

О ТЕНДЕНЦИЯХ В ИЗМЕНЕНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ «ВОЛН ТЕПЛА» НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

*Э.В. Рочева, В.Д. Смирнов**

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, 20б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, *vsmirnov327@gmail.com

Реферат. Волны тепла рассмотрены как эпизоды длительных положительных аномалий температуры в широтной зоне 45°-55° с.ш. Рассчитаны основные характеристики «волн тепла» – интенсивность, повторяемость и продолжительность – в летний период. Проанализированы тенденции в изменении этих характеристик в условиях современного глобального потепления. Получены оценки связи продолжительности волн тепла с макроциркуляционными индексами, характеризующими основные моды колебаний в атмосфере, с индексом антициклональной циркуляции и с характеристиками теплового состояния Северной Атлантики. Сделан вывод о том, что долгоживущие летние аномалии тепла связаны с развитием в этих районах антициклональной циркуляции. Показано, что влияние теплового состояния Северной Атлантики в предшествующий холодный период проявляется в продолжительности крупных аномалий тепла на континенте во все месяцы летнего периода (с мая по август). Но расположение областей этих аномалий меняется от месяца к месяцу: в мае это центральные районы Сибири (90°-95° в.д.), в июне-июле – дальневосточный сектор 100°-140° в.д. Области влияния зимней Северной Атлантики отмечаются в западных районах России (30° в.д.) в июле; в августе они охватывают всю Европейскую часть России (30°-60° в.д.) и сектор 120°-140° в.д. Предполагается, что в будущем выявленные связи можно будет использовать при разработке вероятностного прогноза длительных аномалий тепла в широтной зоне 45°-55° с.ш.

Ключевые слова. Климат, температура воздуха, волны тепла, атмосферная циркуляция, теплосодержание океана, тепловое состояние океана.

ON TENDENCIES IN THE OF DURATION «HEAT WAVES» IN RUSSIA

*E.V. Rocheva, V.D. Smirnov**

Institute of Global Climate and Ecology, Roshydromet and RAS, 20b, ul. Glebovskaya, 107258 Moscow, Russia, *vsmirnov327@gmail.com

Abstract. A «heat wave» is considered as an event of long-lived anomaly of temperature in latitudes 45°-55° N. The main characteristics of summer heat waves, namely, intensity, frequency and duration, are calculated. Trends in these characteristics under recent global warming are analyzed. Relationships of heat wave duration to macrocirculation indices describing main modes of atmospheric oscillations, to anti-cyclonic circulation index and to thermal status of the North Atlantic ocean are obtained. Long-lived summer anomalies of temperature were found dependent on anti-cyclonic circulation. It is shown that thermal status of the North Atlantic ocean in the previous cold season (December to April) noticeably influences the duration of large continental temperature anomalies in all summer months (May to August). However, spatial layout of the anomalies changes is month specific: in May the anomalies are located in central regions of Siberia (90°-95° E), while in June and July they are located in Far East sector 100°-140° E. «Winter» North Atlantic ocean influences western regions of Russia (30° E) in July, while in August it affects all European part of Russia (30°-60° E) and sector 120°-140° E. It is planned that the relationships obtained can be used in future for probabilistic prediction of long-lived temperature anomalies in latitudes 45°-55° N.

Key words. Climate, air temperature, heat waves, atmospheric circulation, ocean heat content, thermal status of the ocean.

Введение

Проф. Б.И.Срезневский в 1885 г. (<http://alcala.ru/brokgauz-slovari/izbrannoe/slovar-S/S8088.shtml>) впервые указал на поступательное, подобное волне, смещение воздушных масс в Европейской части России. Вначале были замечены волны холода, которые зарождались на крайнем северо-западе России и, обнаруживая поступательное, подобное волне, движение, смещались на юго-восток. Впереди волны наблюдалось повышение температуры, также обнаруживающее поступательное, подобное волне, движение. Это явление получило название *волн тепла*.

Для выделения волн тепла в разных работах применяют разные критерии. Так, в книге Л.Константинова «Погода и сад» (<http://www.pogodaiklimat.ru/articles/article49.htm>) волной тепла в Подмоскowie в мае считается повышение среднесуточной температуры не менее чем на 4°C выше нормы в течение двух дней и более. В мае продолжительность волн тепла в среднем 8-10 дней (в отдельные годы – до 22-23 дней). В июле к волнам тепла отнесены случаи, когда средняя суточная температура воздуха не менее двух дней подряд отличается от нормы на 3°C и более. Продолжительность волн тепла в июле колеблется от 2 до 18 дней. При волнах тепла в июле средняя суточная температура воздуха иногда составляет 27-30°C.

В работе (Груза, Ранькова, 2011) для исследования уникальной летней жары 2010 года в России были получены временные ряды характеристик волн тепла в летний период вдоль широты 52,4° по данным реанализа для летнего сезона. Волной тепла считался отрезок времени внутри сезона, когда положительные аномалии температуры держались выше величины стандартного отклонения (std, °C) в течение 7 дней и более, с возможными «откатами» не ниже уровня 0,5 std в течение не более 3 дней. Рассмотрены характеристики блокирующих ситуаций в том же широтном поясе (50°-57° с.ш.) и выявлена их связь с характеристиками волн тепла. Показано, что летом 2010г. на Европейской территории в секторе 30°-45° в.д. продолжительность блокирования достигла почти 70 дней. Устойчивая антициклоническая циркуляция наблюдалась также и в Восточной Сибири, однако здесь она продолжалась около 40 дней (местами до 45).

В статье (Мартазинова, Остапчук, 2004) резкими повышениями среднесуточной температуры воздуха считаются изменения средней суточной температуры воздуха на 6-10°C на более 80% территории Украины. Изменения температуры сохраняются в течение недели и более. Определены наиболее вероятные положения высотных барических полей тропосферы и стратосферы, формирующие длительные резкие изменения средней суточной температуры воздуха на территории Украины.

В метеорологическом словаре (Хромов, Мамонтова, 1974) под волной тепла понимается «значительное потепление, распространяющееся в определенном направлении, связанное с адвекцией теплой массы».

Области крупных аномалий тепла, длительное время сохраняющиеся в одном регионе, обычно связывают с малоподвижными антициклонами, блокирующими западный перенос воздушных масс (Шакина, Иванова, 2010).

