

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛЕТНИХ ЦЕНТРОВ ДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ НАД ДАЛЬНИМ ВОСТОКОМ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЭКСТРЕМУМЫ В ПЕРИОД 1980—2017 гг.

*Т.А. Шатилина<sup>1</sup>, Г.Ш. Цициашвили<sup>2</sup>, Т.В. Радченкова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО», tatyana.shatilina@tinro-center.ru

<sup>2</sup> Институт прикладной математики ИПМ ДВО РАН

Уточненными методами статистики для временных рядов параметров, характеризующих центры действия атмосферы, температуру воздуха и воды, проведена оценка значимости тренда и выявлены доминирующие циклы. Значимые тренды наблюдались в средней тропосфере в районе южно-азиатского и гавайского антициклонов для геопотенциала  $H_{500}$ , а также для термических характеристик во всех центрах действия атмосферы. Показано, что экстремальная циркуляция над Дальним Востоком является причиной появления экстремумов в распределении температуры воды на поверхности северо-западной части Тихого океана и Японского моря. Установлено, что в области азиатской депрессии доминирующими циклами являются 10- и 5-летний циклы, а в области гавайского антициклона — 6- и 7-летние циклы.

*Ключевые слова:* центры действия атмосферы, значимость тренда, доминирующие циклы, экстремумы.

## FEATURES OF THE SUMMER ATMOSPHERIC FORCE CENTERS VARIABILITY OVER THE FAR EAST AND CLIMATIC EXTREMES IN THE PERIOD 1980—2017

*T.A. Shatilina<sup>1</sup>, G.Sh. Tsitsiashvili<sup>2</sup>, T.V. Radchenkova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Research institute of fisheries and oceanography, VNIRO, pacific branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia

<sup>2</sup> Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia

Trend significance has been assessed by improved statistical methods for time series of parameters characterizing the atmospheric force centers, air and water temperatures, and dominant cycles have been revealed. Significant trends were observed in the middle of troposphere in the South Asian and Hawaiian anticyclones for the  $H_{500}$  geopotential, as well as for thermal characteristics in all centers of the atmosphere. The research results show that extreme circulation over the Far East causes the appearance of extremes in the water temperature distribution on the surface of northwest part of Pacific Ocean and the Japan Sea. It has been established that 10- and 5- year cycles are dominant in the area of Asian depression. In the area of Hawaiian anticyclone 6- and 7-year cycles dominate.

*Keywords:* atmospheric force centers, trend significance, dominant cycles, extremes.

### Введение

Региональные исследования атмосферной циркуляции являются необходимыми фрагментами при построении общей картины климатических изменений в Северном полушарии. К числу индикаторов состояния климатической системы

относятся интенсивность и положение климатических центров действия атмосферы (преобладание циклонических систем в одних районах и антициклонов в других). Смещение центров и вариации их интенсивности влияют на распределение планетарных воздушных течений и отражаются в изменении климата. Их изучению посвящен ряд работ [2, 3, 6, 7, 9].

В настоящей работе проводится анализ изменчивости климатических центров действия атмосферы (ЦДА), расположенных над вторым естественным синоптическим районом (2-й е.с.р.) Северного полушария. Естественный синоптический район – это значительная часть полушария, относительно которой предполагается, что синоптические процессы там обладают определенной обособленностью и могут изучаться независимо от процессов в других частях Земли. Он характеризуется таким термобарическим полем в тропосфере, которое обуславливает сохранение в течение нескольких дней данного развития синоптических процессов. В Северном полушарии севернее параллели 30° различают три е.с.р.: от Гренландии до Таймыра, от Таймыра до Берингова пролива (2-й е.с.р.) и от Берингова пролива до Гренландии [13]. Границы 2-го е.с.р. показаны на рис. 1. На этом рисунке также показано географическое положение ЦДА. Кратко опишем их.

**Летняя дальневосточная депрессия (ЛДД)** располагается над северо-восточным Китаем и примыкающими к нему районами Приамурья и Монголии. ЛДД представляет собой климатически достаточно устойчивое барическое образование теплого полугодия, что следует из многолетних карт давления на уровне моря. Взаимодействие летней дальневосточной депрессии с тихоокеанским и охотским антициклонами способствует интенсивному переносу воздушных масс с океана на континент и установлению летнего муссона над дальневосточными районами.

**Охотский антициклон (ОА).** В период май — август над Охотским морем часто наблюдаются области высокого давления. В формировании летней погоды на Дальнем Востоке роль области высокого давления над Охотским морем и прилегающими к нему районами является определяющей. Этот региональный летний центр действия атмосферы оказывает существенное влияние на термический режим Курильского района [14].

**Азиатская депрессия (АД)** — обширная область пониженного давления, располагающаяся летом над Азией. Она связана с формированием летнего дальневосточного муссона. Вариации интенсивности азиатской депрессии влияют на распределение планетарных воздушных течений и отражаются в изменении климатического режима.

**Гавайский антициклон (ГА)** — субтропический антициклон, или область высокого атмосферного давления в районе Гавайских островов. Эта зона выделяется на среднегодовых климатических картах для тропической акватории северной части Тихого океана и является результатом преобладания в этом районе обширных и интенсивных, теплых и высоких малоподвижных антициклонов.

На Дальнем Востоке экстремальные гидрометеорологические явления наблюдаются достаточно часто. Роль флуктуаций этих параметров возрастает, особенно в региональных центрах атмосферной циркуляции, на достаточно ограниченных территориях. Анализ коротких временных рядов с флуктуациями повышает

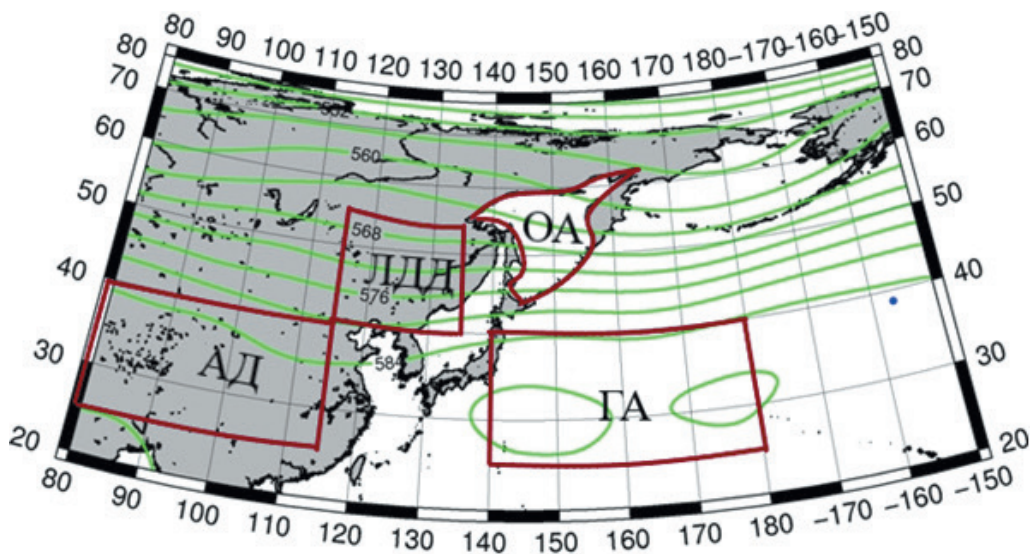


Рис. 1. Среднемесячное поле геопотенциала  $H_{500}$  в июле (<http://ferhri.org/>) и расположение летних центров действия атмосферы.

ОА — охотский антициклон, ЛДД — летняя дальневосточная депрессия, АД — азиатская депрессия, ГА — гавайский антициклон.

требования к оценке параметров внешней среды, сопровождающих эти явления. Это приводит к необходимости разработки специальных методов обработки данных, основанных на учете критических параметров: анализ флуктуаций на фоне тренда, уточнение коэффициентов Фурье временного ряда с дискретными моментами времени.

