

ПРОГНОЗ ВОЛН ТЕПЛА И ХОЛОДА ДЛЯ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА В.Ф. МАРТАЗИНОВОЙ «ПЛАВАЮЩИЙ АНАЛОГ»

С.В. Морозова

*Саратовский национальный исследовательский
государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
swetwl@yandex.ru*

Введение

Проблема долгосрочного прогнозирования погоды ввиду сложности природных механизмов, вызывающих регулярные непериодические изменения погодного режима, до сих пор остается далекой от своего решения. Проводится ряд исследований, направленных на повышение качества и увеличение заблаговременности прогностической информации. В Гидрометцентре России в рамках Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) на основе численного моделирования ведутся работы по составлению долгосрочных прогнозов с месячной и сезонной пролонгацией как глобально, так и для отдельных регионов [3, 5, 6].

В прогнозировании погоды на месяц и сезон с помощью гидродинамических моделей имеются несомненные успехи, разработаны новые и хорошо зарекомендовавшие себя методы региональной детализации сезонных прогнозов, однако экстремумы метеорологических величин гидродинамическими методами прогнозируются с меньшей успешностью. Можно назвать работу [7] – одну из последних, подтверждающих это утверждение. Использование физико-статистических и других эмпирических методов в прогнозе элементов погоды на долгие сроки все еще представляет научный и практический интерес.

По-прежнему важной и актуальной остается задача долгосрочного прогноза хода элементов погоды в течение месяца с максимально большой заблаговременностью и степенью детализации. Информативная ценность таких прогнозов наиболее высока, тем более что наблюдается постоянный рост заинтересованности потребителей различных секторов экономики в прогностической продукции такого вида.

В настоящей статье на примере Саратовской области показана возможность долгосрочного прогнозирования резких изменений средней суточной температуры с заблаговременностью до двух месяцев с использованием физико-статистического подхода. Долгосрочный прогноз резких изменений температуры особенно важен, так как при них очень часто происходят стихийные и опасные явления погоды – шквалистые усиления ветра, сильные ливни и снегопады, туман, гололед, заморозки, а также перестройка атмосферной циркуляции и, как правило, смена одного синоптического процесса другим.

Изучение обширной литературы, посвященной исследованию резких перепадов средней суточной температуры, позволило автору сделать вывод о том, что наиболее простой, удобной и наглядной формой представления резких перепадов средней суточной температуры являются волны тепла (холода). Термин «волна холода» впервые был введен в России Б.И. Срезневским [15] в 80-х гг. XIX века. За волну холода принималось понижение температуры воздуха на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ за сутки. Впоследствии многочисленные авторы, занимающиеся подобными исследованиями, для выделения волн тепла и холода предлагали свои критерии, различающиеся величиной перепада средней суточной температуры ото дня ко дню или по отношению к норме. Например, Д.А. Педем [4] за волну тепла или холода принималась аномалия средней суточной температуры воздуха по сравнению с ежедневной нормой на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более. Ю.Б. Храбров [17] считал волной тепла (холода) изменение температуры воздуха на величину, равную 2σ , продолжительностью не менее двух дней. В работах по изучению волн тепла и холода, выполненных для Нижнего Поволжья [1], особо выделялись интенсивные, при которых перепад средней суточной температуры составлял $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более.

Статистический анализ волн тепла и холода, выполненный ранее для отдельных пунктов Саратовской области, показал, что средняя продолжительность и теплых, и холодных волн составляет 4 дня; и теплые, и холодные волны распространяются по территории области за 1–1,5 суток [9]. Исследование интенсивности (перепад температуры при волне) волн позволило заключить [9], что зимой 85 % теплых волн и 90 % холодных имеют интенсивность 5 °С и более. Летом, весной и осенью три четверти волн имеют аналогичную интенсивность. Наибольшую повторяемость имеют волны с перепадом температур 5–9 °С.

На основании этого при разработке схемы прогноза за реперный пункт принят г. Саратов, а волной тепла (холода) считалось повышение (понижение) средней суточной температуры воздуха на 5 °С и более продолжительностью не менее двух дней. Если волна тепла (холода) перебивается одним днем похолодания (потепления) или изотермии, то такие случаи считаются одной волной тепла (холода). Перепад средней суточной температуры воздуха принимался за интенсивность волны. Волны с перепадом температур больше 10 °С названы интенсивными.

Основным методическим приемом использования физико-статистических методов в долгосрочном прогнозировании [14] является следующее. Для выявления прогностических зависимостей и построения расчетной схемы используются самые яркие, характерные, четко выраженные состояния предиктанта, которые позволяют в дальнейшем прогнозировать его и другие состояния, более «размытые». Поэтому в нашем случае изначально расчетная схема строится с использованием только интенсивных волн (перепад температур более 10 °С), а в дальнейшем прогнозируются волны и с меньшим перепадом (5 °С и более).

Рабочими материалами для составления прогноза стали данные объективного анализа (OAN25), размещенные на ftp-сервере Гидрометцентра России в коде GRIB, а также архив средних суточных температур воздуха по метеостанциям Саратовской области.

Файлы с закодированными данными обрабатываются пакетом программ, после чего формируется электронный архив ежедневных значений давления воздуха на уровне моря в узлах регулярной

сетки $5 \times 5^\circ$. Рабочим пространством является территория I естественного синоптического района, ограниченная меридианами 30° з. д. и 70° в. д. и параллелями 40° и 70° с. ш. Данные о давлении воздуха на уровне моря соответствуют метеорологическому сроку 00 ч по Гринвичу.

