

УДК 551.5(265.53)

Т.А. Шатилина¹, Г.Ш. Цициашвили², Т.В. Радченкова^{2*}¹ Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИПРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4;² Институт прикладной математики ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ИНТЕРВАЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ БАРИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ В ЮЖНОКУРИЛЬСКОМ РАЙОНЕ ТИХОГО ОКЕАНА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Методом интервального распознавания выделены особенности предшествующих барических полей, определяющие экстремальные термические режимы в прибрежных водах южнокурильского района в июле и августе. Показано, что наибольшие коэффициенты распознавания для экстремальных термических режимов в южнокурильском районе по данным геопотенциала H_{500} над 2-м естественным синоптическим районом обнаруживаются в феврале, марте, мае, июне. Для экстремально холодных режимов в южнокурильском районе в июле и августе в феврале и марте характерно интенсивное развитие над восточным побережьем Азии тропосферной ложбины, а в мае и июне — наличие тропосферных депрессий над Охотским морем. Для теплых режимов барическая структура существенно отличается. В предшествующий период в феврале-июне для экстремально теплых лет характерно наличие тропосферного гребня над северо-западной частью Тихого океана и отсутствие депрессий над Охотским морем. В эти годы область с положительными значениями аномалий геопотенциала H_{500} располагается над СЗТО и Курильскими островами.

Ключевые слова: южнокурильский район, метод интервального распознавания, барические структуры, тропосферные депрессии, тропосферные гребни.

DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-470-483.

Shatilina T.A., Tsitsiashvili G.Sh., Radchenkova T.V. Application of interval approach to pattern recognition for identification of preceding baric structures that determine extreme thermal modes in the South-Kuril area in summer // *Izv. TINRO*. — 2021. — Vol. 201, Iss. 2. — P. 470–483.

Patterns of atmosphere baric fields preceded to development of extreme thermal modes in the South-Kuril area in summer are identified using the interval approach to their recogni-

* Шатилина Татьяна Александровна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: tatyana.shatilina@tinro-center.ru; Цициашвили Гурам Шалвович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: guram@iam.dvo.ru; Радченкова Татьяна Вадимовна, младший научный сотрудник, e-mail: tarad@yandex.ru.

Shatilina Tatiana A., Ph.D., leading researcher, Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: tatyana.shatilina@tinro-center.ru; Tsitsiashvili Guram Sh., D.Math., professor, principal researcher, Institute of Applied Mathematics, 7, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: guram@iam.dvo.ru; Radchenkova Tatyana V., junior researcher, Institute of Applied Mathematics, 7, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: tarad@yandex.ru.

tion. The best recognition rates are noted for the field of AT 500 hPa over the region of East Asia in February, March, May, and June. Extreme cold summer conditions in the South-Kuril area in summer were preceded by development of AT 500 hPa trough and baric depression at the sea surface over East Asia in these winter and spring months. Warm summer conditions in the South-Kuril area were preceded by opposite patterns, as AT 500 hPa ridge over the North-West Pacific and high pressure over the Okhotsk Sea, with positive anomalies of H_{500} height over the North-West Pacific and Kuril Islands.

Key words: South-Kuril area, interval approach to pattern recognition, baric structure, troposphere trough, troposphere ridge.

Введение

Анализ ошибок прогнозирования температуры воды по линейным моделям для прибрежных вод южнокурильского района (ЮКР) [Шатилина и др., 1992; Шатилина, 1995] показал, что количество неоправдавшихся прогнозов увеличивается в июле-августе (время формирования нагульных скоплений сайры), а наиболее крупные расхождения между прогнозируемыми значениями температуры воды и истинными наблюдаются при аномально больших изменениях ее температуры.

Таким образом, появилась необходимость разработки метода прогноза экстремальных условий в ЮКР. Такой метод был впервые использован авторами настоящей статьи для распознавания экстремальной ледовитости Японского и Охотского морей ранее [Шатилина и др., 2006; Efficient Algorithms of Time..., 2009].

В последующих работах [Цициашвили и др., 2012; Шатилина и др., 2016] показано, что использование метода интервального распознавания позволяет определить формирование экстремальных термических условий в летний сезон по развитию атмосферных процессов в предшествующие месяцы. Было продемонстрировано преимущество метода интервального распознавания для прогноза резких изменений температуры воды, что не могут обеспечить методы регрессионного анализа в условиях больших флюктуаций температуры воды и воздуха.

Выбор признаков для распознавания экстремумов в ЮКР основывается на качественной концепции влияния барических полей на термический режим Японского и Охотского морей и прилегающей части Тихого океана.

Цель работы — с помощью метода интервального распознавания выделить барические структуры для распознавания экстремальных термических условий в ЮКР в летний период.