Цель работы — выявить особенности изменчивости метеорологических параметров (приземных значений давления и температуры воздуха, а также геопотенциала  $H_{500}$ ), характеризующих региональные центры действия атмосферы (ЦДА) над Дальним Востоком в летний период 1980—2017 гг., и дать оценку изменчивости уточненными методами математической статистики. Особое внимание уделяется экстремумам циркуляции атмосферы, температуры воздуха и воды в промысловых районах Японского моря и северо-западной части Тихого океана.

### Методика исследования

Основными данными для расчета режимных характеристик летних ЦДА послужили архивы реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables) атмосферного давления  $P_0$ , геопотенциала  $H_{500}$  и температуры воздуха  $T_a$  в узлах регулярной сетки  $2,5 \times 2,5^\circ$  за период с 1980 по 2017 г. Данные о температуре воздуха были получены на ГМС Японии: Суттсу (Suttsu) ( $42^\circ 47,7'$  с.ш.,  $140^\circ 13,4'$  в.д.); Абасири (Abashiri) ( $44^\circ 01,0'$  с.ш.,  $144^\circ 16,7'$  в.д.);

Немуро (Nemuro) (43°19,8' с.ш., 145°35,1' в.д.) и Токио (Tokyo) (35°41,5' с.ш., 139°45,0' в.д.) и размещены на сайте [https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly\\_s3\\_en.php?block\\_no=47421&view=1](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3_en.php?block_no=47421&view=1).

Источником информации о температуре воды на поверхности океана (ТПО) послужил архив Японского метеорологического агентства ([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly\\_s3\\_en.php?block\\_no=47421&view=1](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3_en.php?block_no=47421&view=1)), содержащий среднемесячные данные на одноградусной сетке за 1980—2017 гг. Средние многолетние значения и среднеквадратические отклонения от них для используемых в работе параметров рассчитаны за базовый период 1981—2010 гг.

Анализ изменчивости температуры поверхности воды проводился к юго-востоку от о. Хоккайдо (39—42° с.ш., 142—146° в.д.), на траверзе пролива Лаперуза (45—48° с.ш., 140—142° в.д.), в области Цусимского течения (37°30'—39°30' с.ш., 135°30'—139°30' в.д.) и в области вод, примыкающих к побережью западной части о. Хоккайдо (41—45° с.ш., 137—140° в.д.).

Для анализа изменчивости режима летних дальневосточной депрессии и охотского антициклона, а также азиатской депрессии и гавайского антициклона рассчитывались среднемесячные значения давления на уровне моря  $P_0$ , геопотенциала  $H_{500}$  на изобарической поверхности 500 гПа и приземной температуры воздуха  $T_a$  над ЦДА. Были получены значения параметров для периода июнь — август (период наиболее интенсивного развития летних ЦДА).

При анализе региональных временных рядов климатических параметров обнаруживаются значительные флуктуации для локальных территорий, что требует уточнения оценок тренда. Параметры флуктуаций во многих исследованиях не учитываются, а их учет необходим для процедур сравнения трендов в разных районах наблюдений.

Анализ таких данных требует более высокого качества применяемых алгоритмов обработки: точности, быстродействия и т. д. Такие требования обычно предъявляются к качеству промышленной продукции [11] и предполагают максимально возможное улучшение используемых методов на каждом этапе.

В нашем случае особый интерес представляют задачи оценки коэффициентов линейной регрессии и показателя обеспеченности тренда. Этот показатель требует знания как коэффициентов регрессии, так и дисперсии флуктуации.

Пусть дан временной ряд  $y_t = at + b + \varepsilon_t$ ;  $t = 1, \dots, n$ ;  $M\varepsilon_t = 0$ ;  $D\varepsilon_t = \sigma^2$ . Методом линейного регрессионного анализа строятся оценки  $\hat{a}$ ,  $\hat{b}$  коэффициентов линейного тренда  $a$ ,  $b$  и по ним оценивается дисперсия  $\sigma^2$  случайной добавки  $\varepsilon_t$ . Наилучший способ оценки дисперсии  $\varepsilon_t$  приведен в монографии [4], где построена остаточная дисперсия

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{a}t - \hat{b})^2.$$

Эта оценка является несмещенной:  $M\hat{\sigma}^2 = \sigma^2$ , и если случайные величины  $\varepsilon_t$  имеют нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией  $\sigma^2$ , то

случайная величина  $\frac{\hat{\sigma}^2(n-2)}{\sigma^2}$  имеет распределение хи-квадрат с  $n-2$  степенями

свободы. Тогда величина  $\frac{\hat{a}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}}$  будет оценкой обеспеченности тренда  $\frac{a}{\sigma}$  и

будет характеризовать роль флуктуаций во временном ряду на фоне тренда.

Пусть флуктуации имеют нормальное распределение и выполняется соотношение  $n \geq 30$ . Тогда при выполнении неравенства  $\left| \frac{\hat{a}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}} \right| \leq 0,04$  принимается ги-

потеза об отсутствии тренда; в противном случае принимается гипотеза о наличии значимого тренда. Вероятность ошибочно отклонить гипотезу об отсутствии тренда приблизительно равна 0,05 [15]. В предположении о нормальности распределения флуктуаций при выполнении гипотезы об отсутствии тренда статистика

$\frac{\hat{a}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}}$  имеет распределение Стьюдента с  $n-2$  степенями свободы, что позволяет

при  $n \geq 30$  проверять данную гипотезу с вероятностью 0,05 ошибочно ее отклонить.

При наличии больших флуктуаций во временном ряду появляется необходимость представлять его в виде ряда Фурье, оценивать коэффициенты Фурье и строить прогноз временного ряда на ближайшие моменты времени. Эта процедура обычно производится оценкой коэффициентов Фурье разности  $y_t - (\hat{a}t + \hat{b})$ , со-

державшей ошибки определения коэффициентов регрессии  $\hat{a}, \hat{b}$ . В результате качество таких оценок падает, а сами оценки вызывают недовольство пользователей. Чтобы избежать этого, предлагается заменить ряд  $y_t, t=1, \dots, n+1$  на ряд последовательных разностей:  $z_t = y_{t+1} - y_t, t=1, \dots, n$ .

Оценка коэффициентов Фурье временного ряда с линейным трендом

$$y_t = at + b + \sum_{k=1}^n a_k \exp\left(\frac{2\pi ikt}{n}\right), \quad t=1, \dots, n+1,$$

производится следующим образом. Пусть известны  $z_t = y_{t+1} - y_t, t=1, \dots, n$ , тогда

$$z_t = \sum_{k=1}^n b_k \exp\left(\frac{2\pi ikt}{n}\right), \quad t=1, \dots, n,$$

где

$$b_k = a_k \left( \exp\left(\frac{2\pi ik}{n}\right) - 1 \right), \quad k=1, \dots, n-1, \quad b_n = a.$$

Вычислив по ряду  $z_t$ ,  $t = 1, \dots, n$ , методом быстрого дискретного преобразования Фурье [18] коэффициенты  $b_k$ ,  $k = 1, \dots, n$ , нетрудно определить  $a_k$ ,  $a$ , используя равенства

$$a_k = \frac{b_k}{\exp(2\pi i k/n) - 1}, \quad k = 1, \dots, n-1, \quad a = b_n.$$

## Оценка обеспеченности тренда в ЦДА

### *Азиатская и летняя дальневосточная депрессии*

На рис. 2 представлена многолетняя изменчивость параметров, характеризующих интенсивность циркуляции в азиатской депрессии (АД) и летней дальневосточной депрессии (ЛДД) (расположенных над континентальными районами Восточной Азии) в июле (центральном месяце летнего сезона), за период 1980—2017 гг.

Значимые тренды в июле 1980—2017 гг. отмечались в средней тропосфере в районе АД (рис. 2 *а*) (обеспеченность тренда равна 0,04). Это означает усиление влияния южного субтропического антициклона над 2-м е.с.р., что было отмечено в работе [16]. Значимые тренды отмечались для обеих депрессий для приземной температуры воздуха (0,05 и 0,07) (рис. 2 *в*, *е*). Видимо, формирование теплых воздушных масс в районе АД и ЛДД было обусловлено усилением субтропических антициклонов в восточных регионах Азии. Так, максимальные значения температуры воздуха в районе АД и ЛДД отмечаются в 2010 и 2017 гг. и совпадают по времени с максимальными значениями геопотенциала  $H_{500}$  в АД. В приземном поле (рис. 2 *б*, *д*) значимых трендов не наблюдалось.