Первым этапом работы расчетной схемы является формирование рабочих выборок. Из постоянно пополняющегося архива средних суточных температур воздуха в результате работы оригинальной программы WOLNA в каждом календарном месяце выбираются дни резких перепадов средних суточных температур. Алгоритм работы указанной программы подробно изложен в [10]. Согласно результатам, полученным по расчетам программы WOLNA, формируются совокупности (классы) полей давления отдельно для каждого месяца для случаев резких потеплений и резких похолоданий. Для лучшего представления процесса потепления (похолодания) при описании волны выбирается по два поля для каждой – день до наступления экстремума волны и день экстремума волны. Напомним, что в данном случае на начальном этапе построения расчетной схемы из всех волн выбираются интенсивные, с перепадом температур 10°C и более. Таким образом, в каждом месяце имеем по три класса непересекающихся барических полей:

- $X_1 = (X_{11}, X_{12}, X_{1ml})$ – класс потеплений,
- $X_2 = (X_{21}, X_{22}, X_{2ml})$ – класс похолоданий,
- $X_3 = (X_{13}, X_{23}, X_{3ml})$ – все остальные поля.

В дальнейшем в работе расчетной схемы участвуют только первые два класса барических полей. При этом выборка полей давления, соответственно, для волн тепла и холода отдельно для каждого месяца имеет вид:

$$X = \{X(z)\} = (X(1), X(2), \dots, X(k)), \quad 1 < z < k,$$

где k – число выбранных полей, равное удвоенному количеству волн.

$X(k)$ – конкретное поле из архива, представленное в виде матрицы:

$$X(k) = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{vmatrix},$$

где x_{mn} – значение давления в узле регулярной сетки; m – число параллелей; n – число меридианов.

Вторым этапом расчетной схемы является выделение «эталонного» поля, т. е. такого поля в каждой конкретной совокупности, которое наилучшим образом описывает все поля, входящие в нее. В качестве меры сходства между барическими полями выбрано евклидово расстояние. За эталон принимается то поле, расстояние от которого до всех остальных полей этого класса наименьшее. Расчеты по выявлению эталонного поля проводятся по следующим формулам:

$$C(i, p) = \frac{1}{q} \sqrt{\sum_{j=1}^q (x(i, j) - x(p, j))^2}; \quad i, p = 1; \quad q = 147, \quad (1)$$

где $C(i, p)$ – параметр близости (удаленности) между i -м и p -м барическими полями; $x(i, j)$, $x(p, j)$ – значения давления в j -й точке i -го и p -го полей; k – число выбранных полей; q – число узлов регулярной сетки.

$$S(i) = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k C(i, p). \quad (2)$$

Наименьшие значения $C(i, p)$ и $S(i)$ указывают, что i -е поле наиболее близко ко всем p -полям, и поэтому его можно считать эталоном для всех полей в каждой конкретной совокупности. В результате расчета получены матрицы параметров близости (удаленности) для каждого месяца. Члены первой строки матрицы указывают на близость (удаленность) первого поля к остальным, члены второй строки – на близость (удаленность) второго поля к остальным. Значения на главной диагонали матрицы равны нулю, так как указывают на совпадение полей. Все нечетные строки матриц соответствуют полям за день до наступления экстремума

волны, все четные – дням экстремума волны. За эталон принималось сразу два поля с наименьшими значениями параметров $C(i, p)$ и $S(i)$ в сумме.

Как пример, ниже в табл. 1 представлены даты эталонных полей волны тепла и холода, полученных на материалах 2005–2010 гг. для центральных месяцев сезонов.

Таблица 1

Даты эталонных полей

Месяц	Дата эталонного поля	
	волны тепла	волны холода
Январь	8, 9 января 2005 г.	26, 27 января 2009 г.
Апрель	19, 20 апреля 2005 г.	26, 27 апреля 2010 г.
Июль	11, 12 июля 2006 г.	6, 7 июля 2009 г.
Октябрь	2, 3 октября 2007 г.	10, 11 октября 2008 г.

В качестве примера приведем матрицу для определения эталонного поля давления интенсивной волны тепла в январе (табл. 2).

Согласно табл. 2, в соответствии с принятыми критериями за эталонное поле интенсивной волны тепла января приняты 8, 9 января 2005 г. Подобным определены эталонные поля – наиболее типичные поля, определяющие резкие потепления и резкие похолодания в каждом календарном месяце.

Так, для зимы было получено, что интенсивные потепления могут определяться южными частями полярнофронтовых циклонов, а также к резким и продолжительным потеплениям может приводить процесс стационарирования теплых фронтов вдоль западной периферии зимнего Азиатского антициклона. Данный процесс отражает региональную особенность циркуляции Нижнего Поволжья. Наибольшую повторяемость этот процесс имеет в феврале, при этом волна тепла сопровождается сильными снегопадами и метелями. Резкие интенсивные похолодания зимой происходят в результате мощных вторжений холодных воздушных масс в тыловой части глубоких циклонов, смещающихся с восточной составляющей и стационарирующих на северо-востоке ЕТР.