Материалы и методы

Для анализа термических условий использовались архив японского метеорологического агентства JMA [<http://ds.data.jma.go.jp>] за период 1980–2019 гг. и данные измерений температуры воды на сети гидрометеорологических станций (ГМС) Росгидромета с 1977 по 2017 г. из архива ВНИГМИ-МЦД [<http://meteo.ru>]. Анализ и качество этих данных подробно описаны в литературе [Ростов и др., 2017]. Для анализа термических условий в прибрежных водах ЮКР были использованы ГМС Южно-Курильск, Курильск и Малокурильское. Анализ изменчивости температуры воды на поверхности приводится в юго-западной части Охотского моря в области течения Соя ($45^{\circ}30'–47^{\circ}30'$ с.ш. $143^{\circ}30'–146^{\circ}30'$ в.д.), в ЮКР ($42^{\circ}30'–44^{\circ}30'$ с.ш. $146^{\circ}30'–149^{\circ}30'$ в.д.) и к юго-востоку от о. Хоккайдо (ЮВХ) по данным JMA за период 1985–2019 гг.

Основными данными послужили также архивы реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables) атмосферного давления, полей геопотенциала H_{500} и температуры воздуха в узлах регулярной сетки $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ за период с 1980 по 2019 г. Средние многолетние значения и среднеквадратичные отклонения от них для используемых в работе параметров рассчитаны за базовый период 1981–2010 гг.

Идея применения метода интервального распознавания исходит из предположения, что экстремальные макропроцессы в летний период формируются в предшествующие

периоды, т.е. имеют предысторию в своем развитии. Так, в работе Е.В. Завьялова с соавторами [2019] при разработке прогноза аномально жарких температурных условий в нижнем Поволжье авторы ссылаются на положение Б.П. Мультановского [1933] о фазировке макроциркуляционных процессов, который полагает, что аномалии климатических характеристик определяются макроциркуляционными процессами, формирование которых происходит в течение длительного предшествующего периода.

В данной работе в качестве признаков для распознавания аномальных значений температуры воды используются данные H_{500} в узлах 5-градусной сетки для трех районов 2-го естественного синоптического района: южного (30–40° с.ш. 120–160° в.д.), умеренного (45–55° с.ш. 120–160° в.д.) и северного (60–70° с.ш. 120–160° в.д.).

Метод интервального распознавания отчасти напоминает метод планирования экспериментов [Налимов, 1971], в котором все эксперименты проводятся при минимальных и максимальных значениях отдельных факторов. В методе интервального распознавания минимальные и максимальные значения отдельных признаков становятся концами интервалов, по которым строится процедура распознавания.

Коэффициент интервального распознавания критических объектов $n = r/(r + m)$, где r — число критических объектов (годы с аномальной температурой воды), а m — число не критических объектов, ошибочно распознаваемых как критические, является своеобразным аналогом коэффициента множественной регрессии. Этот метод так устроен, что критические годы в обучающей выборке всегда распознаются, что очень важно при прогнозировании критических лет и характеризует вероятность ошибочно не распознать подобный год. Значение $n = 1$ означает, что все критические годы с экстремальной температурой воды распознаются как критические по значениям сопутствующего признака (параметр H_{500}). Однако некоторые не критические годы также могут распознаваться как критические (значение коэффициента распознавания меньше 1). Особенностью данного метода становится тот факт, что его вычислительная сложность линейно зависит от числа объектов в выборке и от числа признаков. Это обеспечивает достаточно хорошую скорость вычислений.

Для верификации результатов интервального распознавания анализируется динамика предшествующих барических полей, определяющих аномальные термические режимы в прибрежных водах ЮКР в летний сезон.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе мы применяли метод интервального распознавания в годы, когда аномалии температуры воды изменялись в диапазоне $\Delta T_w > 1,5$ °C; $\Delta T_w < -1,5$ °C, что незначительно превышает нормальные значения температуры воды в летний период в этом районе (табл. 1).

На станции Курильск количество холодных и теплых лет в июле — 7, а в августе холодных лет было 8, теплых — 10. На станции Южно-Курильск в июле количество холодных лет составило 3, а теплых — 4, в августе холодных лет было 5, теплых — 7. На станции Малокурильское холодных лет было в июле 5, теплых — 7, в августе количество холодных лет увеличилось до 9, количество теплых составило 8 лет.

На следующем этапе мы изменили интервал аномалий температуры воды до значений $\Delta T_w > 2$ °C; $\Delta T_w < -2$ °C. Эти значения экстремальны на ГМС Курильск, Южно-Курильск и Малокурильское, а также в области течения Соя, ЮКР и ЮВХ и представлены в табл. 2.