Таким образом, существуют разные критерии и объяснения условий возникновения волн тепла.

Цель данной работы – оценка тенденций в изменении характеристик устойчиво сохраняющихся на большой территории длительных аномалий тепла, связь этих аномалий с особенностями атмосферной циркуляции и теплового состояния океана.

Данные и методы анализа

В данной работе волны тепла рассматриваются как эпизоды длительных аномалий тепла в широтной зоне 45°-55° с.ш.

Для расчета характеристик волн тепла используется массив с данными о температуре приземного воздуха суточного разрешения из базы данных NCEP/NCAR Reanalysis 1

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/> (Kalnay et al., 1996).

При анализе условий формирования длительных аномалий тепла на территории России учитывались особенности циркуляции с использованием макроциркуляционных индексов, характеризующих основные моды колебаний в атмосфере

(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/>).

Особое внимание уделено особенностям теплового состояния разных слоев Мирового океана в холодный период года. Для этой цели использовались:

- данные по теплосодержанию Мирового океана для слоя 0-700 м (в узлах сетки 5°×5° и осредненные по бассейнам океана

(http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/);

- аномалии температуры океана для слоев 0-100, 0-700, 0-2000 м, осредненные по бассейнам океана.

3-месячные данные аномалий температуры океана по бассейнам Мирового океана взяты рассчитанными, исходя из 3-месячных объективно проанализированных на сетке 1°×1° полей аномалий температуры для каждого стандартного («по NODC» (NOAA National Oceanographic Data Center)) уровня по глубине. Для расчета последних, в свою очередь, использованы данные из «World Ocean Database» (Boyer et al., 2009) для соответствующего 3-месячного

периода и климатические среднемесячные данные согласно «World Ocean Atlas 2009» (Locarnini et al., 2010).

Также использовались среднемесячные данные потенциальной температуры океана ($^{\circ}\text{C}$) из океанских реанализов ECMWF ORAS4 (ftp://ftp.icdc.zmaw.de/EASYInit/ORA-S4/monthly_1x1/) с горизонтальным разрешением $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Реанализы ECMWF ORAS4 базируются на модели океана NEMO (<http://www.nemo-ocean.eu/>) версии 3.0 и системе усвоения данных NEMOVAR (Mogensen et al., 2012). В модели океана NEMO используется приблизительно одноградусное горизонтальное разрешение и 42 уровня по вертикали, 18 из которых находятся в верхнем 200-метровом слое океана.

Основные определения. Будем считать, что на меридиане $L0$ осуществилась аномалия интенсивности $w0$, если хотя бы в одном узле этого меридиана внутри широтного пояса 45° - 55° с.ш. выполняется условие $Wt > w0$. Под волной тепла понимается факт осуществления аномалии заданной интенсивности $w0$, сохраняющейся в течение не менее $d0$ дней в секторе протяжённостью не менее $L0$ градусов долготы. Другими словами, в качестве волны тепла рассматривается период существования аномалии с характеристиками: $Wt > w0$, $D > d0$, $L > L0$.

Участок волны тепла вдоль одного меридиана будем считать «эпизодом волны тепла», его главная характеристика – продолжительность, то есть число дней непрерывного существования на заданном меридиане аномалии, отвечающей критериям $(L0, d0, w0)$. К сезонным характеристикам волн тепла относятся: число волн тепла за сезон, их суммарная продолжительность и средняя за сезон продолжительность. Наиболее удобной календарной характеристикой волн, отвечающих заданным критериям $(L0, d0, w0)$ на заданном меридиане в течение заданного периода (сезона, месяца) является, на наш взгляд их суммарная продолжительность N_{yL} (дни). Иной формой этой характеристики можно считать повторяемость $f_{yL}(\%)$ – суммарная продолжительность за сезон, деленная на число дней в сезоне (доля времени с аномалией соответствующей категории).

Анализ характеристик волн тепла выполнен для трех уровней интенсивности $w0 = 0,5, 1,0$ и $2,0$ (аномалия выше $0,5\sigma, 1\sigma$ и 2σ), из которых наиболее удачным представляется $w0=1$. Для каждого меридиана рассчитаны временные ряды N_{yL} за каждый месяц и за первую половину лета (май-июнь) при критериях: $d0 = \{4 | 8 | 10 | 15 |$

25 дней и более} и $L0 = \{10 | 15 \text{ гр. долготы и более}\}$ и получены их статистические характеристики за 1956-2010 и 1976-2010 гг.

Все приведенные ниже результаты соответствуют $w0=1$ (аномалия выше σ), т.е. относятся к волнам с аномалиями не ниже σ . В табл. 1 приведены: повторяемость волн тепла за 55 лет (среднее число волн за сезон), их средняя продолжительность и суммарное число охваченных ими дней (в течение одноименных сезонов 55 лет).

Таблица 1

Многолетние характеристики эпизодов волн тепла заданной интенсивности, продолжительности и протяженности на долготе 37,5° в.д. в мае-июне 1956-2010 гг.

Критерии эпизода тепла			Среднее число эпизодов за сезон	Средняя продолжительность эпизода (дни)	Средняя сезонная продолжительность эпизодов тепла (дни)
Интенсивность	Минимальная протяженность, (сектор долготы)	Минимальная длительность (дни)			
Аномалия не менее σ °C	10°	4	1,5	8,9	13,4
		8	0,7	13,8	9,3
	15°	10	0,5	15,9	7,8
		15	0,1	18,1	2,3

Суммарная (по каждому месяцу за все 55 лет) продолжительность волн тепла протяженностью не менее 10° долготы ($L0 = 10$) картирована на рис. 1, как функция календарного месяца (ось X) и долготы (ось Y). Оценки приведены для двух вариантов продолжительности: не менее 4 дней и не менее 10 дней.

На рис. 2 аналогичные данные представлены в виде долготного хода сезонной повторяемости (% дней с соответствующей аномалией) волн тепла разной продолжительности $d0 = \{4 | 8 | 10 | 15 | 25\}$ и более дней} и протяженности $L0 = \{10 | 15 | \text{и более градусов долготы}\}$, но только для сезона первой половины лета (май-июнь).