**Значения параметра близости (удаленности) приземных полей давления
интенсивных волн тела января**

Дата	Значения параметра $S(t, p)$																		
	1,24	0,0	1,24	0,88	1,03	0,75	0,66	0,88	1,09	0,55	0,93	0,94	0,73	0,87	0,76	0,86	0,79		
8.01.05	0,0	1,24	0,88	1,03	0,75	0,66	0,88	1,09	0,55	0,93	0,94	0,73	0,87	0,76	0,86	0,79			
9.01.05	1,24	0,0	0,69	0,81	0,85	0,78	0,85	0,55	0,94	0,88	0,67	0,61	1,02	0,92	0,70	0,79			
13.01.06	0,88	0,69	0,0	1,28	0,74	0,74	1,35	0,89	0,97	1,32	1,15	1,94	0,65	1,27	1,30	0,93			
14.01.06	1,03	0,81	1,28	0,0	1,09	0,88	0,75	1,14	1,19	1,16	0,85	2,00	0,94	1,54	1,09	0,95			
30.01.06	0,75	0,85	0,74	1,09	0,0	0,78	1,05	1,33	0,97	1,26	0,87	1,77	1,14	1,62	1,32	1,16			
31.01.06	0,66	0,78	0,74	0,88	0,78	0,0	0,90	0,88	0,90	0,92	1,03	1,79	1,58	1,41	1,36	1,32			
2.01.07	0,88	0,85	1,35	0,75	1,05	0,90	0,0	0,96	1,09	0,80	0,87	1,01	1,54	1,50	1,34	1,01			
3.01.07	1,09	0,55	0,89	1,14	1,33	0,88	0,96	0,0	0,95	1,20	1,11	0,89	1,16	1,42	1,53	1,34			
14.01.08	0,55	0,94	0,97	1,19	0,97	0,90	1,09	0,95	0,0	1,32	1,31	1,84	1,06	1,39	1,18	0,81			
15.01.08	0,93	0,88	1,32	1,16	1,26	0,92	0,80	1,20	1,32	0,0	1,15	1,95	1,03	1,53	1,17	0,87			
27.01.08	0,94	0,67	1,15	0,85	0,87	1,03	0,87	1,11	1,31	1,15	0,0	1,88	0,84	1,31	1,14	1,26			
28.01.08	0,73	0,61	1,94	2,00	1,77	1,79	1,01	0,89	1,84	1,95	1,88	0,0	1,07	1,28	1,19	1,33			
16.01.09	0,87	1,02	0,65	0,94	1,14	1,58	1,54	1,16	1,06	1,03	0,84	1,07	0,0	1,23	0,94	1,01			
17.01.09	0,76	0,92	1,27	1,54	1,62	1,41	1,50	1,42	1,39	1,53	1,31	1,28	1,23	0,0	0,97	0,92			
9.01.10	0,86	0,70	1,30	1,09	1,32	1,36	1,34	1,53	1,18	1,17	1,14	1,19	0,94	0,97	0,0	1,00			
10.01.10	0,79	0,79	0,93	0,95	1,16	1,32	1,01	1,34	0,81	0,87	1,26	1,33	1,01	0,92	1,00	0,0			
$\Sigma C(t, p)$	12,96	12,34	16,10	16,70	16,70	15,93	15,90	16,44	16,47	17,49	16,38	21,28	16,08	19,07	17,09	15,49			
$S(t)$	0,86	0,82	1,07	1,11	1,04	1,06	1,06	1,09	1,94	1,06	1,09	1,42	1,07	1,27	1,14	1,03			

Также резкие похолодания в Саратове и области имеют место, когда осуществляется мощное ультраполярное вторжение арктического воздуха с Карского моря в виде уже оформившегося антициклона. При таком типе процесса волна холода обусловлена не только холодной восточной периферией антициклона, но и сильным радиационным выхолаживанием в условиях безоблачного неба.

Весной интенсивные волны тепла, как и зимой, определяются теплыми секторами полярнофронтальных депрессий, однако интенсивное потепление весной может быть обусловлено совместным влиянием широкого теплого сектора полярнофронтального циклона и западной периферией стационарного антициклона над Казахстаном. Волны холода в весенние месяцы, как и в зимние, могут быть вызваны и арктическими ядрами, и вторжениями холодного воздуха в тылу циклонов.

Интересной особенностью эталонных полей давления волн тепла летних месяцев является то, что они по большей части определяются областью повышенного давления субтропического происхождения. Резкие волны холода летом определяются теми же процессами, что зимой и весной. Однако холодные волны имеют малую продолжительность, так как летом в условиях сухого климата Нижнего Поволжья и в результате большого прихода солнечной радиации в течение двух-трех суток происходит трансформация прежнего арктического воздуха в местный тропический, и может надолго установиться засушливый режим [13]. В данном случае при долгосрочном прогнозировании учет местных особенностей очень важен.

Синоптический анализ эталонных полей давления осенних месяцев показал, что интенсивные волны тепла определяются выносом теплого воздуха в передних частях мощных полярнофронтальных депрессий, а волны холода – прорывами арктического воздуха в виде тыловых вторжений за холодными фронтами или в виде заключительного антициклона циклонической серии.

На рис. 1 представлены эталонные поля волн тепла и холода января. Как видно из рис. 1 а, резкое потепление на территории Саратовской области, а также в Среднем и Нижнем Поволжье определялось южной частью мощной полярнофронтальной депрессии, при этом экстремум волны тепла отмечался после

прохождения через пункт наблюдения (метеостанция Саратов Юго-Восток) теплового фронта. Отметим, что данная эталонная ситуация резкого потепления характерна практически для всех месяцев.