Для этого интервала количество экстремальных лет уменьшается. Так, на станции Курильск холодных лет в июле было 3, а теплых — 4, в августе — 3 и 5. В Южно-Курильске в июле был один холодный и один теплый год, в августе был один холодный и три теплых. На ГМС Малокурильское количество лет с экстремальными режимами увеличивается. В июле количество холодных лет составило 4 случая, а теплых было всего 3, в августе холодных было 3, а теплых — 5 лет.

Таблица 1
Годы со значениями аномалий температуры воды в диапазоне $\Delta T_w > 1,5$ °C; $\Delta T_w < -1,5$ °C на ГМС южных Курильских островов в период 1977–2017 гг.

Table 1
Years with extreme SST anomalies ($\Delta T_w > 1,5$ °C; $\Delta T_w < -1,5$ °C) at meteorostations on southern Kuril Islands in 1977–2017

Курильск		Южно-Курильск		Малокурильское	
Июль	Август	Июль	Август	Июль	Август
1978	1978	1983	1985	1978	1980
1983	1980	1984	1987	1983	1983
1984	1987	1986	1988	1986	1985
1986	1988	1989	1994	1987	1986
1988	1989	2000	1999	1988	1987
1995	1994	2010	2000	1995	1988
1998	1995	2014	2002	2000	1989
2000	1997		2003	2003	1994
2003	1998		2004	2004	1995
2004	1999		2006	2010	1997
2009	2000		2010	2011	1999
2012	2002		2014	2017	2002
2015	2003				2003
2016	2004				2004
	2005				2010
	2010				2011
	2014				2014
	2016				

Примечание. Жирным шрифтом выделены годы с аномалией температуры воды $\Delta T_w > 1,5$ °C, без выделения — годы с аномалией температуры воды $\Delta T_w < -1,5$ °C.

Таблица 2
Годы с экстремальными значениями аномалий температуры воды $\Delta T_w > 2$ °C; $\Delta T_w < -2$ °C на ГМС южных Курильских островов в 1977–2017 гг. и в районах Соя, ЮКР, ЮВХ в 1985–2019 гг.

Table 2
Years with extreme SST anomalies ($\Delta T_w > 2$ °C; $\Delta T_w < -2$ °C) at meteorostations on southern Kuril Islands in 1977–2017 and in three marine areas: Soya Current, South-Kuril area, and the area southeastward from Hokkaido in 1985–2019

Курильск		Южно-Курильск		Малокурильское		Соя		ЮКР		ЮВХ	
Июль	Август	Июль	Август	Июль	Август	Июль	Август	Июль	Август	Июль	Август
1978	1978	1989	1988	1978	1980	1986	1992	1985	1987	1986	1993
1983	1980	2000	1994	1983	1988	1990	1993	1986	1994	1993	1994
1986	1987		1999	1986	1994	1995	1994	1998	1998	1994	1999
1988	1988		2010	1987	1999	1997	1997	2000	2002	2003	2002
1995	1994			1988	2003	2000	2002	2013	2003	2009	2003
2004	1999			1995	2004	2010	2003	2019	2016	2011	2009
2016	2003			2003	2010	2013	2010		2019	2014	2010
	2004			2004	2011		2011			2017	2012
	2010										2013
											2015
											2016

Примечание. Жирным шрифтом выделены годы с аномалией температуры воды $\Delta T_w > 2$ °C, без выделения — годы с аномалией температуры воды $\Delta T_w < -2$ °C.

В области течения Соя (юго-западная часть Охотского моря) холодных лет в июле было 2, а экстремально теплых — 5 лет. В августе в этом районе число холодных лет увеличивается до 5, а экстремально теплых — уменьшается до 3. В ЮКР в июле экс-

тремально холодных было 2 года, а экстремально теплых — 4. В августе экстремально холодных было 3, а экстремально теплых — 4. К юго-востоку от о. Хоккайдо в июле количество холодных лет составило 4, теплых — тоже 4, в августе количество холодных лет составило 4, а теплых — увеличилось до 7 лет.

Одним из информативных предикторов для прогноза температуры воды в описанных районах является геопотенциал H_{500} . Так, в работе Т.А. Шатилиной с соавторами [2019] показано, что положение областей с экстремальными значениями H_{500} практически совпадает с положением областей, где температура воздуха и воды тоже является экстремальной. Рисунок 1, где представлен сравнительный ход аномалий геопотенциала H_{500} в периоды, когда аномалии температуры воды ниже $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и когда аномалии температуры воды изменяются выше $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, также подтверждает физическое обоснование выбора предиктора H_{500} для прогноза температуры воды.