Видно, что в рассматриваемой широтной зоне 45°-55° с.ш. наибольшее число дней, охваченных волнами тепла, отмечается в августе над Тихим океаном (140°-170° в.д.) и над Атлантикой (30° з.д.), а в июле – в Западной Европе и на Европейской части России. В сезон первой половины лета (май-июнь) максимум повторяемости отмечается на ЕЧР (35°-40° в.д.), а минимум – в

Западной Сибири (80° - 85° в.д.). Выделяется также вторичный максимум вблизи 95° - 100° в.д.

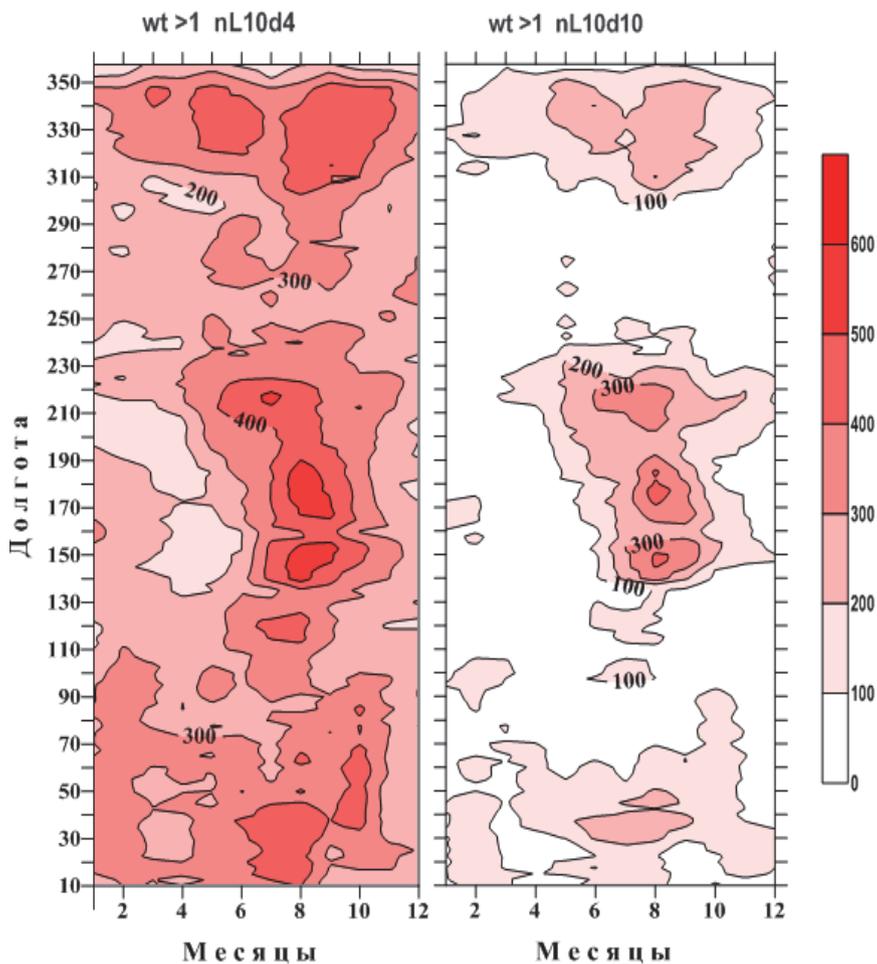


Рис. 1. Суммарная продолжительность волн тепла продолжительностью не менее 4 дней (слева) и 10 дней (справа) за 1956-2010 гг. в зоне 45° - 55° с.ш., как функция месяца года (ось X) и долготы (ось Y).

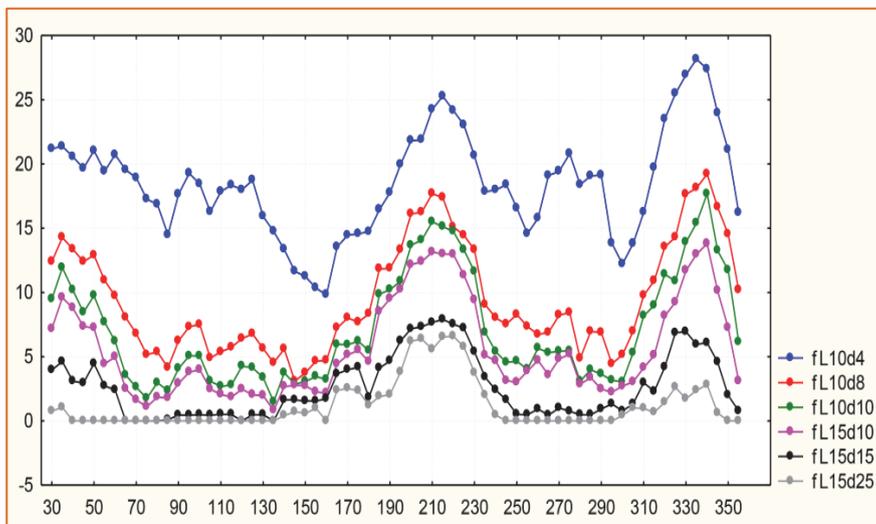


Рис. 2. Средняя сезонная (май-июнь) повторяемость волн тепла разной продолжительности и протяженности как функция долготы (ось X) (за 1956-2010 гг.)

По-видимому, указанные особенности в долготном распределении сезонной продолжительности летних волн тепла можно объяснить региональными особенностями циркуляции. Как известно, на юге Европейской территории России летом часто располагается отрог высокого давления Азорского антициклона. Возникают блокирующие ситуации, надолго устанавливается ясная жаркая, сухая погода – наступает засуха. Южные районы Сибири (80° - 110° в.д.), напротив, находятся под влиянием летней азиатской депрессии. По западной периферии Азиатской депрессии поступает арктический воздух с низким влагосодержанием. В результате сильного прогрева воздуха ослабевают термические контрасты, убывают осадки – периодически наблюдаются засухи. Судя по полученным результатам, продолжительные эпизоды тепла наблюдаются при блокирующих ситуациях чаще, чем в условиях Азиатской депрессии.

Временные ряды сезонной (май-июнь) продолжительности эпизодов волн тепла на меридианах $37,5^{\circ}$, $82,5^{\circ}$ и $97,5^{\circ}$ в.д. приведены на рис. 3 для волн трех категорий: *L10d4* – волны

продолжительностью не менее 4-х дней на протяжении не менее 10 градусов долготы, $L10d10$ – волны продолжительностью не менее 10 дней и протяженностью не менее 10 градусов долготы, $L15d10$ – волны продолжительностью 10 и более дней и протяженностью 15 и более градусов долготы.