### *Гавайский и охотский антициклоны*

На рис. 3 представлена многолетняя изменчивость аномалий геопотенциала  $H_{500}$ , приземного давления  $P_0$  и температуры воздуха  $T_a$  в области гавайского (ГА) и в охотского (ОА) антициклонов в июле 1980—2017 гг.

Из рис. 3 видно, что в июле 1980—2017 гг. давление в области гавайского антициклона (в пределах 2-го е.с.р.) растет, значимость тренда составляет 0,05 (рис. 3 *а*). У поверхности Земли в области ГА усиливаются флуктуации, и тренд незначим (рис. 3 *б*). Средняя температура воздуха в области ГА в последний период имеет тенденцию к повышению, но тренд незначим (рис. 3 *в*).

В области ОА тенденция изменчивости аномалий  $H_{500}$  напоминает изменчивость в области ГА, но здесь тренд незначим, так как увеличивается повторяемость экстремальных значений геопотенциала  $H_{500}$  (рис. 3 *г*).

В приземном поле в области ОА отмечается тенденция к ослаблению интенсивности ОА, но тренд незначим (рис. 3 *д*). Однако наблюдается интенсивное повышение средней температуры воздуха над акваторией Охотского моря, значимость тренда достигает 0,07 (рис. 3 *е*).

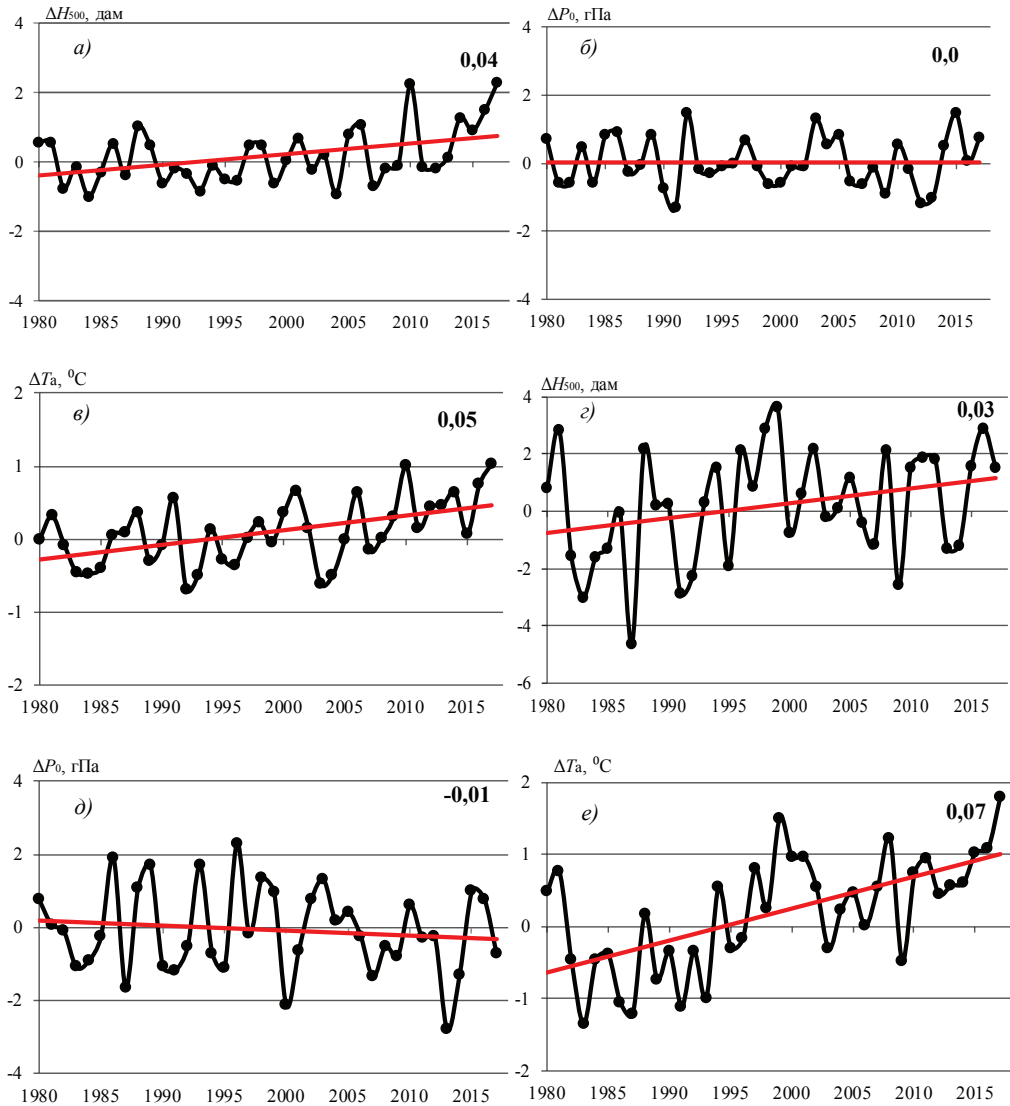


Рис. 2. Многолетняя изменчивость аномалий геопотенциала  $H_{500}$ , приземного давления  $P_0$  и температуры воздуха  $T_a$  в июле 1980—2017 гг. в области азиатской депрессии и летней дальневосточной депрессии: аномалии  $H_{500}$  (а), аномалии  $P_0$  (б) и аномалии  $T_a$  (в) в области АД, аномалии  $H_{500}$  (г), аномалии  $P_0$  (д), аномалии  $T_a$  (е) в области ЛДД.

Цифрами на поле рисунков указана обеспеченность тренда.