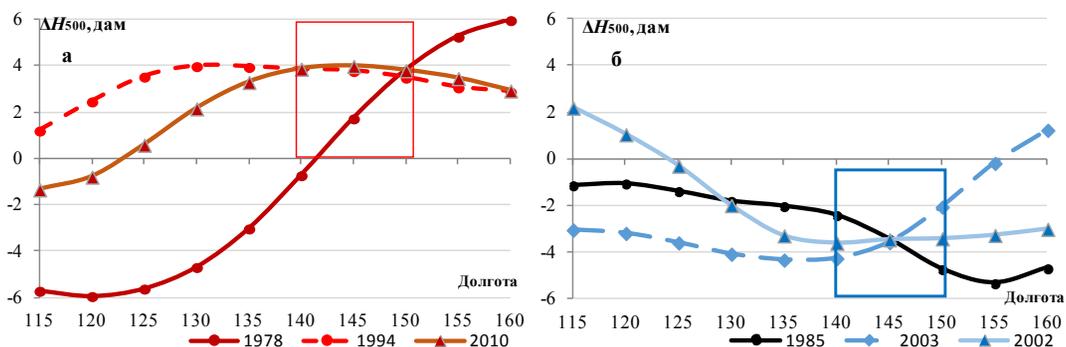


Рис. 1. Изменчивость аномалий геопотенциальных высот H_{500} между $115\text{--}160^{\circ}$ в.д.: а — на 50° с.ш. в июле 1978, на 45° с.ш. в августе 1994 и 2010 гг.; б — на 50° с.ш. в июле 1985, на 45° с.ш. в августе 2002 и 2003 гг. Квадратами на графиках выделена область ЮКР

Fig. 1. Anomalies of H_{500} height between $115\text{--}160^{\circ}$ E: а — along 50° N in July, 1978 and along 45° N in August, 1994 and 2010; б — along 50° N in July, 1985 and along 45° N in August, 2002 and 2003. The South-Kuril area is marked

Различие в ходе аномалий H_{500} в экстремально теплые (рис. 1, а) и холодные годы (рис. 1, б) дает нам основание применить метод интервального распознавания для выделения предшествующих барических полей, обуславливающих экстремальные похолодания или потепления. Это различие может также означать разные фазы крупномасштабных макропроцессов, определяющих режим вод в ЮКР, особенно его экстремумы.

Результаты интервального распознавания предшествующих барических процессов, определяющих экстремумы в термическом режиме вод

На первом этапе метод интервального распознавания низких значений аномалий температуры воды применялся для значений $\Delta T_w < -1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на ГМС южных Курильских островов в июле-августе по данным геопотенциала H_{500} в 1977–2017 гг. (табл. 3).

На станции Курильск для холодных лет в июле наибольший коэффициент распознавания $n = 0,78$ отмечается в марте в южном районе. Для холодных лет на станции Южно-Курильск количество значимых коэффициентов распознавания обнаружено для всех районов, практически для всех месяцев. На станции Малокурильское для 5 холодных лет коэффициент распознавания достаточно высокий для всех районов. Уже зимой он достигает 1 (100 %-ное распознавание). Для холодных лет в августе на станции Курильск наибольший коэффициент выявлен в умеренном районе. На станции Южно-Курильск наибольшим распознаванием отличается южный район, а в августе 100 %-ное распознавание ($n = 1$) для всех районов у июня. Для холодных лет в августе на ГМС Малокурильское наибольшее распознавание в северном районе в феврале и июне.

В табл. 4 и 5 представлены результаты распознавания n для станций в экстремальные годы, когда аномалии температуры воды изменяются в пределах $\Delta T_w < -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\Delta T_w > 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3

Коэффициенты интервального распознавания низкой температуры воды $\Delta T_w < -1,5^\circ\text{C}$ на ГМС южных Курильских островов в июле-августе по данным геопотенциала H_{500} в 1977–2017 гг.

Table 3

Rates of recognition for cases of low SST ($\Delta T_w < -1,5^\circ\text{C}$) at meteostations on southern Kuril Islands in July-August, 1977–2017, by preceeding fields of AT 500 hPa

Месяц	Курильск			Южно-Курильск			Малокурильское		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Июль</i>									
Январь	0,39	0,54	0,54	0,23	1,00	0,75	0,56	0,83	0,83
Февраль	0,37	0,44	0,54	0,25	0,60	0,75	0,45	1,00	1,00
Март	0,78	0,70	0,23	1,00	1,00	0,33	1,00	0,83	0,56
Апрель	0,50	0,58	0,50	1,00	1,00	1,00	0,63	0,71	1,00
Май	0,64	0,47	0,30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,63
Июнь	0,58	0,58	0,58	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,83
<i>Август</i>									
Январь	0,47	0,47	0,42	0,45	0,45	0,56	0,41	0,43	0,69
Февраль	0,53	0,73	0,73	0,71	0,63	0,71	0,50	0,60	0,75
Март	0,57	0,73	0,67	0,63	0,71	0,45	0,50	0,60	0,36
Апрель	0,57	0,44	0,35	0,63	0,63	0,56	0,64	0,60	0,56
Май	0,42	0,50	0,36	1,00	0,71	0,56	0,69	0,64	0,69
Июнь	0,67	1,00	0,73	1,00	1,00	1,00	0,53	0,82	0,82
Июль	0,80	0,50	0,73	0,83	0,38	0,50	0,82	0,60	0,50