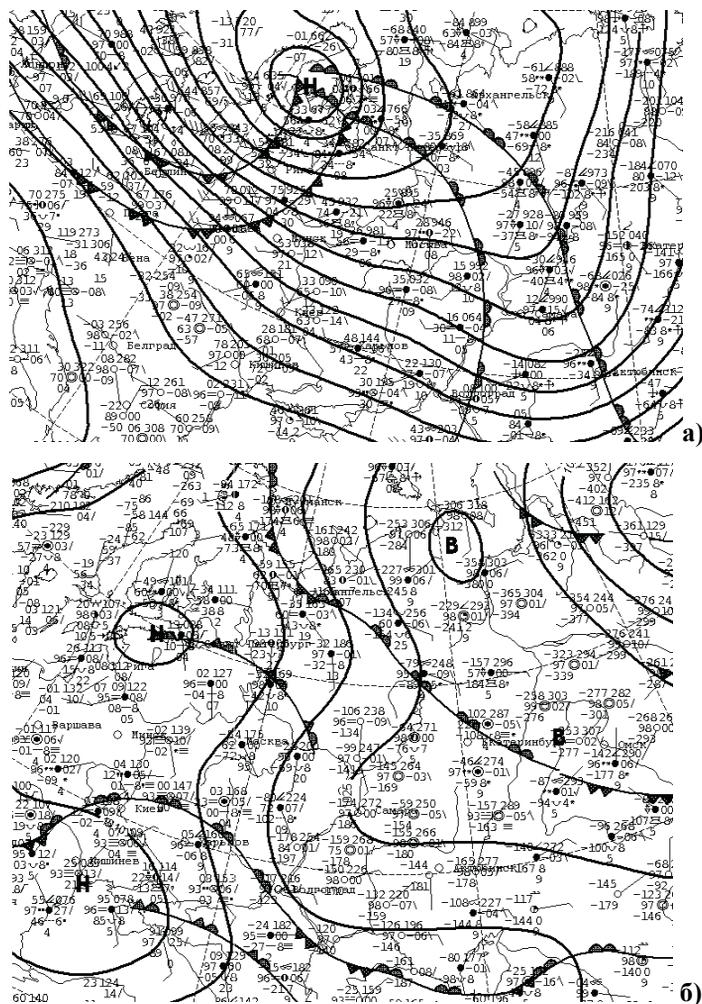


Рис. 1. Эталонные поля давления резких потеплений (а) и похолоданий (б) в январе: фрагмент приземной карты 9 января 2005 г. (а); 27 января 2009 г. (б).

Эталонное поле давления интенсивной волны холода (рис. 1 б) отражает процесс ультраполярного вторжения на территорию Нижней и Средней Волги, что также является характерным для региона.

Тестирование полей-эталонов на распознавание себе подобных проводилось на зависимом (2005–2010 гг.) и независимом (2011–2015 гг.) материале. Для этого каждое эталонное поле сравнивалось с ежедневными барическими полями одноименного месяца с помощью параметра близости (удаленности) $C(i, p)$. Наименьшие значения параметра указывают на день экстремума волны. При проверке распознавание волны тепла (холода) считалось правильным, если время осуществления экстремума волны либо совпадало с днем прогноза, либо сдвиг не превышал ± 2 дня. При этом должно произойти повышение (понижение) температуры во время волны не менее чем на 5°C . Оправдываемость эталонных полей давления определялась как отношение числа оправдавшихся случаев к их общему числу, выраженное в процентах. Определенная подобным образом информативность эталонных полей давления представлена в табл. 3.

Таблица 3

Оправдываемость (%) эталонных полей давления по сезонам

Сезон	Оправдываемость (%) эталонных полей						Общее число случаев	
	зависимый ряд		независимый ряд		среднее			
	ВТ	ВХ	ВТ	ВХ	ВТ	ВХ	ВТ	ВХ
Зима	69	63	65	61	67	62	80	75
Весна	77	75	77	74	77	75	61	44
Лето	71	70	76	71	74	71	77	75
Осень	78	77	72	70	75	76	94	96
Год	74	71	73	69	73	70	312	290

На основании табл. 3 можно заключить, что во все сезоны года распознавание ситуаций, определяющих потепление, происходит несколько лучше, чем распознавание ситуаций, определяющих похолодание. Информативность эталонов в зимние месяцы

получилась несколько ниже, чем во все остальные. Весной, летом и осенью оправдываемость эталонных полей примерно одинакова. Пониженная оправдываемость эталонных полей зимой может указывать на наличие еще одного или нескольких вариантов барических полей, имеющих более низкую вероятность осуществления, чем эталонное поле, и также вызывающих резкие перепады температуры воздуха. В целом, поля-эталонны распознают 72 % всех тестируемых случаев.

Таким образом, оправдываемость эталонных полей хорошая, анализ синоптических ситуаций подтверждает правильность объективного выделения эталонов. Это дает возможность использовать их в составлении расчетных физико-статистических схем при долгосрочном прогнозе экстремумов метеорологических величин [11, 12]. Однако сами эталоны показательны только лишь при классификации и диагнозе атмосферных процессов. Для того, чтобы применять эталоны в прогностической практике, необходимо найти для них информативные предикторы.

На *третьем* этапе составления прогнозов резких изменений температуры в течение месяца выявленным эталонным полям необходимо найти аналоги. Метод аналогов является наиболее универсальным в долгосрочном прогнозировании погоды. Этот метод привлекает внимание своей кажущейся простотой, физической очевидностью и позволяет автоматически учесть многие линейные и нелинейные связи системы океан – атмосфера – суша. В отличие от традиционного способа подбора аналога [2, 14], В.Ф. Мартазинова существенно расширила принцип аналогичности, потребовав лишь наилучшего геометрического подобия фигур планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) аналога и текущего синоптического процесса, допуская их географическое несовпадение. На основании нового подхода к принципу аналогичности ею разработан метод «плавающего аналога». Дальнейшие исследования позволили заключить, что оптимальным временным интервалом по применению «плавающего аналога» является интервал, приблизительно равный двум месяцам [8, 18]. Таким образом, методической основой отыскания аналоговых полей выбрана двухмесячная квазипериодичность атмосферных

процессов, физически и математически обоснованная проф. В.Ф. Мартазиновой, в сочетании с новым принципом аналогичности.