Временные ряды на рис. 3 указывают на определенное увеличение продолжительности волн тепла на меридиане $97,5^\circ$ в.д. в 1996-2004 гг. Эта тенденция подтверждается и оценками трендов в табл. 2. Действительно, на меридианах 90° - 100° в.д тренд за 1976-2010 гг. положительный и объясняет около 30% полной дисперсии ряда. Однако в других регионах существенных тенденций в изменении продолжительности и повторяемости волн тепла обнаружено не было. Тем не менее, можно, по-видимому, отметить, что длительные и обширные аномалии тепла чаще встречаются во второй половине рассматриваемого периода.

Анализ циркуляционных характеристик

Анализ карт $wH500$ для сезонов с максимальной продолжительностью волн тепла (май 1979 и 2010 гг. на меридиане $37,5^\circ$ в.д. и май 1982г. на $82,5^\circ$ в.д.) показал, что всем трем случаям соответствует блокирование в поле H500. Для количественной оценки связи продолжительности волн тепла с сопутствующими (и предшествующими) циркуляционными условиями, привлечен индекс антициклоничности IpH , ранее введенный авторами (Рочева, 2012). Этот индекс учитывает долю площади, занятой крупными (выше сигмы) положительными аномалиями H500 в регионах: Европейская территория [ЕТ, 45° - 60° с.ш., 30° - 60° в.д.] и Западная Сибирь [ЗС, 50° - 60° с.ш., 60° - 90° в.д.]. В табл. 3 приведены коэффициенты корреляции в мае, июне, июле между индексом IpH в указанных регионах и числом дней N с волнами тепла на соответствующих меридианах 45° и 75° в.д. Полученные корреляции (более 0,7-0,8 для ЕТР и более 0,5-0,6 для Западной Сибири) указывают, что в рассматриваемых регионах предложенные критерии и характеристики соответствуют масштабам летних аномалий тепла, связанных с развитием антициклональной циркуляции.

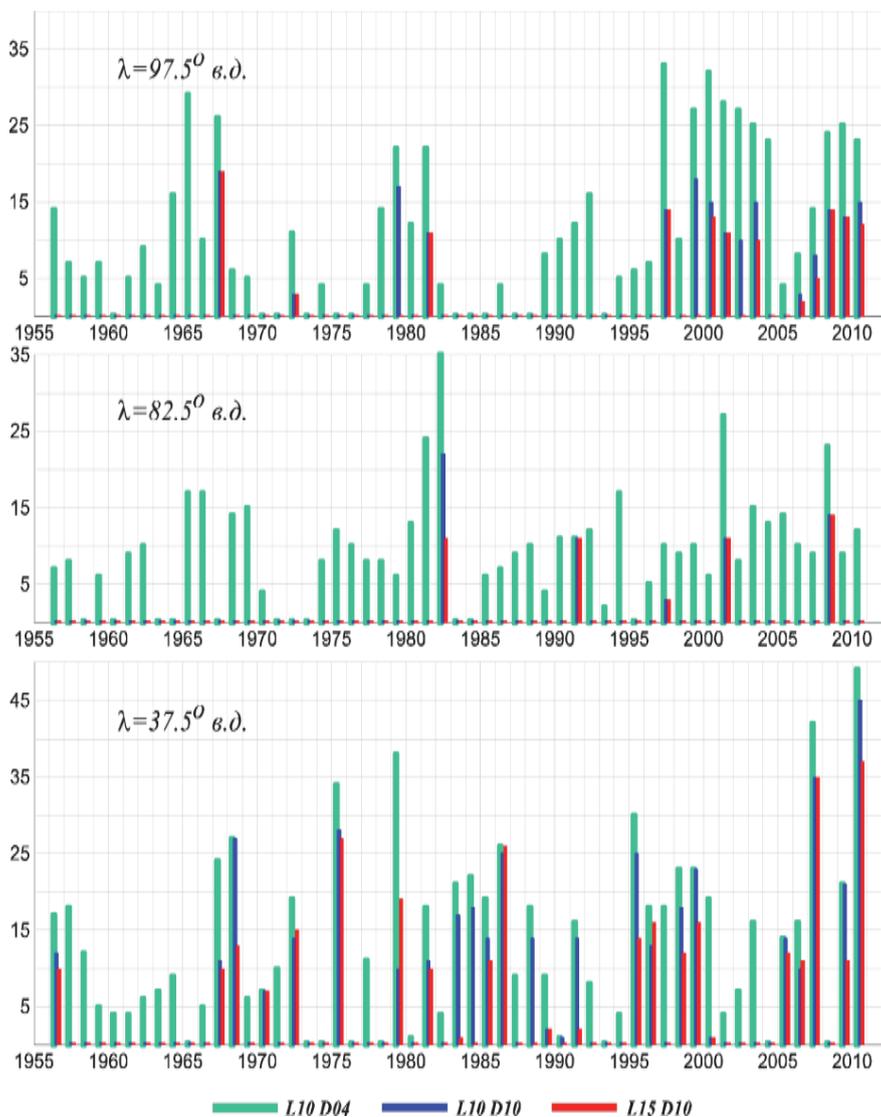


Рис. 3. Временные ряды продолжительности волн тепла интенсивности $w_0=1$, протяженности $L_0 = 10, 15$ и более градусов долготы на меридианах $(37,5^\circ, 82,5^\circ, 97,5^\circ$ в.д.) за сезон май-июнь 1956-2010 гг.

Многолетние статистики волн тепла заданной категории ($wt > 1$, L не менее 10 градусов долготы), продолжительностью не менее 4, 8, 10 дней за 1976-2010 гг. в зоне 45°-55° с.ш.

