматриваемых событий. Для выбранного интервала от 5 до 10 дней поведение EDI вполне закономерно: качество прогноза «падает» вместе с ростом порога, а стандартные ошибки s быстро растут. Вырождение EDI к нулевому значению с учетом доверительных интервалов отмечается для региона Европа примерно на интервале 7 дней, для европейской России и Западной Сибири – 10 дней. Более медленное «падение» качества в последнем случае, возможно, связано с тем, что в процентном отношении на долю волн тепла продолжительностью более 10 дней для европейской России и Западной Сибири приходится более 40 %, для Европы – около 30 % всех рассмотренных случаев. Таким образом, небольшой «выигрыш» в качестве получен для региона европейской России и Западной Сибири, где (по сравнению с Западной Европой) наблюдались более интенсивные и более устойчивые (в течение нескольких месяцев) аномалии температуры воздуха, занимающие значительную по площади территорию.

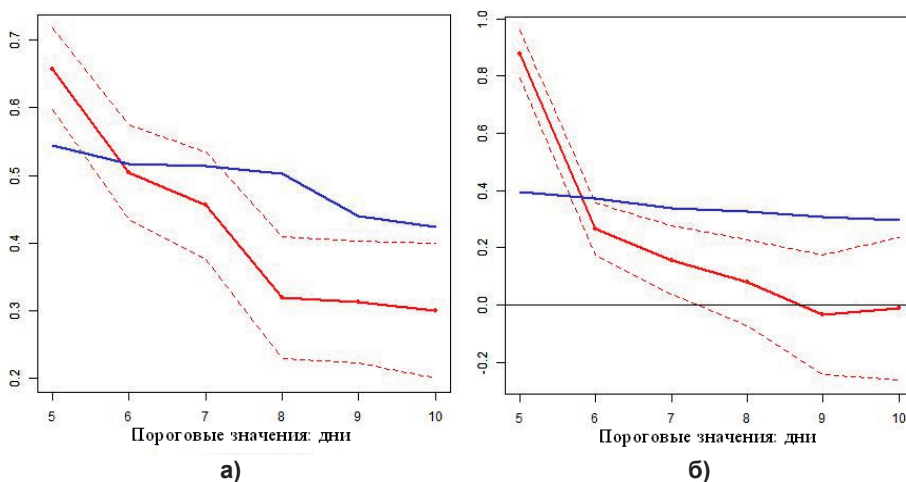


Рис. 2. График зависимости параметра EDI (красным цветом) и его стандартного отклонения s (пунктиром), а также относительных выборочных частот (синим цветом) от пороговых значений (в днях) для регионов: европейская Россия – Западная Сибирь, начальная дата прогноза 21 июля 2016 г. (а) и Западная Европа, начальная дата прогноза 5 июля 2018 г. (б).
Fig. 2. The dependence of the EDI parameter (in red), its standard deviation s (dotted line) and the relative sampling frequencies (in blue) from the threshold values (in days) for the regions: European Russia – Western Siberia, the forecast start date is July 21, 2016 (a); Western Europe, the forecast start date is July 5, 2018 (б).

Заключение

Экстремальные метеорологические явления, такие как волны тепла и холода, оказывают существенное влияние на различные сферы жизни общества. Трудности прогнозирования метеорологических экстремумов определяются участием в процессе их формирования огромного количества разномасштабных, взаимовлияющих геофизических факторов, взаимодействие которых трудно описать математически. Отсутствие общепринятых определений и достаточно длительных рядов наблюдений существенно затрудняет анализ пространственно-временной изменчивости, как на основе данных наблюдений, так и гидродинамического моделирования. Преодоление данных трудностей и улучшение качества прогнозов метеорологических экстремумов являются приоритетными задачами национальных метеорологических служб погоды. Рассмотренные выше примеры прогнозов волн тепла, наблюдавшихся на фоне устойчивых режимов атмосферной циркуляции, на базе модели ЕЦСПП свидетельствуют о наличии полезного сигнала на внутрисезонных (до 45 суток) интервалах времени. Для получения более полной картины относительно возможностей прогнозирования волн тепла необходимо продолжить исследование с использованием более представительных выборок, в том числе – мультимодельного ансамбля и вероятностных оценок предсказуемости.

Работа по оценке прогнозов волн тепла на фоне устойчивых режимов атмосферной циркуляции выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (грант №17-05-01227).

Обзор климатических индексов, характеризующих температурный режим, выполнен при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (грант №17-05-41043).

Список литературы

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Оценка возможного вклада глобального потепления в генезис экстремально жарких летних сезонов на Европейской территории РФ // Известия РАН. ФАО. 2011. Т. 47, № 6. С. 717-721.
2. Муравьев А.В., Куликова И.А., Реснянский Ю.Д. Синхронные и асинхронные связи между аномалиями поверхностных вод Северной Атлантики и особенностями крупномасштабной атмосферной циркуляции над Северным полушарием // Метеорология и гидрология. 2010. № 2. С. 5-25.
3. Муравьев А.В., Куликова И.А. Взаимосвязь суммарных осадков над Евразией с центрами действия атмосферы Северного полушария и главными модами изменчивости температуры поверхности Северной Атлантики // Метеорология и гидрология. 2011. № 5. С. 5-16.
4. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Бундель А.Ю., Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В. Верификация прогнозов метеорологических явлений со значительными воздействиями в районе проведения Олимпиады «Сочи-2014». Часть I: Детерминированные прогнозы в тестовый период // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 31-48.
5. Рочева Э.В., Смирнов В.Д. О тенденциях в изменениях продолжительности «волн тепла» на территории России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2013. Том 25. С. 94-114.