Примечание. Жирным шрифтом выделены месяцы с коэффициентом распознавания больше 0,75. Цифрами указаны районы: 1 — южный, 2 — умеренный, 3 — северный. Холодные годы указаны в табл. 1.

Таблица 4

Коэффициенты интервального распознавания anomalно низкой температуры воды $\Delta T_w < -2^\circ\text{C}$ на ГМС в июле-августе по данным геопотенциала H_{500} в 1977–2017 гг.

Table 4

Rates of recognition for cases of extreme low SST ($\Delta T_w < -2^\circ\text{C}$) at meteostations on southern Kuril Islands in July-August, 1977–2017, by preceeding fields of AT 500 hPa

Месяц	Курильск			Малокурильское		
	1	2	3	1	2	3
<i>Июль</i>						
Январь	0,50	0,75	0,75	0,56	0,83	0,83
Февраль	1,00	1,00	1,00	0,45	1,00	1,00
Март	1,00	1,00	0,50	1,00	0,83	0,56
Апрель	1,00	1,00	1,00	0,63	0,71	1,00
Май	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,63
Июнь	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,83
<i>Август</i>						
Январь	0,57	0,80	0,50	0,50	1,00	0,50
Февраль	0,57	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00
Март	1,00	0,67	0,80	0,75	0,60	0,75
Апрель	0,57	0,80	0,80	0,60	0,75	0,60
Май	1,00	1,00	0,80	1,00	1,00	1,00
Июнь	0,80	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00
Июль	1,00	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00

Примечание. Жирным шрифтом выделены месяцы с коэффициентом распознавания больше 0,75. Цифрами указаны районы: 1 — южный, 2 — умеренный, 3 — северный. Экстремально холодные годы указаны в табл. 2.

Таблица 5

Коэффициенты интервального распознавания аномально низкой температуры воды $\Delta T_w < -2^\circ\text{C}$ в области течения Соя, южнокурильском районе и к юго-востоку от о. Хоккайдо в июле-августе по данным геопотенциала H_{500} в 1985–2019 гг.

Table 5

Rates of recognition for cases of extreme low SST ($\Delta T_w < -2^\circ\text{C}$) in the area of Soya Current, in the South-Kuril area, and in the area southeastward from Hokkaido in July-August, 1985–2019, by preceding fields of AT 500 hPa

Месяц	Соя			ЮКР			ЮВХ		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	<i>Июль</i>								
Январь	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,44	0,67
Февраль	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,57	0,80
Март	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40
Апрель	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,29	0,80	0,57
Май	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	1,00	0,80
Июнь	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,57	0,44
	<i>Август</i>								
Январь	0,83	0,83	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,80	0,67
Февраль	0,71	1,00	0,80						
Март	0,83	1,00	0,83	1,00	1,00	1,00	0,80	0,57	0,50
Апрель	0,26	0,63	0,50	1,00	0,60	0,75	0,24	1,00	0,50
Май	0,56	0,71	1,00	1,00	1,00	0,60	1,00	0,80	1,00
Июнь	0,83	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,57	0,67
Июль	1,00	0,50	0,63	1,00	0,43	0,60	0,80	0,80	1,00

Примечание. Жирным шрифтом выделены месяцы с коэффициентом распознавания больше 0,75. Цифрами указаны районы: 1 — южный, 2 — умеренный, 3 — северный. Экстремально холодные годы указаны в табл. 2.

Из данных табл. 4 следует, что если аномалии температуры воды изменяются в интервале $\Delta T_w < -2^\circ\text{C}$ и $\Delta T_w > 2^\circ\text{C}$, то увеличивается число значимых коэффициентов распознавания. Они достигают 100 % в июле. Для августа число 100 %-ного распознавания уменьшается, но все же достаточно велико. 100 %-ное распознавание обнаруживается в марте и мае для Курильска, и в феврале, мае и июне — для Малокурильское.

В табл. 5 представлены коэффициенты интервального распознавания аномально низкой температуры воды $\Delta T_w < -2^\circ\text{C}$ в районах Соя, ЮКР, ЮВХ.