Категория волн тепла	Статистики	Долгота, градусов в.д.							
		30	40	50	60	70	80	90	100
<i>nL10d4</i>	<i>mean</i>	14,5	13,3	13,8	13,2	13,9	12,5	11,5	12,6
	σ	12,1	10,3	10,5	11,9	8,7	8,2	7,5	10,4
	<i>b</i>	3,6	1,4	1,9	1,9	0,8	1,1	3,3	5,7
	<i>D%</i>	9,5	2,1	3,3	2,5	0,8	1,9	20,7	31,0
<i>nL10d8</i>	<i>mean</i>	8,8	9,2	9,1	6,8	5,5	4,6	4,5	5,9
	σ	12,2	9,5	10,1	10,8	7,3	7,1	6,2	7,5
	<i>b</i>	2,9	1,3	2,7	2,3	-0,3	0,3	2,1	4,1
	<i>D%</i>	6,0	1,9	7,5	4,9	0,2	0,2	12,2	31,2
<i>nL10d10</i>	<i>mean</i>	7,3	7,4	7,0	5,0	2,2	2,8	3,4	4,1
	σ	11,2	8,8	8,8	8,7	5,8	5,9	6,0	6,1
	<i>b</i>	2,1	1,3	1,8	2,2	-0,9	0,5	2,1	2,7
	<i>D%</i>	3,6	2,3	4,5	6,6	2,3	0,8	13,4	20,1

Примечание: *mean* – средние сезонные (май-июнь) значения, дни; σ – стандартные отклонения, *b* – коэффициенты линейного тренда, *D%* – объясненная трендом дисперсия. Жирным шрифтом выделены значения, где вклад тренда в дисперсию более 10%.

Аналогично проанализированы статистические связи продолжительности волн тепла с макроциркуляционными индексами, характеризующими основные моды колебаний в атмосфере (табл. 4), в том числе:

- восточно-атлантическое колебание (EA),
- западно-тихоокеанское колебание (WP),
- восточно-атлантическое – западно-российское колебание (EA/WR),
- скандинавское колебание (SCA),
- североатлантическое колебание (NAO).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции продолжительности эпизодов волн тепла N_{Ld} ($\lambda=45^\circ$ в. д., 75° в.д.) с индексом антициклоничности I_{ph} и средней температурой T в регионах ЕТ и ЗС в мае, июне, июле

Продолжительность эпизодов волн тепла $n(L10d4)$ на меридиане N_λ	Индекс антициклоничности I_{ph} (в регионе)			Средняя температура T , °С (в регионе)			
	май	июнь	июль	май	июнь	июль	
Регион: Европейская территория [45° - 60° N, 30° - 60° E]							
N, $\lambda=45^\circ$ в.д. (Поволжье)	Май	0,79	-0,02	-0,10	0,77	-0,06	-0,06
	Июнь	0,15	0,81	0,26	0,05	0,79	0,18
	Июль	-0,18	0,20	0,72	-0,08	0,23	0,74
Регион: Западная Сибирь [50° - 60° N, 60° - 90° E]							
N, $\lambda=75^\circ$ в.д. (юг западной Сибири)	Май	0,59	0,26	-0,12	0,67	0,27	-0,12
	Июнь	0,28	0,59	0,00	0,23	0,63	0,16
	Июль	0,20	0,24	0,65	0,02	0,06	0,50

Примечание. 1) Жирным шрифтом выделены коэффициенты с уровнем значимости $\alpha \leq 0,01$

Можно видеть, что в мае и июне формирование аномалий температуры на ЕТР, в основном, связано с развитием колебаний EA/WR, WP, а в Западной Сибири – EA/WR и SCA. Связи с индексами этих колебаний – синхронные и асинхронные – в отдельные месяцы прослеживаются на большом расстоянии.

Таким образом, рассмотренные характеристики продолжительности волн тепла при предложенных критериях отражают долгоживущие на большом пространстве крупные аномалии температуры воздуха, связанные с развитием антициклональной циркуляции (как минимум до уровня поверхности 500 гПа) и усилением колебаний EA/WR и SCA. Заметный положительный тренд во временных рядах продолжительности волн тепла обнаруживается восточнее 90° в.д., где объясненная трендом дисперсия в период 1976-2010 гг. превысила 30%.

В отдельные месяцы проявляется влияние Скандинавского (SCA, в мае) и Североатлантического (NAO, в июне) колебаний, с которыми связано формирование отрицательных аномалий температуры на Урале и в Сибири.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между индексами циркуляции и продолжительностью волн тепла $N_{L,d}$ ($L10d4, wt>1$) на долготах от 40 до 100° E

Долгота													
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Май													
EA5	0,21	0,11	-0,06	-0,38	-0,46	-0,41	-0,31	-0,19	-0,09	-0,05	0,12	0,16	0,15
WP5	-0,30	-0,37	-0,39	-0,26	-0,23	-0,07	0,02	-0,07	-0,03	-0,21	-0,20	-0,26	-0,30
EAWR5	-0,45	-0,40	-0,40	-0,36	-0,27	-0,06	0,15	0,23	0,41	0,54	0,45	0,47	0,51
SCA5	0,05	0,05	-0,09	-0,09	-0,15	-0,32	-0,27	-0,44	-0,45	-0,43	-0,43	-0,28	-0,17
Июнь													
EA5	0,01	-0,01	-0,10	-0,15	-0,33	-0,33	-0,33	-0,21	-0,03	0,20	0,28	0,11	0,17
NAO6	-0,02	-0,10	-0,28	-0,45	-0,47	-0,31	-0,19	-0,21	-0,01	0,11	0,20	0,11	0,06
WP6	-0,30	-0,28	-0,31	-0,19	-0,12	-0,01	0,13	0,04	0,10	0,02	0,00	0,12	0,09
EAWR6	-0,29	-0,39	-0,42	-0,33	-0,43	-0,36	-0,30	-0,17	0,01	0,23	0,25	0,00	0,08
Июль													
WP5	-0,35	-0,39	-0,30	-0,12	-0,16	0,01	0,11	0,07	0,01	0,00	0,03	-0,17	-0,25
SCA5	0,13	0,09	-0,12	-0,21	-0,28	-0,31	-0,33	-0,26	-0,31	-0,30	-0,34	-0,23	-0,18
EAWR6	-0,30	-0,27	-0,30	-0,26	-0,39	-0,30	-0,36	-0,35	-0,21	-0,20	-0,15	-0,14	-0,12
EA7	0,26	0,22	0,18	0,07	0,09	0,05	0,00	0,13	-0,02	-0,02	0,07	0,30	0,45
WP7	-0,33	-0,31	-0,27	-0,13	-0,01	0,10	0,01	-0,11	-0,12	-0,22	-0,35	-0,19	-0,27
EAWR7	-0,35	-0,47	-0,58	-0,55	-0,51	-0,53	-0,47	-0,42	-0,08	-0,13	-0,01	0,08	0,03

Примечание. В первой колонке указано название индекса циркуляции и номер месяца (май – 5, июнь – 6, июль – 7), для которого рассчитан коэффициент корреляции. Жирным шрифтом выделены коэффициенты с уровнем значимости $\alpha \leq 0,05$. Расшифровку обозначений индексов см. в тексте выше.