При отыскании аналогов эталонным полям интенсивных волн тепла и холода используются ежедневные приземные поля давления месяцев, отстоящих на один назад от исходных. Исходным считается месяц с эталонным полем. При этом допускается их географическое несовпадение при наилучшем сходстве в распределении знака барического поля. Аналоги подбираются при смещении полей на $\pm 15^\circ$ по меридиану ($\Delta\varphi$) и на $\pm 60^\circ$ вдоль круга широты ($\Delta\lambda$). При таком смещении наиболее полно охватывается территория Естественного синоптического района, а также основные центры действия атмосферы – Исландский минимум, Азорский и Полярный максимумы, зимний Азиатский антициклон. Расчеты проводятся по оригинальной программе ANALOG. Программа выбирает наилучшее сходство в распределении знака барического поля возможных полей аналогов и эталонных, отмечая при этом географическое положение наилучшего аналога. Исследуются все возможные широтно-долготные комбинации аналоговых и эталонных полей. Степень аналогичности оценивается с помощью показателя ρ :

$$\rho = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \quad (3)$$

где N_+ и N_- – число узлов сетки, в которых аномалии сравниваемых полей совпадают или не совпадают по знаку.

Для определения наилучшего аналога и его пространственно-временного смещения рассчитывались матрицы наилучшей аналогичности с координатами смещения аналога относительно исходных полей. В качестве исходных полей берутся четыре поля, два из которых – эталонные поля давления, а два других – барические поля, отстоящие на один день вперед и на один день назад от эталонных. В качестве возможных аналогов исследуются шесть полей, отстоящих на два месяца назад от исходных. На основе матриц наилучшей аналогичности составляются таблицы, в которых исходным полям ставятся в соответствие четыре наилучших аналоговых поля, имеющих наибольший коэффициент подобия ρ с

исходными полями и совпадающих по направлению смещения по широте и долготе от одного дня к другому. Из возможных аналоговых полей выбираются два с максимальными значениями коэффициента подобия. В качестве примера в табл. 4 приведена матрица наилучшей аналогичности для подбора аналога эталонным полям давления интенсивных волн тепла января. Первая строка табл. 4 указывает лучшую степень связи между барическими полями 7 января и 6–11 ноября, вторая строка – степень связи между полями 8 января и 6–11 ноября, и так далее. При определении координат сдвига аналога относительно исходных полей приняты обозначения, представленные в [12].

Таблица 4

Максимальные значения критерия аналогичности ρ и смещение аналога (в цифрах кода) интенсивных волн тепла января

Дата исходных полей	Дата аналоговых полей											
	6 ноября		7 ноября		8 ноября		9 ноября		10 ноября		11 ноября	
	ρ	$\Delta\varphi$ $\Delta\lambda$	ρ	$\Delta\varphi$ $\Delta\lambda$	ρ	$\Delta\varphi$ $\Delta\lambda$	ρ	$\Delta\varphi$ $\Delta\lambda$	ρ	$\Delta\varphi$ $\Delta\lambda$	ρ	$\Delta\varphi$ $\Delta\lambda$
7 января	0,417	1 13	0,345	1 12	0,833	1 13	0,033	1 13	0,275	2 12	0,383	1 12
8 января	0,167	7 11	0,482	7 13	0,743	4 13	0,788	1 11	0,588	1 1	0,483	4 1
9 января	0,317	1 12	0,599	7 1	0,967	2 1	0,907	2 1	0,640	3 11	0,597	2 1
10 января	0,321	6 10	0,562	6 7	0,967	1 1	0,900	1 1	0,579	6 7	0,967	1 13

Из данных табл. 4 следует, что наилучшим аналогом барическому полю 8 января 2005 года является барическое поле 9 ноября 2004 года с коэффициентом связи 0,788, полю давления 9 января 2005 года – приземное поле 10 ноября с коэффициентом связи 0,640, причем аналоговые поля смещены относительно эталонных к югу и западу. Подобным образом выбираются аналоги эталонным полям выпадения волн тепла и холода для остальных месяцев. Укажем, что аналогом эталонным поля давления интенсивных волн холода января стали барические поля 27, 28 ноября 2008 года со слабым смещением относительно эталонных к северу (5°) и востоку (10°).

Анализ смещений аналогов относительно эталонов показал, что оно наблюдается практически всегда (и по меридиану, и вдоль круга широты). При этом выявлено, что аналоги теплых волн

имеют преимущественно южное смещение, холодных – северное, что является очевидным отражением того факта, что тепло распространяется с юга, а холод – с севера.

Аналоги, определенные на основе двухмесячной квазипериодичности атмосферных процессов по способу «плавающий аналог» несут прогностическую информацию об ожидаемых резких перепадах средней суточной температуры и являются предикторами в расчетных схемах детализации хода элементов погоды в течение месяца.

На *четвертом* этапе происходит составление самого прогноза. Для составления прогноза на конкретный месяц используются аналоговые поля давления, отвечающие за прогностическое осуществление резких перепадов средней суточной температуры в прогнозируемом, и ежедневные (текущие) поля давления месяца, отстоящего на один месяц назад от прогнозируемого (т. е. поля одноименных месяцев). С помощью показателя $C(i, p)$ сравниваются аналоговые и текущие поля и определяются даты, в которые значения параметра $C(i, p)$ наименьшие, что указывает на наилучшее сходство аналоговых и текущих полей в эти дни. Согласно полученным датам и по принципу двухмесячной квазипериодичности атмосферных процессов определяются в прогнозируемом месяце экстремумы волн тепла и холода. Даты с точностью ± 1 день дают указание на день резкого перепада средней суточной температуры – экстремум волны тепла (холода).

Допустим, для прогноза на январь используем аналоги, лежащие в ноябре, и сравниваем их с ежедневными (текущими) полями ноября по параметру $C(i, p)$. Если прогноз составляется на январь 2011 г., то определенные ранее аналоговые поля сравниваются с полями ноября 2010 г., если на январь 2014 г. – то с ежедневными полями ноября 2013 г., и т. п. Те из текущих полей, которые имеют наибольшее сходство с аналоговым полем, указывают на прогностические даты резких перепадов средней суточной температуры воздуха.