Для экстремально холодных лет во всех районах значимые коэффициенты ($n > 0,75$) распознавания по геопотенциалу H_{500} выявляются уже в зимний период. Хорошим распознаванием отличаются уже зимние месяцы январь и февраль, а также апрель, май и июнь.

В табл. 6 и 7 представлены коэффициенты интервального распознавания n аномально высокой температуры воды в годы, когда аномалии температуры воды $\Delta T_w > 2^\circ\text{C}$ на ГМС южных Курильских островов по ряду 1977–2017 гг. и в области течения Соя, в ЮКР и к ЮВХ по ряду 1985–2019 гг. в июле-августе по данным геопотенциала H_{500} в трех районах.

Наибольшие коэффициенты распознавания n от 0,75 до 1,0 для экстремально высокой температуры воды в июле на ГМС Курильск выявляются в умеренном и северном районах с марта по июнь, а для экстремально высокой температуры в августе — только в феврале и июне. На ГМС Южно-Курильск наибольшее распознавание по температуре воды в августе отмечается для всех районов с января по июль. На ГМС Малокурильское наибольшее распознавание по данным температуры воды в июле выявлено для всех районов с января по июль.

Наибольшие коэффициенты распознавания $n > 0,75$ для экстремально высокой температуры воды в июле в области Соя выявлены в южном районе с марта по июнь, а в августе — в умеренном районе с января по июль. В ЮКР наибольшие коэффициенты распознавания в июле наблюдаются в умеренном районе с марта по июнь, а в августе —

Таблица 6

Коэффициенты интервального распознавания anomalно высокой температуры воды $\Delta T_w > 2$ °C на ГМС южных Курильских островов в июле-августе по данным геопотенциала H_{500} в 1977–2017 гг.

Table 6

Rates of recognition for cases of extreme high SST ($\Delta T_w > 2$ °C) at meteorostations on southern Kuril Islands in July-August, 1977–2017, by preceding fields of AT 500 hPa

Месяц	Курильск			Южно-Курильск			Малокурильское		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Июль</i>									
Январь	0,67	0,67	0,36	–	–	–	1,00	0,50	0,75
Февраль	0,80	0,33	0,22	–	–	–	0,75	0,33	0,25
Март	0,67	0,80	1,00	–	–	–	1,00	1,00	1,00
Апрель	0,67	1,00	1,00	–	–	–	1,00	1,00	1,00
Май	1,00	1,00	1,00	–	–	–	1,00	1,00	1,00
Июнь	0,36	0,80	0,22	–	–	–	0,30	1,00	0,60
<i>Август</i>									
Январь	0,63	0,63	0,63	1,00	1,00	1,00	0,45	0,83	0,63
Февраль	1,00	1,00	0,63	1,00	0,60	1,00	0,83	0,45	0,45
Март	0,63	0,63	0,83	0,60	1,00	1,00	0,71	0,63	0,83
Апрель	0,63	0,63	0,63	0,75	1,00	0,60	0,45	0,56	0,45
Май	0,56	0,56	0,42	1,00	0,75	0,75	0,63	0,36	0,38
Июнь	1,00	1,00	0,83	1,00	0,75	1,00	1,00	0,63	1,00
Июль	0,83	0,83	0,28	1,00	1,00	0,60	0,83	0,83	0,42

Примечание. Жирным шрифтом выделены месяцы с коэффициентом распознавания больше 0,75. Цифрами указаны районы: 1 — южный, 2 — умеренный, 3 — северный. Экстремально теплые годы указаны в табл. 2. На ГМС Южно-Курильск в июле не зафиксировано экстремально высокой температуры.

Таблица 7

Коэффициенты интервального распознавания anomalно высокой температуры воды $\Delta T_w > 2$ °C в области течения Соя, южнокурильском районе и к юго-востоку от о. Хоккайдо по данным геопотенциала H_{500} в 1985–2019 гг.

Table 7

Rates of recognition for cases of extreme high SST ($\Delta T_w > 2$ °C) in the area of Soya Current, in the South-Kuril area, and in the area southeastward from Hokkaido in July-August, 1985–2019, by preceding fields of AT 500 hPa