Анализ характеристик теплового состояния океана

Одним из факторов, определяющих характер циркуляции, является изменение теплового состояния океанов, особенно когда крупные аномалии температуры океана охватывают большие по площади и толщине слои воды и сохраняются по несколько месяцев. Влияет также взаимное и устойчивое в течение зимних и весенних месяцев расположение крупных очагов положительных и отрицательных аномалий температуры воды. Это «может содействовать и усилению и ослаблению меридиональной циркуляции с определенной локализацией тропосферных гребней (антициклонов) и ложбин (циклонов) и оказывать особенно большое влияние на характер адвекции воздуха в атмосфере» (Кац, 1973).

Ниже анализируются полученные количественные оценки связи продолжительности волн тепла в широтной зоне наиболее подвергнутой засухам (45° - 55° с.ш.), на меридианах от 30° до 140° в.д. в мае, июне, июле и августе с особенностями теплового состояния океана в предшествующий холодный период.

На рис. 4 (а – г) приведен долготный ход коэффициентов корреляции между индексом продолжительности волн тепла в мае (а), июне (б), июле (в), августе (г) и осредненными по бассейну Северной Атлантики (включая Северный Ледовитый океан) предшествующими «зимними» (январь-март) аномалиями температуры для 3-х слоев океана (0-100 м, 0-700 м и 0-2000 м).

Как видно из рис. 4, особенности теплосодержания океана в слое 0-700 м и теплового состояния в разных слоях океана в предшествующий холодный период отражаются в продолжительности крупных летних аномалий тепла на континенте во все месяцы летнего периода (с мая по август). Но расположение областей с наибольшими коэффициентами корреляции ($r > 0,5-0,6$) меняется от месяца к месяцу: в мае эта область находится в центральных районах Сибири ($90-95^{\circ}$ в.д.), в июне-июле – на 100° - 120° в.д. В западных районах России (30° в.д.) область со значимыми корреляциями появляется лишь в июле, а в августе – на всей Европейской части России (30° - 60° в.д.).

Здесь же приведены аналогичные оценки для теплосодержания океана в слое 0-700 м.

Понятно, что влияние особенностей теплового состояния Атлантики на возникновение длительных аномалий тепла на континенте осуществляется через циркуляцию атмосферы, на которую влияет не только Атлантика, а весь Мировой океан.

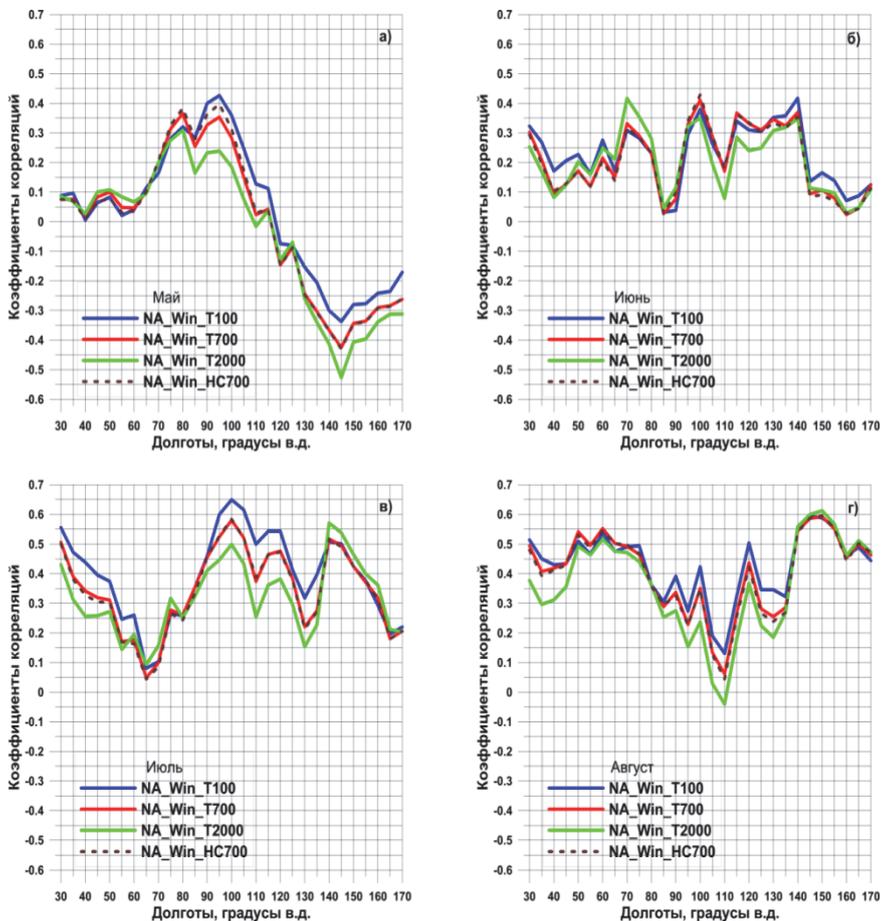


Рис. 4. Долготный ход корреляций между индексом продолжительности волн тепла на текущем меридиане в широтном поясе 45°-55° с.ш. в мае (а), июне (б), июле (в), августе (г) и характеристиками теплового состояния Северной Атлантики (NA) в предшествующий период (январь-март, Win): HC700 – теплосодержание слоя 0-700 м; T100, T700, T2000 – средняя температура слоев 0-100 м, 0-700 м и 0-2000 м



Рис. 5. Долготный ход корреляций между индексом продолжительности волн тепла в широтном поясе 45°-55° с.ш. в июле и аномалиями температуры Мирового океана в январе-марте для слоя 0-700 м.

Для примера рассмотрим коэффициенты временных корреляций между индексом продолжительности волн тепла на меридианах 30°-170° в.д. в июле и предшествующими (январь-март) аномалиями Мирового океана в слое океана 0-700 м (рис. 5). Так же, как на рис. 4, в этом случае максимальные коэффициенты корреляции обнаружены в июле в зоне меридианов 30° и 100° в.д.