Так как по барическим полям ноября прогнозируются резкие перепады средней суточной температуры воздуха января, по

барическим полям марта – майские экстремумы волн тепла и холода, то уже 1–2 декабря имеем прогноз на январь, 1–2 апреля – на май, и т. д. Временной промежуток от первого апреля до первого мая составляет тридцать дней, а до 31 мая – примерно шестьдесят дней, поэтому заблаговременность прогноза оценивается до двух месяцев. Блок-схема составления прогноза представлена на рис. 2.

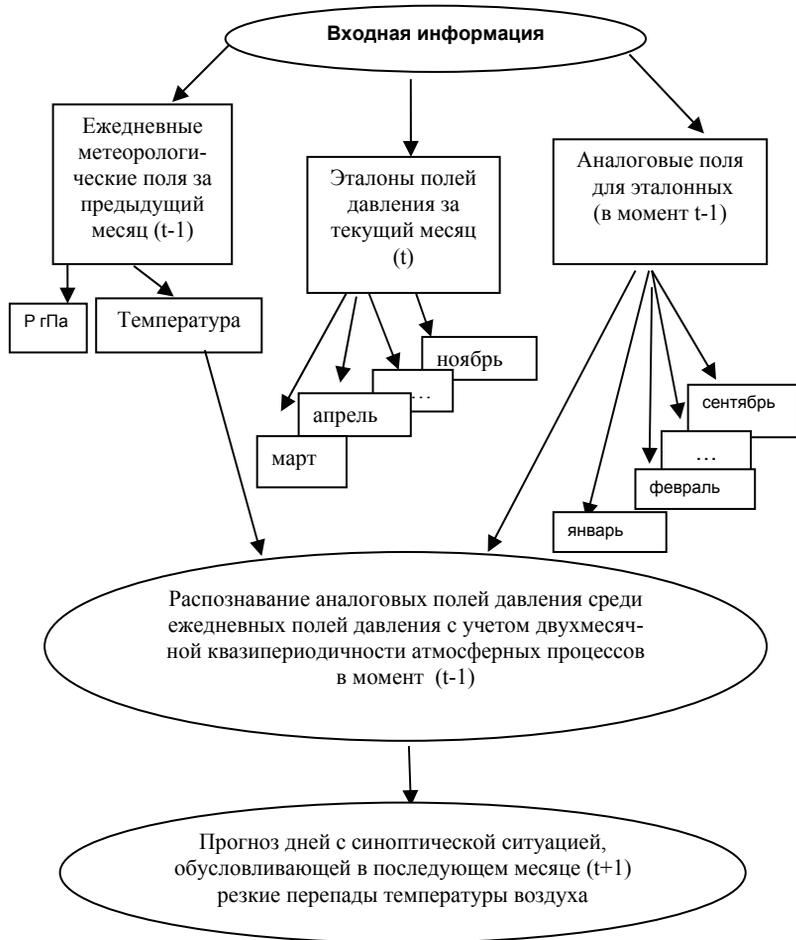


Рис. 2. Блок-схема составления прогноза резких перепадов средней суточной температуры воздуха.

В качестве примера рассмотрим составление прогноза резких перепадов средней суточной температуры воздуха на январь 2016 года. Для этого проведем сравнение аналоговых (9, 10 ноября 2004 г. для определения экстремумов волн тепла и 27, 28 ноября 2008 г. для определения экстремумов волн холода) и текущих полей месяца, отстоящего на один назад от прогнозируемого. Для прогноза на январь 2016 г. используем аналоги, лежащие в ноябре, и сравниваем их с ежедневными (текущими) полями ноября 2015 г. по параметру $C(i, p)$. Те из них, которые имеют наибольшее сходство с аналоговым полем, указывают на прогностические даты резких перепадов средней суточной температуры в январе 2016 года.

В табл. 5 приведены значения параметра $C(i, p)$ аналоговых и текущих полей ноября 2015 г., по которым составлен прогноз резких перепадов средней суточной температуры воздуха на январь 2016 года.

Таблица 5

Значения параметра близости (удаленности) аналоговых и текущих полей для прогноза экстремумов волн тепла и холода в январе 2016 г.

Число месяца	Значения параметра $C(i, p)$				Число месяца	Значения параметра $C(i, p)$			
	аналоги волн тепла		аналоги волн холода			аналоги волн тепла		аналоги волн холода	
	9.11.04	10.11.04	27.11.08	28.11.08		9.11.04	10.11.04	27.11.08	28.11.08
1	1,39	1,16	1,04	1,03	16	1,25	1,30	0,88	1,18
2	1,70	1,51	1,03	1,08	17	1,21	1,28	0,83	1,19
3	1,90	1,79	1,21	1,24	18	1,02	1,08	0,93	0,89
4	1,75	1,67	1,64	1,33	19	1,03	1,09	1,01	0,93
5	1,65	1,52	1,67	1,53	20	1,18	1,13	1,20	1,06
6	1,31	1,38	1,26	1,21	21	1,29	1,12	1,25	1,09
7	1,13	1,14	1,10	1,14	22	1,34	1,29	1,21	1,06
8	1,09	0,96	0,79	1,18	23	1,38	1,32	1,09	0,95
9	1,04	1,01	0,76	1,17	24	1,53	1,42	1,01	1,05
10	1,18	1,12	1,25	1,18	25	1,76	1,63	1,13	1,35
11	1,17	1,32	1,42	1,19	26	1,87	1,72	1,32	1,38
12	1,25	1,21	1,20	1,21	27	1,88	1,79	1,34	1,42
13	1,03	1,29	1,12	1,22	28	1,79	1,66	1,36	1,39
14	1,04	1,33	1,18	1,06	29	1,55	1,42	1,40	1,53
15	1,02	1,28	0,91	1,07	30	1,34	1,24	1,56	1,65

Так как по прошедшему ноябрю прогнозируются температурные условия января, то такие прогнозы имеют заблаговременность до двух месяцев.