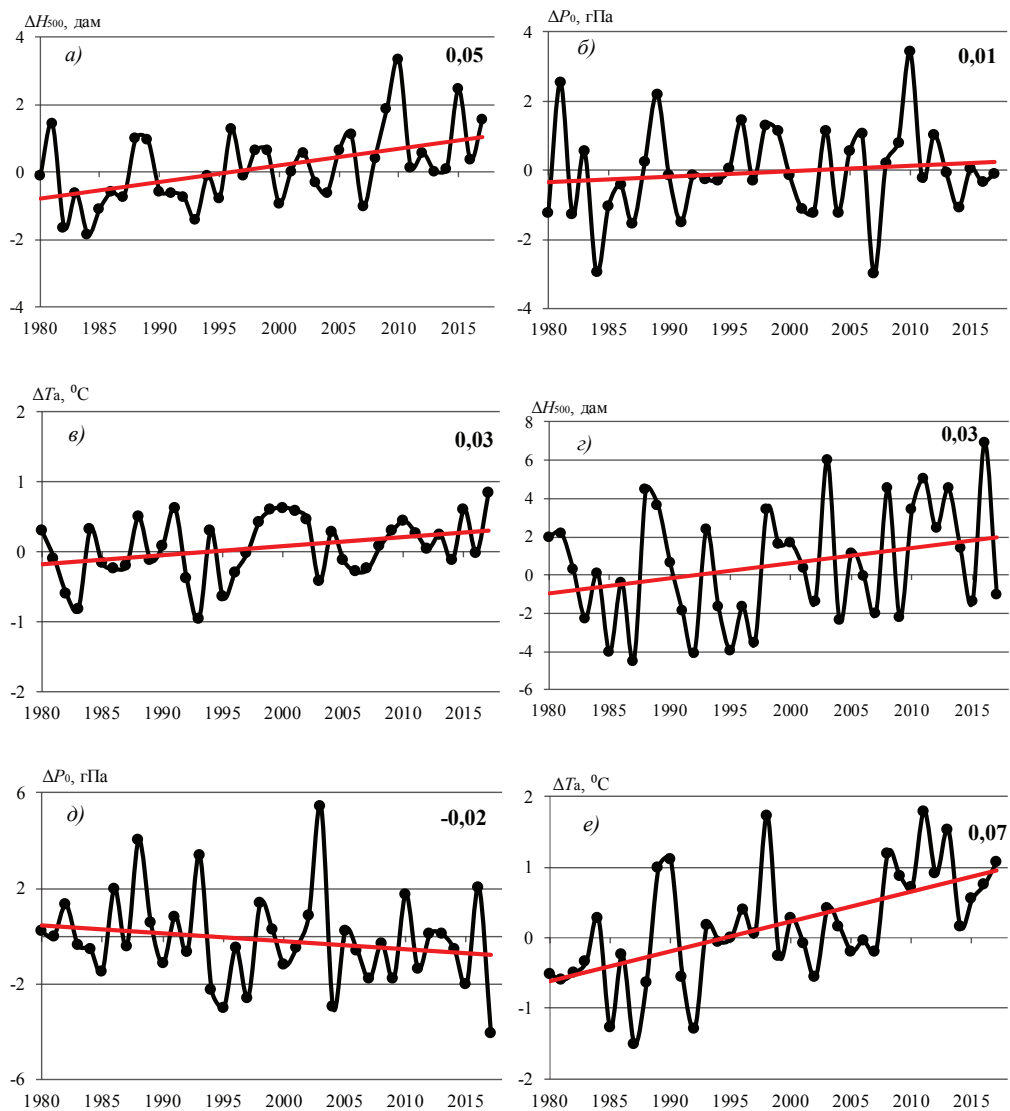


Рис. 3. Многолетняя изменчивость аномалий геопотенциала  $H_{500}$ , приземного давления  $P_0$  и температуры воздуха  $T_a$  в июле 1980—2017 гг. в области гавайского антициклона и области охотского антициклона: аномалии  $H_{500}$  (а), аномалии  $P_0$  (б) и аномалии  $T_a$  (в) в области ГА; аномалии  $H_{500}$  (г), аномалии  $P_0$  (д) и аномалии  $T_a$  (е) в области ОА.

Цифрами на поле рисунков указана обеспеченность тренда.



## Экстремальные параметры циркуляции атмосферы

### *Азиатская и летняя дальневосточная депрессии*

В последнее время уделяется большое внимание экстремальным явлениям и механизмам их влияния на термический режим водной поверхности. В табл. 1 представлены годы с экстремальными значениями параметров циркуляции, характеризующих АД и ЛДД в июне — августе (весь летний период). Экстремальные годы определялись путем анализа графиков многолетних изменений параметров экспертным способом как визуально наиболее отклоняющиеся от оси абсцисс. Экстремальные годы удовлетворяли следующим условиям:  $-0,9 \text{ гПа} \leq H_{500} \geq 1 \text{ гПа}$  в районе АД,  $-3 \text{ гПа} \leq H_{500} \geq 2,5 \text{ гПа}$  в районе ЛДД,  $-0,9 \text{ гПа} \leq P_0 \geq 1 \text{ гПа}$  в районе АД,  $-2 \text{ гПа} \leq P_0 \geq 2 \text{ гПа}$  в районе ЛДД.

Таблица 1

Годы с экстремальными значениями геопотенциала  $H_{500}$  и приземного давления  $P_0$  в области азиатской депрессии и летней дальневосточной депрессии в 1980—2017 гг.

ЦДА	Июнь		Июль		Август	
	$H_{500}$	$P_0$	$H_{500}$	$P_0$	$H_{500}$	$P_0$
АД	<b>1980</b>	<b>1980</b>	1984	1991	1981	1981
	1985	<b>1983</b>	<b>1988</b>	<b>1992</b>	2000	1985
	<b>1998</b>	1984	2004	<b>2003</b>	2005	1988
	2003	1985	<b>2006</b>	2009	<b>2006</b>	<b>1998</b>
	2012	1986	<b>2010</b>	2012	<b>2010</b>	2005
	<b>2013</b>	<b>1996</b>	<b>2014</b>	2013	<b>2016</b>	2007
	<b>2016</b>	<b>2004</b>	<b>2016</b>	<b>2015</b>		2013
		2009	<b>2017</b>			
		2012				
		<b>2016</b>				
ЛДД	1983	2005	<b>1981</b>	<b>1996</b>	1981	<b>1980</b>
	<b>1986</b>	<b>2008</b>	1983	2000	<b>1988</b>	1981
	<b>2004</b>	2009	1987	2013	<b>1991</b>	2013
	<b>2007</b>		<b>1998</b>		<b>2000</b>	
	<b>2008</b>		<b>1999</b>		<b>2001</b>	
	2009		<b>2016</b>		2003	
	<b>2010</b>				<b>2015</b>	
<b>2014</b>						

*Примечание.* Жирным шрифтом выделены годы с экстремально высокими значениями геопотенциала  $H_{500}$  и приземного давления  $P_0$ .

Из таблицы видно, что в области АД в июне экстремально высокими значениями  $H_{500}$  отличались 1980, 1998, 2013 и 2016 гг.; при этом экстремально высокие значения  $P_0$  наблюдались в 1983, 1996 и 2004 гг. (совпадают экстремумы в 1980 и 2016 гг.), а экстремально низкие значения — в 1985, 2003 и 2012 гг.

В июле в АД экстремально высокие значения  $H_{500}$  наблюдались в 1988, 2006, 2010, 2014, 2016 и 2017 гг., а низкие — в 1984 и 2004 гг. Для  $P_0$  экстремально высокие значения наблюдались в 1992, 2003, 2015 гг., а экстремально низкие значения — в 1991, 2009, 2012, 2013 гг. В августе в области АД экстремально низкие значения  $H_{500}$  отмечались в 1981, 2000, 2005 гг., а в 2006, 2010, 2016 гг. — экстремально высокие значения.

В области ЛДД в средней тропосфере максимумы  $H_{500}$  отмечались в июне в 1986, 2004, 2007, 2008, 2010 и 2014 гг., в июле в 1981, 1998, 1999 и 2016 гг. и в августе в 1988, 1991, 2000, 2001 и 2015 гг.

Минимумы  $H_{500}$  в области ЛДД в средней тропосфере отмечались в июне в 1983 и 2009 гг., в июле в 1983 и 1987 гг., в августе в 1981 и 2003 гг. Надо заметить, что повторяемость максимумов в области летней депрессии за весь летний период была больше, чем минимальных значений. В поле  $P_0$  в области летней дальневосточной депрессии экстремально низкие значения наблюдались в июле и августе 2005, 2009 и 2013 гг. Углубление депрессии (экстремально низкие значения  $P_0$ ) в 2013 г. было одной из причин наводнения на Амуре.

В июне в области АД максимум приземного давления и геопотенциала  $H_{500}$  совпадают в 1980 г. А в области ЛДД максимум в поле  $P_0$  в 1980 г. отмечается со сдвигом два месяца (в августе). Максимум в поле  $H_{500}$  в июне 1998 г. в области АД повторяется через месяц в области ЛДД в июле. Максимум в поле  $H_{500}$  в июне 2016 г. в области АД повторяется в области ЛДД в июле. Таким образом, для некоторых лет наблюдается сдвиг максимумов на один-два месяца, что может иметь прогностическую значимость.

### *Гавайский и охотский антициклоны*

В табл. 2 представлены годы с экстремальными значениями  $H_{500}$  и  $P_0$  в области ГА и ОА. В качестве критериев для выбора экстремальных лет использовались следующие значения:  $3 \text{ гПа} \leq H_{500} \leq 4 \text{ гПа}$  в районе ОА,  $-1,9 \text{ гПа} \leq H_{500} \leq 2 \text{ гПа}$  в районе ГА,  $-2,7 \text{ гПа} \leq P_0 \leq 4 \text{ гПа}$  в районе ОА,  $-1,6 \text{ гПа} \leq P_0 \leq 2 \text{ гПа}$  в районе ГА.