Было проведено сопоставление результатов, полученных по данным бассейна Северная Атлантика, с результатами, полученными с использованием данных о температуре и теплосодержании океана в узлах сетки.

На рис. 6 приведены коэффициенты корреляции между теплосодержанием океана в слое 0-700 м за январь-март и продолжительностью эпизодов волн тепла в мае в зоне меридиана 90° в.д. (а), в июле – в зоне 30° в.д. (б) и в августе – в зоне 90° в.д. (в). Видны области статистически значимых положительных коэффициентов корреляции (>0,4, 0,5) в зоне Гольфстрима и Северо-Атлантического течений и даже в районе Баренцева моря вблизи Новой Земли. При таких условиях зимнего теплосодержания океана в

Северной Атлантике в слое 0-700 м, устойчивые длительные аномалии тепла возникают не только в Сибири, но и на Европейской части России в июле и августе.

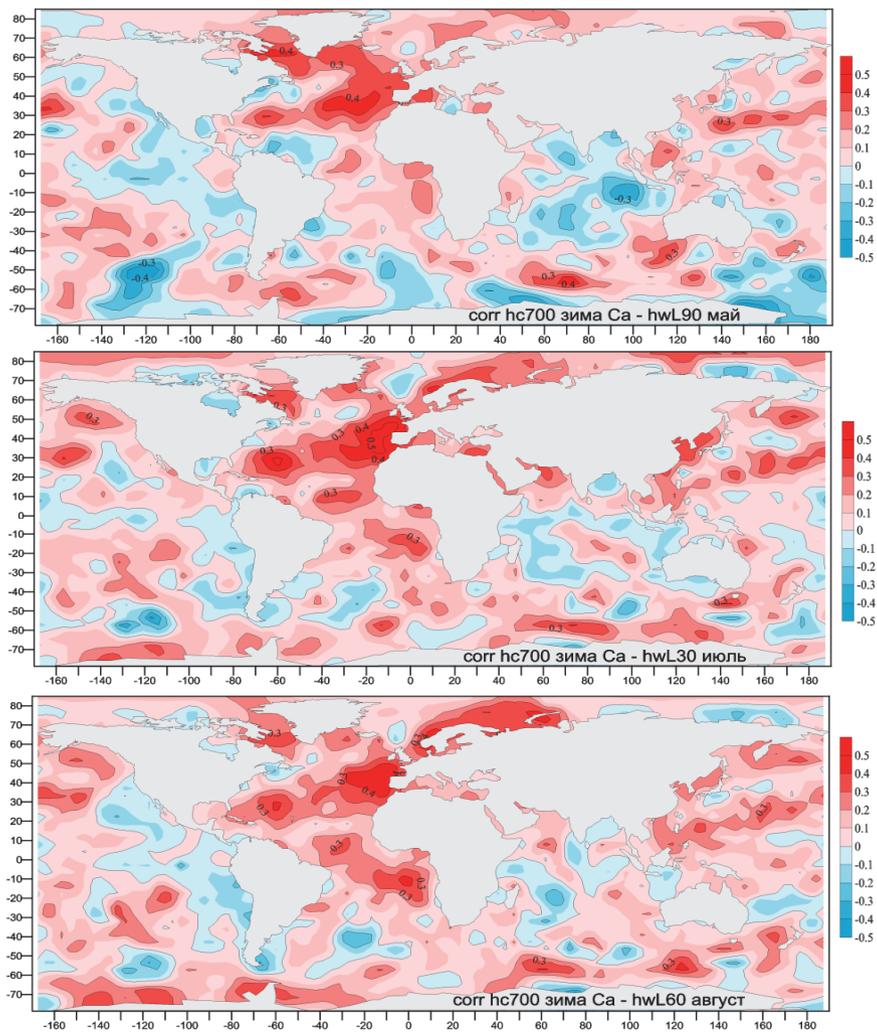


Рис. 6. Коэффициенты корреляции между теплосодержанием (hc) океана для слоя 0-700 м за январь-март и продолжительностью волн тепла (hw) на фиксированном меридиане L90° в.д. в мае (верхний рис.), L30° в.д. в июле (средний рис.) и L60° в.д. в августе (нижний рис.).

На рис. 7 приведена карта с коэффициентами корреляции продолжительности волн тепла в зоне меридиана 90° в.д. в мае с потенциальной температурой ($^\circ\text{C}$) океана на глубине ~ 45 м в предшествующий период (декабрь-апрель).

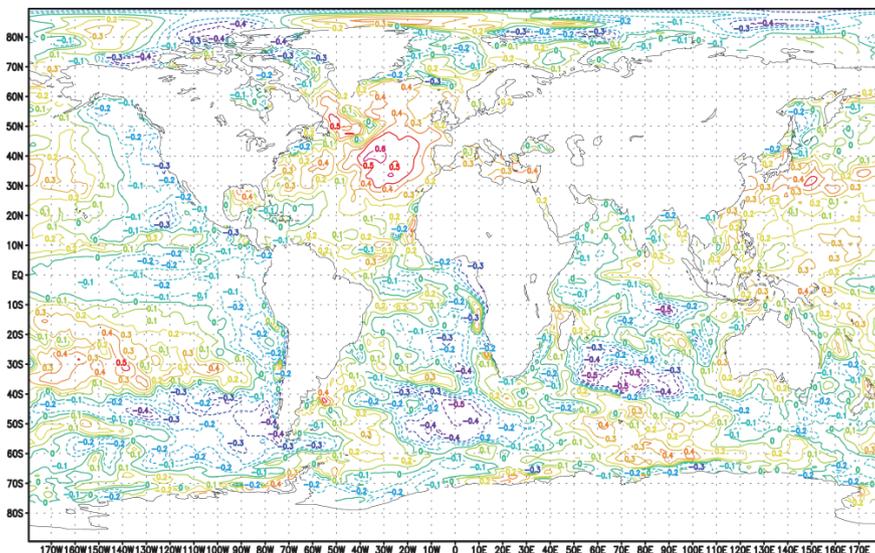


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между потенциальной температурой ($^\circ\text{C}$) океана на глубине ~ 45 м для сезона (декабрь-апрель) и продолжительностью волн тепла в мае в зоне меридиана 90° в.д. в широтном поясе 45° - 55° с.ш.