Согласно данным табл. 5, в январе 2016 г. (прогноз составлен по ноябрю 2004 г. для волн тепла и по ноябрю 2008 г. для волн холода) ожидалось три волны тепла с экстремумами 8–9, 15 и 18–19 января и три волны холода с экстремумами 1–2, 16–17 и 23–24 января. По фактическим данным, в январе 2016 г. наблюдалось четыре волны тепла и четыре волны холода (рис. 3). Экстремумы теплых волн отмечались 9, 14, 19 и 31 января. При проверке волна тепла (холода) считалась оправдавшейся, если наблюдалось повышение (понижение) средней суточной температуры воздуха не менее, чем на 5 °С, а время осуществления экстремума волны либо совпадало с днем прогноза, либо сдвиг не превышал ± 2 дня. Согласно этому критерию, из всех волн тепла оказалась нерассчитанной последняя. Вполне возможно, что начавшееся в последних числах января потепление завершилось в феврале. Это обстоятельство можно рассматривать как одну из возможных причин того, что последняя теплая волна не была рассчитана.

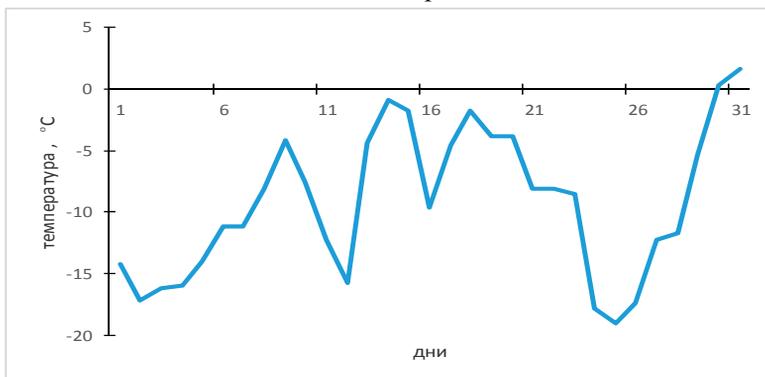


Рис. 3. Ход средней суточной температуры воздуха в январе 2016 г. по метеостанции Саратов Юго-Восток.

Экстремумы холодных волн наблюдались 2, 12, 16 и 25 января. Таким образом, оказалась не спрогнозированной вторая волна холода, пик которой пришелся на 12 января. Отметим, что резкие

перепады средней суточной температуры чаще всего происходят при прохождении атмосферных фронтов. Поэтому настоящую методику можно рассматривать как первые шаги в направлении долгосрочного прогнозирования прохождения через пункт наблюдения атмосферных фронтов, что является пионерским на мировом уровне. Как уже указывалось выше, при резких перепадах средней суточной температуры воздуха происходит резкая перестройка циркуляции. По предварительным исследованиям автора, в летние месяцы после интенсивной волны холода в 78 % случаев устанавливается блокирующий режим, имеющий продолжительность более пяти суток.

По описанной методике в оперативном режиме на кафедре метеорологии и климатологии СГУ с 2000 года составляются прогнозы хода элементов погоды в течение месяца. В табл. 6 приведена оправдываемость (показатель Q , %) прогнозов резких изменений средней суточной температуры.

Таблица 6

Оправдываемость (%) прогнозов волн тепла и холода

Месяц	Оправдываемость прогнозов, %						Общее число прогнозов	
	волн тепла			волн холода			волны тепла	волны холода
	завис. ряд	независ. ряд	среднее	завис. ряд	независ. ряд	среднее		
Январь	74	73	74	71	68	70	37	36
Февраль	71	62	67	71	68	70	27	26
Март	70	64	67	67	65	66	23	20
Апрель	73	70	72	68	63	66	21	19
Май	72	69	71	67	65	66	30	29
Июнь	72	70	71	75	70	78	27	36
Июль	72	70	71	69	70	70	38	39
Август	73	72	73	72	68	70	33	27
Сентябрь	79	73	76	78	67	73	41	35
Октябрь	73	60	67	69	68	69	29	31
Ноябрь	76	75	76	64	63	64	38	34
Декабрь	78	74	76	68	65	67	34	31
Год	74	69	72	70	67	69	378	354

Оправдываемость прогнозов волн тепла и холода, проведенных на материалах 2011–2015 гг., составила в среднем 71 % (табл. 6), $\rho = 0,42$. Учитывая довольно большую заблаговременность (от одного до двух месяцев) и очень жесткий критерий оправдываемости, прогнозирование резких перепадов средней суточной температуры воздуха данным методом проводится весьма успешно. Оценка показателя Q имеется в [12].

Несомненно, для обоснования целесообразности разработки вышеприведенных критериев оправдываемости явно недостаточно. Любой методический прогноз принято сравнивать с климатическими, случайными и инерционными прогнозами. К сожалению, из-за специфики объекта прогнозирования (волны тепла и холода, привязанные к дням осуществления их экстремумов) невозможно составить полные матрицы сопряженности для случайных прогнозов, поскольку не прогнозируется факт отсутствия явления. Также нельзя считать, что между днями осуществления волн тепла (холода) обязательно должны прогнозироваться волны противоположного знака. Поэтому применение критерия надежности по Н.А. Багрову, критерия точности по М.А. Обухову невозможно. Кроме того, понятие «климатические» волны тепла (холода) в метеорологии пока не разработано.