Гавайский антициклон был интенсивным (максимальные значения  $H_{500}$  и  $P_0$ ) в июне в 1980, 1982, 2004, 2010 и 2015 гг., в июле в 2010 и 2015 гг., в августе в 2003, 2010 и 2014 гг. Экстремальное ослабление ГА (минимальные значения  $H_{500}$  и  $P_0$ ) наблюдалось в июне 1983, 1993 и 2009 гг.

В районе охотского антициклона в поле приземного давления  $P_0$  максимумы обнаружены в июне в 1981, 1983 и 1989 гг., в июле в 1988 и 2003, в августе в 1980, 2002 гг. Таким образом, в эти годы охотский антициклона был наиболее активен. О его влиянии на климатические аномалии Курило-Хоккайдского района было указано в работе [17].

Для ГА и ОА в июне, июле и августе максимальные значения параметров  $H_{500}$  и  $P_0$  не совпадают. В то же время, максимумы в июне 1980, 2010, 2015 гг. в области ГА совпадают с максимумами в области АД. Таким образом, центры, расположенные в субтропической зоне Тихого океана, имеют взаимное влияние.

Таблица 2

Годы с экстремальными значениями  $H_{500}$  и  $P_0$   
в районе охотского и гавайского антициклонов в летний период 1980—2017 гг.

ЦДА	Июнь		Июль		Август	
	$H_{500}$	$P_0$	$H_{500}$	$P_0$	$H_{500}$	$P_0$
ГА	<b>1980</b>	<b>1980</b>	1982	<b>1981</b>	1984	1984
	<b>1982</b>	1991	1984	1984	1986	1986
	1983	2001	1993	<b>1989</b>	1996	1991
	1993	2009	<b>2010</b>	2007	<b>2003</b>	<b>1998</b>
	<b>2004</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2010</b>	2004	<b>2010</b>
	2009	2012			<b>2010</b>	2015
	<b>2010</b>	2014			2014	
	2015					
ОА	1982	<b>1981</b>	1985	<b>1988</b>	1984	<b>1980</b>
	1985	1982	1987	1995	1986	1990
	<b>1989</b>	<b>1983</b>	<b>1988</b>	<b>2003</b>	1996	<b>2002</b>
	<b>1998</b>	<b>1989</b>	1992	2004	2004	2007
	2001	2001	1995	2017	<b>2006</b>	2010
	2004	2003	1997		2012	
	2005	2005	<b>2003</b>		2015	
	<b>2009</b>	2011	<b>2008</b>		2016	
	2011		2011			

*Примечание.* Жирным шрифтом выделены годы с экстремально высокими значениями геопотенциала  $H_{500}$  и приземного давления  $P_0$ .

### Исследование циклических колебаний

В последние десятилетия определенный интерес проявляется к исследованию цикличности различных явлений, и в частности к использованию этого природного свойства для разработки прогностических методов [1, 8, 10]. В будущем, наряду с применением численных прогностических моделей, будут развиваться и эмпирические методы долгосрочного прогноза, основанные, в частности, на учете аномалий температуры океана, особенно его энергоактивных зон, взаимосвязи условий над различными районами, аналогичности и цикличности циркуляционных процессов [5].

Полученные данные наблюдений указывают на наличие в системе океан — атмосфера короткопериодных климатических параметров с типичной периодичностью от 2 до 10 лет. Такие вариации (или климатические сигналы) представляют собой один из основных объектов исследования, поскольку они определяют межгодовую изменчивость гидрометеорологических полей в глобальном и региональном масштабах [12]. Поскольку значимый тренд параметров, определяющих циркуляцию в ЦДА, был выявлен только для района АД, то для летней депрессии значимость тренда отходит на второй план в сравнении с наличием экстремумов, что делает важным расчет циклов.

*Азиатская и летняя дальневосточная депрессии*

В табл. 3 представлены коэффициенты Фурье, рассчитанные по уточненной методике, которая учитывает флуктуации в циркуляционных индексах, характеризующих региональные центры над 2-м е.с.р. Северного полушария.

Таблица 3

Коэффициенты Фурье для временных рядов параметров  $H_{500}$  и  $P_0$ , характеризующих азиатскую депрессию (АД) и летнюю дальневосточную депрессию (ЛДД) в 1980—2017 гг.

ЦДА	Цикл, число лет	$H_{500}$			$P_0$		
		Июнь	Июль	Август	Июнь	Июль	Август
АД	2	<b>0,16</b>	0,12	0,09	0,13	0,11	<b>0,15</b>
	5	0,04	<b>0,17</b>	0,11	<b>0,15</b>	0,10	0,06
	6	0,04	0,12	0,08	0,09	0,09	<b>0,21</b>
	7	0,07	0,01	0,13	<b>0,20</b>	<b>0,15</b>	0,14
	10	<b>0,28</b>	<b>0,15</b>	<b>0,24</b>	0,06	<b>0,18</b>	0,12
ЛДД	2	<b>0,29</b>	<b>0,42</b>	<b>0,35</b>	<b>0,26</b>	0,07	<b>0,32</b>
	5	<b>0,22</b>	<b>0,44</b>	<b>0,45</b>	0,09	<b>0,34</b>	<b>0,15</b>
	6	0,09	<b>0,37</b>	<b>0,38</b>	0,09	<b>0,21</b>	<b>0,23</b>
	7	0,11	0,07	<b>0,26</b>	<b>0,18</b>	<b>0,17</b>	<b>0,29</b>
	10	<b>0,19</b>	<b>0,39</b>	0,08	0,10	<b>0,30</b>	0,10

*Примечание.* Жирным шрифтом выделены наибольшие значения коэффициентов Фурье.

Из таблицы видно, что для АД доминирующим циклом в средней тропосфере является 10-летний цикл, а для июля еще и 5-летний. В приземном поле в июне и июле доминирующим является 7-летний цикл, а в июле — еще и 10-летний. В другом летнем центре (ЛДД), доминирующими являются короткие 2-летние циклы, а также 5-летние циклы; кроме того, присутствуют и 10-летние циклы.

*Гавайский и охотский антициклоны*

Как и для континентальных ЦДА, вычислим значения коэффициентов Фурье для временных рядов параметров  $H_{500}$  и  $P_0$  для ГА и ОА за период 1980—2017 гг. (табл. 4).

Из таблицы видно, что в июне в области ГА в средней тропосфере  $H_{500}$  доминирующим является 6—7-летний цикл; в июле отмечается один доминирующий период, 5-летний, который был доминирующим и в приземном поле. В августе доминируют в ГА 6—7-летние периоды. В охотском ЦДА в средней тропосфере, кроме 2-летних периодов, доминирующими являются и 6—10-летние периоды.

Выделение циклов уточненным методом Фурье дает возможность представить прогноз аномалий параметров  $H_{500}$  и  $P_0$  для рассматриваемых центров на

Таблица 4

Коэффициенты Фурье  
для временных рядов параметров ( $H_{500}$ ,  $P_0$ ),  
характеризующих гавайский и охотский антициклоны в 1980—2017 гг.

ЦДА	Цикл, число лет	$H_{500}$			$P_0$		
		Июнь	Июль	Август	Июнь	Июль	Август
ГА	2	<b>0,27</b>	0,07	<b>0,21</b>	0,04	0,12	<b>0,26</b>
	5	0,02	<b>0,38</b>	0,12	0,02	<b>0,43</b>	0,09
	6	<b>0,33</b>	0,05	0,15	<b>0,23</b>	<b>0,22</b>	<b>0,28</b>
	7	<b>0,33</b>	0,12	<b>0,31</b>	<b>0,21</b>	<b>0,25</b>	<b>0,39</b>
	10	0,10	0,17	<b>0,25</b>	0,07	0,01	0,08
ОА	2	<b>1,05</b>	<b>0,41</b>	<b>0,34</b>	0,12	0,19	<b>0,49</b>
	5	0,10	<b>0,34</b>	<b>0,39</b>	0,15	0,19	<b>0,30</b>
	6	<b>0,33</b>	<b>0,29</b>	<b>0,27</b>	<b>0,35</b>	<b>0,20</b>	0,16
	7	<b>0,26</b>	<b>0,47</b>	<b>0,27</b>	0,10	<b>0,40</b>	0,11
	10	<b>0,80</b>	<b>0,22</b>	0,18	0,04	0,15	0,27

Примечание. Жирным шрифтом выделены наибольшие значения коэффициентов Фурье.