Видно, что центральную часть Северной Атлантики занимает область с положительными коэффициентами корреляции между рассматриваемыми переменными с максимальными значениями коэффициентов в центре более 0,6 (при числе наблюдений равном 53). Т.е. появлению длительных крупных аномалий температуры в мае в центре континента Евразия предшествует тепловое состояние океана на глубине ~ 45 м в центре Северной Атлантики в предшествующий холодный период (декабрь-апрель).

Это подтверждает и табл. 5, где приведены коэффициенты временных (1958-2010 гг.) корреляций между индексами продолжительности волн тепла в мае и среднемесячной

потенциальной температурой (°С) океана на глубине ~45м. в предшествующие месяцы (с ноября по май). При этом данные среднемесячной потенциальной температуры предварительно усреднены по региону Северной Атлантики (30°-50°с.ш., 35°-15°з.д.). Во всех расчетах значения температуры океана брались из архива реанализов ECMWF ORAS4 на сетке 1×1 градус.

Из анализа полученных данных (табл. 5) следует:

- статистически значимые коэффициенты корреляции проявляются в секторе 75-100° в.д. с максимальными значениями в зоне меридиана 90° в.д. – это примерно центральный сектор континента, на который влияют и Атлантический и Тихий океаны;
- асинхронные связи устойчиво проявляются с декабря по апрель ($r = 0,56, 0,61$);
- синхронные связи ($r = 0,65$) в мае выше, чем асинхронные.

Таблица 5

Коэффициенты временных (1958-2010 гг.) корреляций между индексами продолжительности волн тепла в мае в широтном поясе 45°-55° с.ш. на территории России и среднемесячной потенциальной температурой (°С) океана на глубине ~45 м, осредненной по региону Северной Атлантики (30°-50°с.ш., 35°-15°з.д.)

Долгота, град. в.д.	70	75	80	85	90	95	100	105	110
Ноябрь	0,25	0,3	0,38	0,48	0,56	0,59	0,58	0,32	0,25
Декабрь	0,21	0,34	0,46	0,57	0,61	0,59	0,59	0,31	0,22
Январь	0,17	0,31	0,42	0,51	0,6	0,55	0,5	0,27	0,2
Февраль	0,21	0,35	0,43	0,49	0,59	0,55	0,45	0,21	0,17
Март	0,23	0,39	0,47	0,49	0,57	0,53	0,45	0,22	0,24
Апрель	0,19	0,37	0,44	0,54	0,61	0,54	0,47	0,2	0,21
Май	0,13	0,31	0,39	0,54	0,65	0,57	0,52	0,28	0,26

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты с уровнем значимости $\alpha \leq 0,05$.

Заключение

С использованием данных реанализов рассчитаны основные характеристики «волн тепла». Проанализированы тенденции в изменении продолжительности волн тепла в летний период.

Отмечено определенное увеличение продолжительности волн тепла в зоне меридиана $97,5^\circ$ в.д. в 1996-2004 гг. (включая крупномасштабные волны *L10D10*). Эта тенденция подтверждается и оценками трендов. Во временном ряду суммарной продолжительности аномалий тепла на отмеченном меридиане тренд за 1976-2010 гг. положительный и объясняет более 30% полной дисперсии ряда.

Показано, что длительные периоды существования волн тепла на континенте связаны с особенностями атмосферной циркуляции и теплового состояния океана.

Влияние особенностей теплового состояния океана в предшествующий холодный период проявляется в продолжительности длительных летних аномалий тепла на континенте во все месяцы летнего периода (с мая по август). Но расположение областей с наибольшими коэффициентами корреляции ($r > 0,5-0,6$) меняется от месяца к месяцу: в мае эта область находится в континентальных районах Сибири ($90^\circ-95^\circ$ в.д), в июне-июле – на $100^\circ-140^\circ$ в.д. В западных районах России (30° в.д.) эта область появляется в июле, а в августе – на всей Европейской части России ($30^\circ-60^\circ$ в.д.) и на востоке $120^\circ-140^\circ$ в.д.

Предполагается, что выявленные связи в будущем могут быть полезными при разработке вероятностного прогноза длительных аномалий тепла в зоне $45^\circ-55^\circ$ с.ш.

Благодарность

Авторы выражают глубокую благодарность Г.В. Грузе и Э.Я. Раньковой за постоянное внимание и помощь в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-00326а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. 2011. Оценка возможного вклада глобального потепления в генезис экстремально жарких летних сезонов на Европейской территории РФ. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 47, № 6. С. 717-721.
2. Кац А.Л. 1973. Необычное лето 1972 года. Л. Гидрометеиздат. 58 С.
3. Константинов Л.К. Погода и сад.
<http://www.pogodaiklimat.ru/articles/article49.htm>.
4. Мартазинова В.Ф., Остапчук В.В. 2004. Взаимосвязь процессов циркуляции в тропосфере и стратосфере при кратковременных и длительных потеплениях и похолоданиях в Украине. Наукові праці УкрНДГМІ. Вып. 253. С. 28-36.
5. Рочева Э.В. 2012. Возможные предвестники засух в сельскохозяйственных районах России. Метеорология и гидрология. №9. С. 5-18.
6. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. 1974. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат. 568 С.
7. Шакина Н.П., Иванова А.Р. 2010. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования. Метеорология и гидрология. № 11. С. 5-18.
8. Энциклопедический словарь Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона
<http://alcala.ru/brokgauz-slovari/izbrannoe/slovar-Hk/H2215.shtml>.
9. Boyer T.P., Antonov J.I., Baranova O.K., Garcia H.E., Johnson D.R., Locarnini R.A., Mishonov A.V., O'Brien T.D., Seidov D., Smolyar I.V., Zweng M.M. 2009. World Ocean Database 2009. Levitus S., Ed. NOAA Atlas NESDIS 66. U.S. Government. Printing Office, Washington, D.C. 216 P.
10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L. et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bull. Amer. Meteorol. Soc. V. 77. P. 437-471.
11. Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., and Johnson D.R. 2010. World Ocean Atlas 2009. Vol. 1: Temperature. Levitus S., Ed. NOAA Atlas NESDIS 68. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 184 pp.
12. Mogensen K., Balmaseda M.A., Weaver A. 2012. The NEMOVAR ocean data assimilation system as implemented in the ECMWF ocean analysis for System 4. Technical Memorandum No. 668. ECMWF. CERFACS, Toulouse.