Однако есть возможность сравнить данный методический прогноз с инерционным, но не при строгой оценке несмещенности прогноза [16], а в несколько «облегченной» форме [2]. Инерционный прогноз на следующий месяц заключается в использовании фактических месячных аномалий температуры воздуха, атмосферных осадков и других характеристик в текущем месяце. В этом случае заблаговременность инерционного прогноза будет нулевой, так как прогноз составляется по фактической погоде текущего месяца. Если прогноз составляется с месячной заблаговременностью, то инерционным прогнозом будут характеристики погоды в месяце, предшествующем текущему [2].

Инерционные прогнозы на короткие и средние сроки (несколько дней) не лишены смысла и при устойчивой маломеняющейся макросиноптической ситуации могут иметь довольно высокую оправдываемость. Инерционные прогнозы с большой

заблаговременностью, как правило, имеют низкий уровень оправданности, и сравнение с ними методических прогнозов не проводится [2].

В качестве эксперимента автором составлен ряд инерционных прогнозов волн тепла и холода за период 2000–2010 гг. При этом прогностическим указанием осуществления волн тепла (холода), например марта, служили фактические волны тепла (холода) января. Расчет показателя Q инерционных прогнозов дал результат 51 %, что, безусловно, не свидетельствует об успешности инерционных прогнозов.

Рассчитав среднюю квадратическую ошибку инерционного прогноза (RMS_p) и среднюю квадратическую ошибку методического прогноза (RMS_f) за один и тот же ряд лет (2000–2010 гг.) для января, получен критерий RMSSS (rot-mean-square skill score), который оказался равен 46 %:

$$RMSSS = (1 - RMS_f/RMS_p) \cdot 100. \quad (4)$$

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Изучены синоптические условия осуществления волн тепла и холода с помощью объективного метода распознавания гидрометеорологических полей – метода эталонов, основанном на минимизации расстояния между барическими полями. Корректность объективного выделения эталонных полей подтверждена синоптическим анализом. Интенсивные потепления определяются выносом теплых воздушных масс в широких теплых секторах полярнофронтовых циклонов или отрогами субтропических ядер. Интенсивные похолодания – смещением на территорию свежих арктических ядер или поступлением холодных воздушных масс в тылу циклонов. Однако эталонные поля давления в каждом сезоне имеют свою специфику.

2. Расчетная физико-статистическая модель долгосрочного прогноза резких перепадов средней суточной температуры позволяет прогнозировать экстремумы волн тепла и холода

с заблаговременностью до двух месяцев. Успешность методического прогноза по показателю Q – 71 % ($\rho = 0,42$).

3. Разработанные информационная база и технологическое обеспечение позволяют создавать аналогичную прогностическую продукцию для различных регионов.

4. Показана необходимость дальнейших разработок адекватных способов оправдываемости данного вида прогностической продукции с учетом специфики объекта прогнозирования.

Список использованных источников

1. *Архангельский В.Л., Котова Л.М.* Волны холода и тепла в тропосфере и стратосфере над Нижним Поволжьем // Вопросы климата и погоды Нижнего Поволжья. Саратов. – 1966. – Вып. 4. – С. 35–45.

2. *Багров Н.А., Кондратович К.В., Педь Д.А., Узрюмов А.И.* Долгосрочные метеорологические прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 278 с.

3. *Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М.* Выпуск долгосрочных метеорологических прогнозов по арктическому региону в рамках деятельности северо-евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 361. – С. 7–28.

4. *Дуйцева М.А., Педь Д.А.* Особенности волн холода и тепла на Европейской территории СССР // Труды ЦИП. – 1963. – Вып. 123. – С. 34–62.

5. *Киктев Д.Б., Хан В.М., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А.* Технология выпуска долгосрочных прогнозов Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 358. – С. 36–58.

6. *Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А.* Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть I. Статистический анализ и гидродинамическое моделирование // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 3. – С. 5–22.

7. *Кислов А.В., Матвеева Т.А.* Экстремумы скорости ветра в европейском секторе Арктики // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 7. – С. 5–14.

8. *Мартазинова В.Ф.* Временная изменчивость ультрадлинных волн общей циркуляции атмосферы // Труды УкрНИГМИ. – 1987. – Вып. 225. – С. 78–84.

9. *Морозова С.В.* Волны тепла и холода над Нижним Поволжьем: Деп. в ВИНТИ, 20.02.96 г., № 185-В95.

10. Морозова С.В., Полянская Е.А., Пужлякова Г.А., Фетисова Н.А. Физико-статистический метод прогноза резких колебаний температуры воздуха в течение месяца. – Саратов: Изд-во СГУ, 2002. – 24 с.

11. Морозова С.В. Физико-статистический метод прогноза экстремумов метеорологических величин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2010. – № 14. – С. 50–59.

12. Морозова С.В. Технология долгосрочного прогноза периодов выпадения осадков для Саратовской области // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 358. – С.145–158.

13. Полянская Е.А. Синоптические процессы и явления погоды в Нижнем Поволжье. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1986. – 208 с.

14. *Руководство* по месячным прогнозам погоды. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 366 с.

15. Срезневский Б.И. Волны холода от Новой Земли до Персии, Индии и Якутской области // Метеорологический вестник. – 1899. – № 4. – С. 107–110.

16. Хандошко Л.А. Экономическая метеорология. – СПб.: Гидрометеоздат, 2005. – 490 с.

17. Храбров Ю.Б. Прогноз волн холода в Средней Азии на естественный синоптический период // Труды ЦИП. – 1949. – Вып. 19 (6). – С. 117–133.

18. Martasinova V.F. Extended range forecasting in Ukraine // 2^{eme} Conference Europeenne sur les Applications de la Meteorologie, Toulouse, France, 25–29 September 1995. – P. 116–117.

Поступила в редакцию 25.01.2017 г.