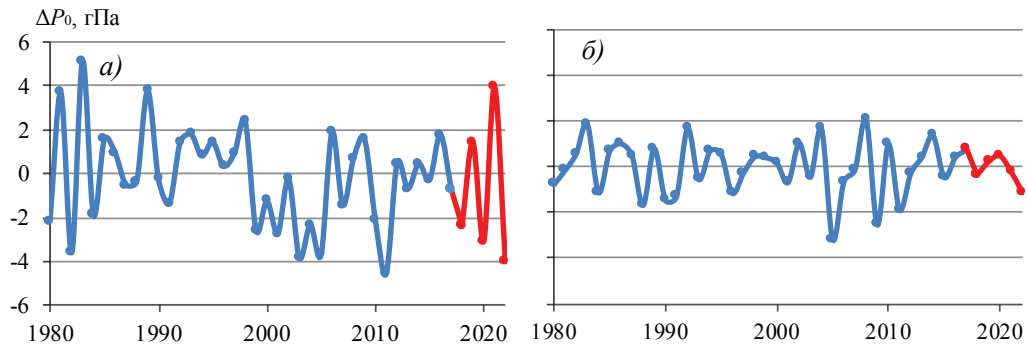


Рис. 4. Аномалии приземного давления в Охотском море (а) и в области летней дальневосточной депрессии (б) с 1980—2017 гг. (синий цвет); прогноз для периода 2018—2022 гг. (красный цвет).

период 5 лет по ряду за 1980—2017 гг. Заметим, что для прогноза использованы не только доминирующие циклы, но и все гармоники. В качестве примера на рис. 4 представлены аномалии приземного давления для акватории Охотского моря и области летней дальневосточной депрессии и прогноз на пятилетний период.

Из рис. 4 следует, что в июне 2019 г. возможно усиление ОА, ЛДД ожидается в пределах нормы, также охотский антициклон будет усиливаться в июне 2021 г. В 2019 г. этот прогноз полностью оправдался. Усиление антициклона в Охотском море способствует формированию отрицательных аномалий температуры воды в северо-западной части Тихого океана и Японском море.

### Примеры влияния изменчивости параметров ЦДА на термический режим Японского моря и северо-западной части Тихого океана

Выявленная изменчивость циркуляции атмосферы (индикатором которой являются ЦДА) обусловила изменения климата и повторяемость экстремальных явлений над территорией Дальнего Востока. Особенно важно знать влияние экстремумов параметров циркуляции атмосферы на динамический и термический режим в промысловых районах Дальнего Востока в летний период, когда ведется промысел сайры, сардины и скумбрии. Эти изменения представлены на графиках многолетней изменчивости аномалий температуры воздуха на гидрометеорологических станциях (ГМС) и температуры воды в районах Японского моря и Северо-Западной части Тихого океана, расположенных в области основных течений (Цусимское течение, Куроисио и Ойясио).

На рис. 5 представлена многолетняя изменчивость аномалий температуры воздуха на ГМС Суттсу (западное побережье о-ва Хоккайдо), Абасири (северо-восточное побережье о-ва Хоккайдо), Немуро (юго-восточное побережье о-ва Хоккайдо) и Токио (восточное побережье о-ва Хонсю) в июле 1980—2017 гг.

В ходе аномалий температуры воздуха на станциях о-ва Хоккайдо в июле отмечалось значимое повышение температуры (обеспеченность тренда составляла 0,04), что согласуется со значимостью тренда  $H_{500}$  в АД и ГА. В то же время наблюдаются и эпизоды значительного похолодания. В табл. 5 представлены годы с экстремальными значениями аномалий температуры воздуха.

Таблица 5

Годы с экстремальными значениями аномалий температуры воздуха  
на ГМС Японии в 1980—2017 гг.

Июль				Август			
Суттсу	Абасири	Немуро	Токио	Суттсу	Абасири	Немуро	Токио
1983	1983	1983	1980	1980	1980	1980	1980
1986	<b>1984</b>	<b>1984</b>	1982	1993	1987	1987	1993
1988	1986	1986	1983	<b>1994</b>	1993	<b>1989</b>	<b>1995</b>
2003	1988	1988	1988	<b>1999</b>	<b>1994</b>	<b>1994</b>	<b>2010</b>
<b>2010</b>	<b>2000</b>	<b>2000</b>	1993	<b>2010</b>	1997	1997	
	2003	2003	<b>1994</b>		1999	1999	
	2013	2004	2001		2002	2001	
	<b>2017</b>	<b>2013</b>	2002		<b>2006</b>	2002	
		2015	2003		<b>2010</b>	2003	
		2017	2004		2016	2010	
			2010			2016	

*Примечание.* Жирным шрифтом выделены экстремально теплые годы (аномалии более 2 °С).

Экстремальные по термическому режиму годы совпадают с экстремумами параметров ЦДА. Так, в области АД максимальные значения  $H_{500}$  отмечались

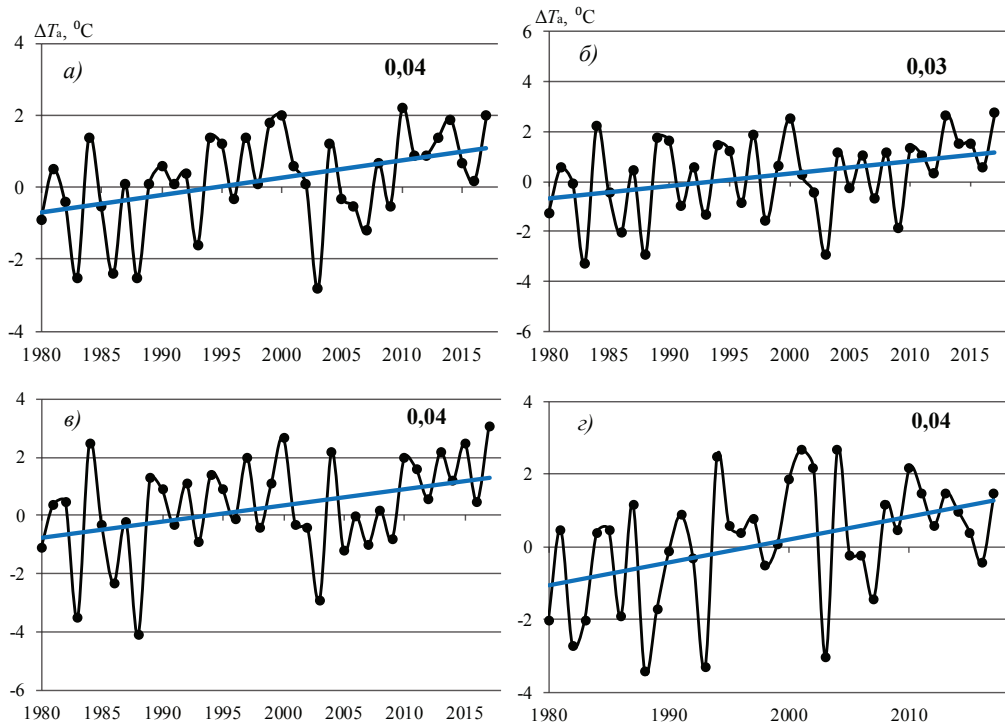


Рис. 5. Многолетняя изменчивость аномалий температуры воздуха на ГМС Японии в июле 1980—2017 гг. и линейные тренды.

*а* — Сутсу, *б* — Абасири, *в* — Немуро, *з* — Токио.  
 Цифрами на графиках указана значимость тренда.