Месяц	Соя			ЮКР			ЮВХ		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Июль</i>									
Январь	0,83	0,83	0,63	0,57	0,50	0,67	0,31	0,50	0,57
Февраль	0,21	0,25	0,42	0,31	0,67	0,80	1,00	1,00	0,67
Март	0,29	0,24	0,83	0,57	0,80	1,00	0,80	0,80	0,80
Апрель	0,83	0,71	0,45	0,16	1,00	0,33	1,00	0,67	0,80
Май	0,83	0,83	0,45	0,50	0,80	0,29	1,00	0,67	0,80
Июнь	0,33	0,71	1,00	1,00	1,00	0,44	0,57	1,00	0,67
<i>Август</i>									
Январь	0,30	1,00	0,75	0,50	1,00	0,57	0,58	0,54	0,58
Февраль	1,00	1,00	0,60	0,50	1,00	0,67	0,58	0,44	0,70
Март	0,75	1,00	1,00	1,00	0,80	1,00	0,70	0,58	0,50
Апрель	0,43	1,00	1,00	0,67	0,80	0,57	0,35	0,88	0,44
Май	0,75	0,75	0,33	0,80	1,00	0,57	0,47	0,50	0,39
Июнь	1,00	0,75	1,00	0,80	1,00	1,00	0,78	0,50	0,64
Июль	1,00	1,00	0,60	0,80	0,80	0,36	0,88	0,64	0,58

Примечание. Жирным шрифтом выделены месяцы с коэффициентом распознавания больше 0,75. Цифрами указаны районы: 1 — южный, 2 — умеренный, 3 — северный. Экстремально теплые годы указаны в табл. 2.

в умеренном районе с января по июль. Для района ЮВХ наибольшее распознавание для экстремально высокой температуры воды в июле выявлено в южном и умеренном районах с февраля по май, а по температуре воды в августе — только в апреле и июне.

Особенности барических полей, предшествующих экстремальному повышению и понижению температуры воды в прибрежных районах южных Курильских островов

По результатам интервального распознавания в те месяцы, когда коэффициенты распознавания достигали 100 %, были построены барические поля для экстремально холодных и теплых по температуре воды лет.

На рис. 2 представлены барические карты в зимний и весенний сезоны в месяцы с наибольшими коэффициентами распознавания в годы с аномалиями $\Delta T_w < -2^\circ\text{C}$.