6. Срезневский Б.И. 1885 г. <http://alcala.ru/brokgauz-slovari/izbrannoe/slovar-S/S8088.shtml>
7. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
8. Barnston A.G., Mason S.J. Evaluation of IRI's seasonal climate forecasts for the extreme 15% tails // *Wea. Forecasting*. 2011. Vol. 26. P. 545-554.
9. Barnston G., Livezey R.E. Classification, seasonality and low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Wea. Rev.* 1987. Vol. 115. P 1083-1126.
10. Changnon, S.A., Kunkel K.E., Reinke B.C. Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. Vol. 177. P. 1497-1506.
11. Ellis F.P. Mortality from heat illness and heat aggravated illness in the U.S. // *Environ. Res.* 1972. Vol. 5. P. 1-58.
12. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide / Ian T. Jolliffe, David B. Stephenson (Eds). John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.
13. Kushnir Y., Robinson W.-A., Bladé L., Hall N.-M., Peng S., Sutton R. Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation // *J. Climate*. 2002. Vol. 15. P. 2233-2256.
14. Pepler A.S., Diaz L.B., Prodhomme C., Doblas-Reyes F.J., Kumar A. The ability of a multi-model seasonal forecasting ensemble to forecast the frequency of warm, cold and wet extremes // *Weather and Climate Extremes*. 2015. Vol. 9. P. 68-77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.06.005>
15. Perkins S.E., Alexander L.V. On the Measurement of Heat Waves // *J. Climate*. 2013. Vol. 26, no. 13. P. 4500-4517.
16. Robinson P.J. Definition of a Heat Wave // *J. Appl. Meteorol.* 2000. Vol. 40. P. 762-775.
17. Saha S., Van den Dool H.M. A Measure of Practical Limit of Predictability // *Mon. Wea. Rev.* 1988. Vol. 116. P. 2522-2526.
18. Vitart F. Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 140. P. 1889-1899.
19. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. London: Academic Press, 2011. 676 p.

References

1. Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. Estimation of Probable Contribution of Global Warming to the Genesis of Abnormally Hot Summers in the European Part of Russia. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 661-664, doi: 10.1134/S0001433811060065.
2. Murav'ev A.V., Kulikova I.A., Resnyanskii Yu.D. Synchronous and asynchronous relations between the North Atlantic SSTA and the Northern Hemisphere large-scale circulation features. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 2, pp. 79-93, doi: 10.3103/S1068373910020019.
3. Murav'ev A.V., Kulikova I.A. Interrelation of total precipitation over Eurasia with atmospheric centers of action of the northern hemisphere and with major modes of the North Atlantic surface temperature variability. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 5, pp. 285-293, doi: 10.3103/S1068373911050013.
4. Murav'ev A.V., Kiktev D.B., Bundel' A.Yu., Dmitrieva T.G., Smirnov A.V. Verification of high-impact weather event forecasts for the region of the Sochi-2014 Olympic Games. Part I: Deterministic forecasts during the test period. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 9, pp. 584-597, doi: 10.3103/S1068373915090034.
5. Rocheva E.V., Smirnov V.D. On tendencies in the duration of "heat waves" in Russia. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem [Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling (PEMEM)]*, 2013, vol. 25, pp. 94-114. [in Russ.].
6. Sreznevsky I.B., 1885, <http://alcala.ru/brokgauz-slovari/izbrannoe/slovar-S/S8088.shtml>

7. Khromov S.P., Mamontova L.I. Meteorologicheskii slovar'. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 568 p. [in Russ.].
8. Barnston A.G., Mason S.J. Evaluation of IRI's seasonal climate forecasts for the extreme 15% tails. *Wea. Forecasting*, 2011, vol. 26, pp. 545-554.
9. Barnston G., Livezey R.E. Classification, seasonality and low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, vol. 115, pp. 1083-1126.
10. Changnon, S.A., Kunkel K.E., Reinke B.C. Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, vol. 177, pp. 1497-1506.
11. Ellis F.P. Mortality from heat illness and heat aggravated illness in the U.S. *Environ. Res.*, 1972, vol. 5, pp. 1-58.
12. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide / Ian T. Jolliffe, David B. Stephenson (Eds). John Wiley & Sons Ltd, 2012, 274 p.
13. Kushnir Y., Robinson W.-A., Bladé I., Hall N.-M., Peng S., Sutton R. Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation. *J. Climate.*, 2002, vol. 15, pp. 2233-2256.
14. Pepler A.S., Díaz L.B., Prodhomme C., Doblas-Reyes F.J., Kumar A. The ability of a multi-model seasonal forecasting ensemble to forecast the frequency of warm, cold and wet extremes. *Weather and Climate Extremes*, 2015, vol. 9, pp. 68-77, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.06.005>.
15. Perkins S.E., Alexander L.V. On the Measurement of Heat Waves. *J. Climate*, 2013, vol. 26, no. 13, pp. 4500-4517.
16. Robinson P.J. Definition of a Heat Wave. *J. Appl. Meteorol.*, 2000, vol. 40, pp. 762-775.
17. Saha S., Van den Dool H.M. A Measure of Practical Limit of Predictability. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, vol. 116, pp. 2522-2526.
18. Vitart F. Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2014, vol. 140, pp. 1889-1899.
19. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. London: Academic Press, 2011, 676 p.

Поступила в редакцию 08.01.2019 г.
Received by the editor 08.01.2019.