в 2013, 2016, 2010 гг., в области ГА — в 1980, 2004, 2010, 2016 гг., в области ОА максимальными значения  $P_0$  были в 1983, 1988, 1993 гг. Похолодания (1980, 1983, 1986, 1988, 1993, 2003 гг.) на гидрометеорологических станциях Японии согласуются с максимальными значениями  $P_0$  в июне и июле в Охотском море.

В период 1980—2017 гг. наблюдались заметные изменения температуры поверхности воды в северо-западной части Тихого океана (СЗТО) и в Японском море. На рис. 6 представлены аномалии температуры поверхности воды в проливе Лаперуза, у юго-западного побережья о-ва Хоккайдо, в области Цусимского течения и у юго-западного побережья о-ва Хоккайдо.

Для всех представленных районов, расположенных в Японском море и СЗТО, тренды значимы. В табл. 6 представлены годы с экстремальными значениями аномалий температуры воды.

В области пр. Лаперуза экстремально теплыми в июле были 2010 и 2014 гг., у юго-восточного побережья о-ва Хоккайдо — 1984, 2011, 2014, 2015 и 2017 гг. В южных районах Японского моря экстремально теплыми были 2010, 2014 и

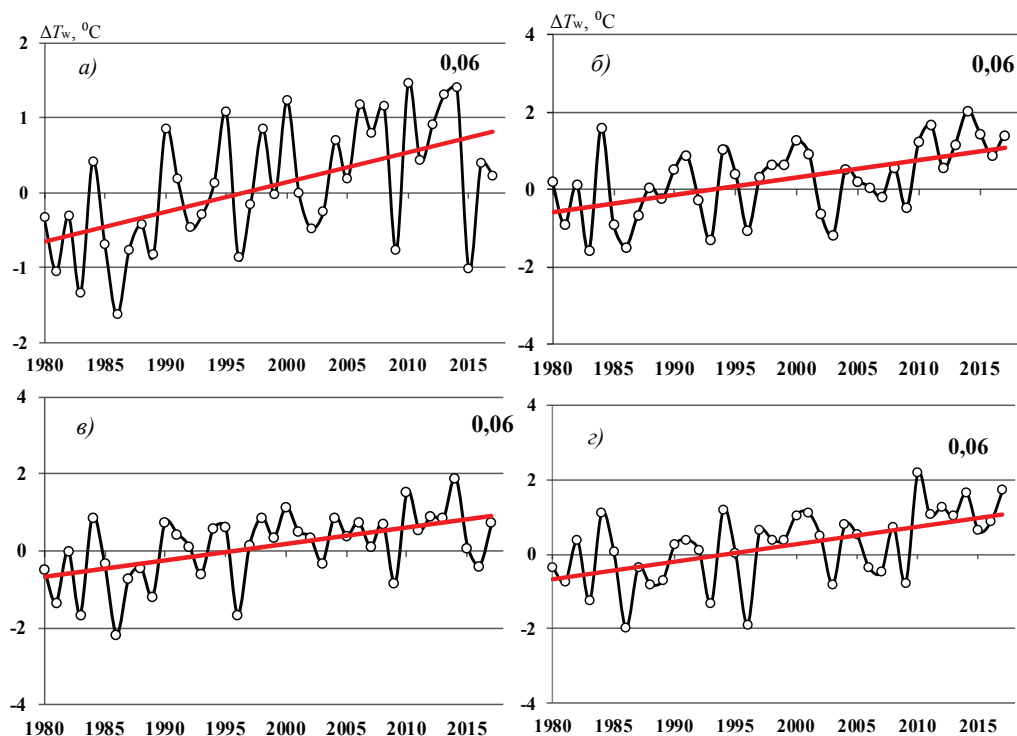


Рис. 6. Многолетняя изменчивость аномалий температуры воды в июле в 1980—2017 гг.

*a* — пролив Лаперуза, *б* — у юго-восточного побережья о-ва Хоккайдо, *в* — у юго-западного побережья о-ва Хоккайдо, *г* — в области Цусимского течения. Цифрами на поле рисунков указана значимость тренда.

2017 гг. Чаще всего холодными годами в июле были 1983 и 1986 гг. В августе чаще всего экстремально теплыми годами были 2010, 2014 и 2016 гг., а холодными — 2002, 2003, 1993 и 1980 гг. Из табл. 6 видно, что максимумы в АД (2010, 2014, 2016 и 2017 гг.) согласуются с экстремумами в термическом режиме вод Японского моря и СЗТО. Холодные годы согласуются с усилением интенсивности ОА и ослаблением влияния ГА (1983 и 1993 гг.).

В качестве примера механизма влияния экстремумов в циркуляции атмосферы на термический режим вод Японского моря и СЗТО представлены среднемесячные поля приземного давления и геопотенциала  $H_{500}$  в июле 2017 г., в августе 2016 г. и в июле 1993 г. (рис. 7). На приземных картах давления выделены очаги экстремальной температурой воздуха у поверхности Земли и обозначены области с высокими значениями температуры поверхности воды. На картах  $AT_{500}$  выделены области с экстремальными значениями  $H_{500}$ .



Таблица 6

Годы с экстремальными значениями аномалий температуры воды в июле и августе 1980—2017 гг. в районах Японского моря и СЗТО

Июль				Август			
пр. Лаперуза	Ю-В Х.	З Х.	ЦТ	пр. Лаперуза	Ю-В Х.	З Х.	ЦТ
1986	1983	1983	1986	2002	1984	1981	1980
<b>2010</b>	<b>1984</b>	1986	1996	<b>2006</b>	1993	1993	<b>1985</b>
<b>2014</b>	1986	1996	<b>2010</b>		<b>1994</b>	1996	1991
	2011	2010	2014		<b>1999</b>	<b>2000</b>	1993
	2014	2014	2017		2002	2006	1994
	2015				2003	<b>2010</b>	2009
	2017				2010	2012	2010
					2015	2016	2012
							2014
							2016

Примечания: 1. Ю-В Х. — юго-восточное побережье о-ва Хоккайдо, З Х. — западное побережье о-ва Хоккайдо, ЦТ — Цусимское течение. 2. Жирным шрифтом выделены экстремально теплые годы (аномалии более 2 °С).

Из рисунка видно, что в июле 2017 г. Японское море и СЗТО находились в зоне влияния гребня гавайского антициклона и происходил интенсивный вынос теплых воздушных масс, о чем свидетельствует положение очагов с экстремально высокой температурой воздуха. В средней тропосфере высокие значения геопотенциала  $H_{500}$  отмечаются в широтном поясе 35—45° с.ш. Положение областей с экстремальными значениями  $H_{500}$  практически совпадает с положением областей с экстремальной температурой воздуха и воды.

В августе 2016 г. гавайский антициклон был аномально интенсивен, его гребень оказывал воздействие на Курило-Сахалинский регион. О его мощности свидетельствует очаг с экстремально высокой температурой воздуха, расположенный над Курильской грядой (см. рис.7 в). В средней тропосфере в этих районах отмечалась область с экстремально высокими значениями  $H_{500}$ . Аномально теплая вода отмечалась в прибрежных районах о. Хоккайдо и у Курильских островов.

В июле 1993 г. над Охотским морем был хорошо развит антициклон, а влияние ГА было ослаблено. В результате выноса холодного полярного воздуха на Японское море и СЗТО над ними сформировались очаги с аномально низкой температурой воздуха, что привело к формированию отрицательных аномалий температуры воды (см. рис.7 д). В средней тропосфере в восточной части Охотского моря наблюдалась холодная депрессия, а в дельте ложбины — очаг с аномально низкими значениями  $H_{500}$ . Он совпадает с экстремально низкими значениями температуры воздуха и воды.

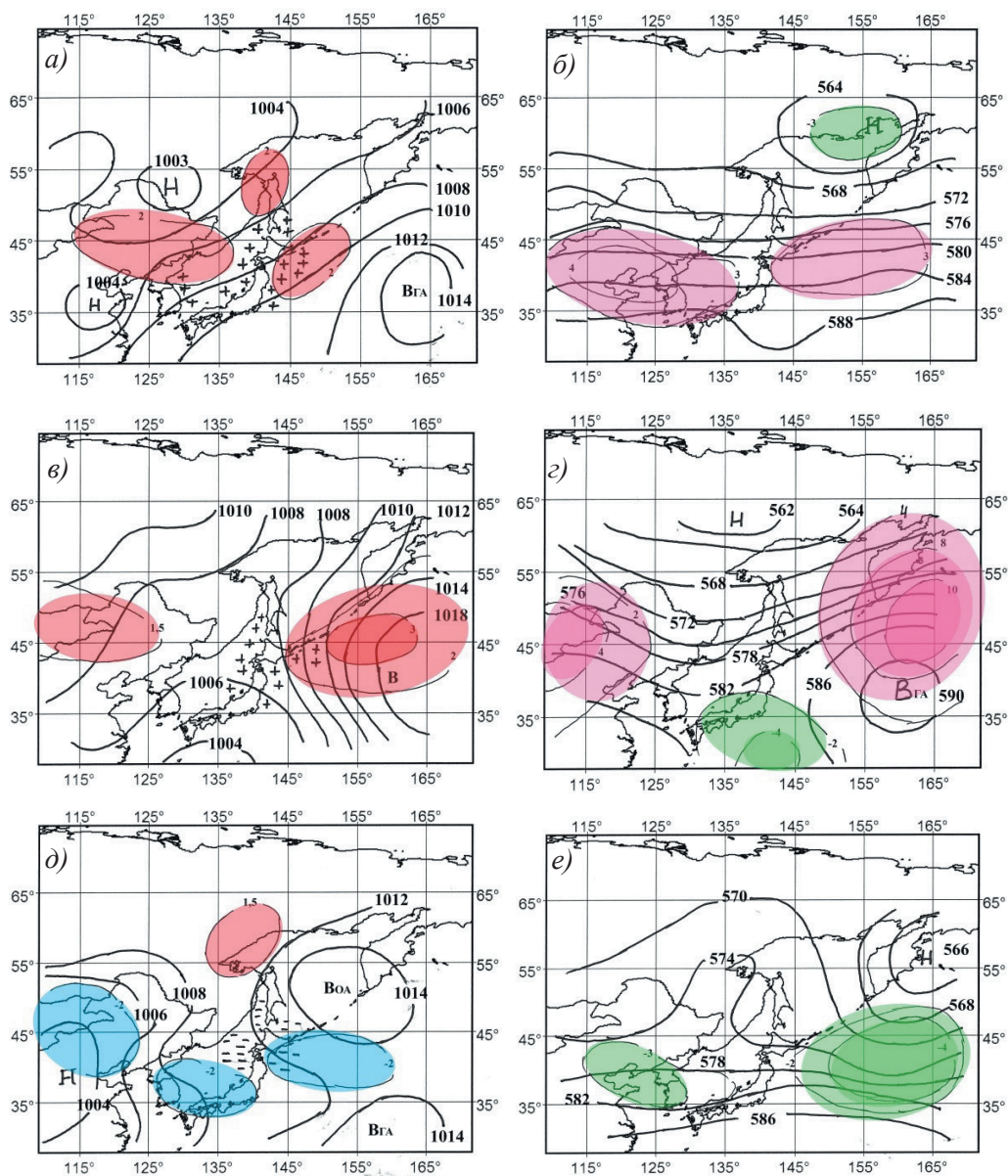


Рис. 7. Среднемесячные поля приземного давления и геопотенциала  $H_{500}$  над центральным сектором 2-го е.с.р.: в июле 2017 г.  $P_0$  (a) и  $H_{500}$  (б), в августе 2016 г.  $P_0$  (в) и  $H_{500}$  (г), в июле 1993 г.  $P_0$  (д) и  $H_{500}$  (е).

Красным цветом указано положение очагов с экстремально высокой температурой воздуха, а синим — с низкой. Зеленым цветом показаны очаги anomalно низких значений геопотенциала, розовым — очаги высоких значений геопотенциала. Крестиками указаны области с экстремально высокой температурой воды. Штриховкой указана область с экстремально низкой температурой воды.

## Заключение

Оценка обеспеченности тренда в центрах действия атмосферы над Дальним Востоком в летний период 1980—2017 гг. показала, что значимые тренды наблюдались в средней тропосфере  $H_{500}$  в области азиатской депрессии и в области гавайского антициклона.

В летней дальневосточной депрессии и охотском антициклоне тренды оказались незначимы из-за больших флуктуаций параметров. Выделены экстремальные режимы в циркуляции ЦДА. Показано, что практически все максимумы в термическом режиме атмосферы и океана совпадают с максимумами в циркуляции атмосферы над 2-м е.с.р. Северного полушария.

Значимые тренды определены и для локальных районов, таких как ГМС Японии, расположенных на о-ве Хоккайдо, а также для температуры воды в локальных районах Японского моря и СЗТО. Эти результаты основаны на анализе режимов циркуляции для всех ЦДА: летней дальневосточной депрессии и охотского антициклона, а также области азиатской депрессии и области гавайского антициклона.

Уточненный метод Фурье дает возможность представить прогноз аномалий параметров  $H_{500}$  и  $P_0$  для рассматриваемых центров на период 5 лет.

## Список литературы

1. Антонов А.Е. Природная циклоэнергетика. Гидрометеорологическое и рыболовное прогнозирование. СПб: Гидрометеоиздат, 2007. 216 с.
2. Апасова Е.Г. О характеристиках местоположения ЦДА // Труды ВНИИГМИ — МЦД. 1979. Вып. 58. С. 89—98.
3. Богдановская Т.В., Богдановский А.А. Изменчивость положения центров действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона и их вклад в формирование аномалий температуры воздуха Сахалина // Гидрометеорологические и экологические условия дальневосточных морей: оценка воздействия на морскую среду. Тематический выпуск ДВНИГМИ. 2000. № 3. С. 26—33.
4. Боровков А.А. Математическая статистика. Дополнительные главы. М.: Наука. 1984.
5. Васильев А.А., Вильфанд Р.М. Прогноз погоды. М.: изд-во Росгидромета, 2008. 60 с.
6. Ильинский О.К. Дальневосточная депрессия // Труды ДВНИГМИ. 1965. Вып. 11. С. 3—53.
7. Ильинский О.К. Охотский антициклон // Труды ДВНИГМИ. 1959. Вып. 7. С. 10—32.
8. Карпова И.П., Сустанов Ю.В., Николаев Д.Л. Использование приемов экстраполяции временных рядов в методах сверхдолгосрочного прогнозирования // Методы расчета и прогноза гидрометеорологических процессов в промысловых районах. 1991. Вып. 112. С. 38—50.
9. Мартынова Т.В. О колебании положения и интенсивности ЦДА // Метеорология и гидрология. 1990. № 4. С. 50—55.
10. Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса «Призма». Мурманск: изд-во ПИПРО, 1997. 40 с.
11. Николаева Э.К. Семь инструментов качества в японской экономике. М.: Изд-во стандартов. 1990. С. 88.
12. Полонский А.Б., Кибальчич И.А. Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 5—17.
13. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 568 с.
14. Шатилина Т.А., Кравченко Р.Б. Результаты классификации временного ряда температуры воды в Южно-Курильском районе и связь с региональными атмосферными индексами // Изв. ТИПРО. 2013. Т. 172. С. 208—223.

15. Шатилина Т.А., Цицашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Особенности изменения приземной температуры воздуха над районами Дальнего Востока в 1976—2005 гг. // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 31—35.
16. Шатилина Т.А., Цицашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Оценка тенденций изменчивости центров действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом в летние периоды 1950—1979 и 1980—2012 гг. // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 17—28.
17. Шатилина Т.А., Цицашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Режим охотского антициклона и климатические экстремумы в Курило-Хоккайдском регионе в летний период 1950—2017 гг. / Тезисы Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития». СПб, 2018. С. 491—494.
18. Cooley J.W., Tukey J.W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series // Mathematics of Computation. 1965. V. 19, No. 90. P. 297—301.