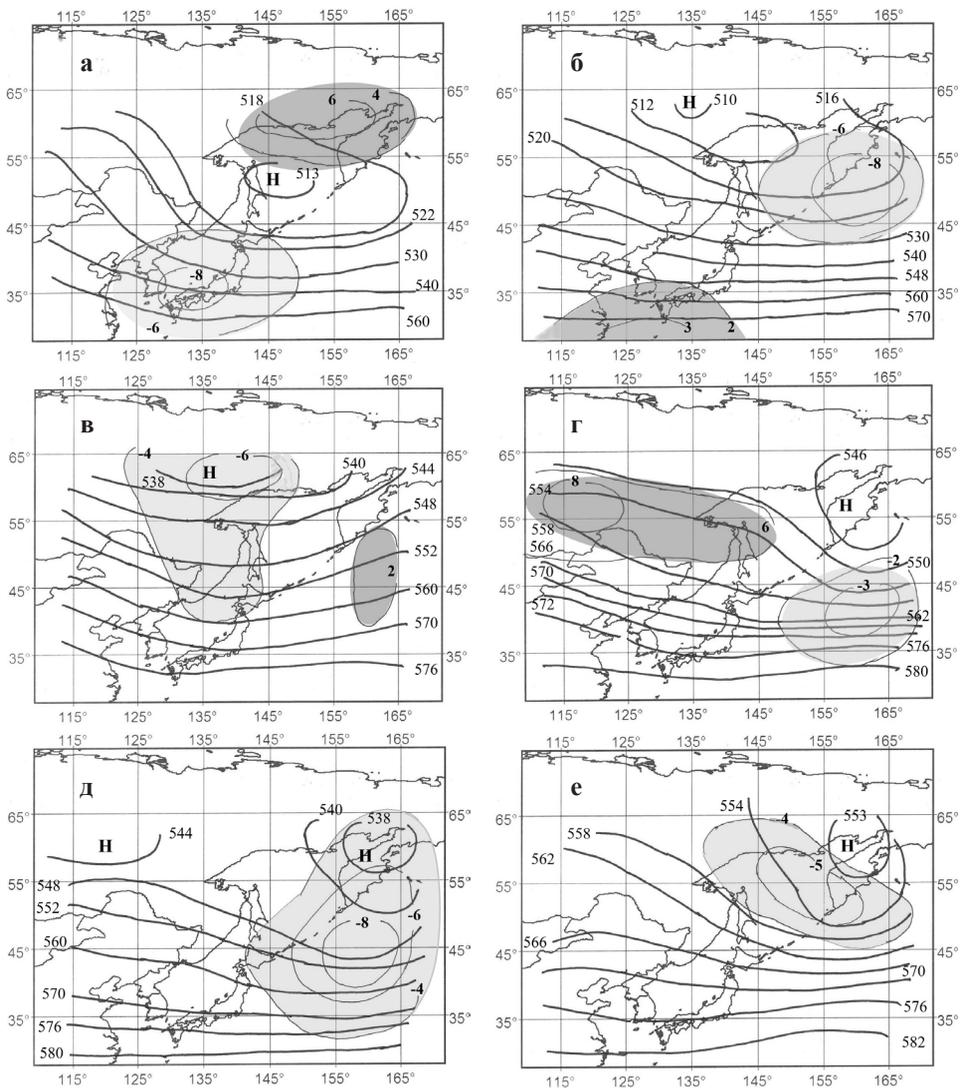


Рис. 2. Барическое поле средней тропосферы H_{500} над Восточной Азией: а — в феврале 1986 г.; б — марте 1980 г.; в — мае 1986 г.; г — мае 2002 г.; д — мае 1993 г.; е — июне 1985 г. Темно-серым цветом обозначены области высоких значений аномалий H_{500} , а светло-серым — низких значений аномалий H_{500}

Fig. 2. Absolute topography of 500 hPa surface over East Asia in February, 1986 (a); in March, 1980 (б); in May, 1986 (в); in May, 2002 (г); in May, 1993 (д); in June, 1985 (е). Dark gray shading — positive anomalies of H_{500} , light gray shading — negative anomalies of H_{500}

Аномально холодные термические режимы в июле в прибрежных водах ЮКР формируются, когда большая часть Охотского моря находится в феврале под влиянием тропосферной ложбины, а тропосферный циклон располагается над западной частью моря, южнее своего многолетнего положения. Над северной частью отмечается повышение геопотенциала H_{500} , а отрицательные значения охватывают центральную и южную части Японского моря (рис. 2, а).

Если в марте тропосферная ложбина охватывает практически все Охотское море и в ее дельте аномалии H_{500} достигают минус 8 дам (рис. 2, б), то в августе в этот же год мы наблюдаем экстремальное похолодание. В южных районах наблюдается рост геопотенциальных высот.

Когда в мае над побережьем Восточной Азии располагалась депрессия и в ее дельте отмечались низкие значения аномалий геопотенциала (рис. 2, в), в июле в этот же год было аномальное похолодание.

Если в мае над восточной частью Охотского моря располагается тропосферная депрессия, в ее дельте отмечается очаг пониженных значений аномалий H_{500} (рис. 2, г, д), то в августе в эти годы формируются холодные термические режимы. Над континентальными районами Восточной Азии в августе прослеживается интенсивный теплый гребень, аномалии H_{500} достигают 6–8 дам (рис. 2, г).

В июне в восточной части Охотского моря наблюдается тропосферная ложбина, усиливается холодный вынос полярных масс воздуха в тыловой части депрессии, аномалии геопотенциальных высот над Охотским морем достигают минус 4–5 дам (рис. 2, е), и возникают аномально холодные термические режимы в прибрежных водах ЮКР.

Отметим, что механизмы формирования экстремально холодных условий в июле и августе в южнокурильском районе Тихого океана нами уже рассматривались [Шатилина и др., 2019]. Отмечено, что экстремально холодные условия в районе южных Курильских островов формируются при наличии тропосферной депрессии над Охотским морем, а в приземном поле при наличии активного охотского антициклона.

На рис. 3 представлены средние поля геопотенциала H_{500} , предшествующие аномальному потеплению $\Delta T_w > 2$ °С прибрежных вод южных Курильских островов, в области течения Соя, южнокурильского района и к юго-востоку от о. Хоккайдо.

Когда в феврале охотский тропосферный циклон располагается над северо-западной частью Охотского моря, вблизи этого центра наблюдается очаг экстремально низких значений геопотенциальных высот H_{500} . В этом случае северо-западная часть Тихого океана и Курильские острова находятся под воздействием тропосферного гребня (здесь располагается область с экстремально высокими значениями аномалий H_{500} , достигающими 6 дам) (рис. 3, а). Эти процессы формируют экстремально теплые режимы в июле и августе в ЮКР.

Если в марте над Охотским морем ослаблено влияние холодной тропосферной ложбины, а северо-западная часть Тихого океана и Курильские острова находятся в области теплого гребня (повышенных значений аномалий H_{500}) (рис. 3, б), то в июле и августе формируются экстремально теплые режимы.

Когда в мае ослаблялось влияние тропосферной ложбины и районы южных Курильских островов находились под влиянием тропосферного гребня, где аномалии H_{500} достигали 4 дам (рис. 3, в), в июле наблюдалась аномально высокая температура воды.

Когда в июне вся северо-западная часть Тихого океана и прилегающая часть южных Курильских островов находились под влиянием тропосферного гребня, аномалии H_{500} достигали 6 дам (рис. 3, г–е), в августе формировался экстремально теплый режим.

Хотелось бы напомнить, что над областями высоких значений аномалий H_{500} у земли располагаются теплые воздушные массы, а над очагами низких — холодные воздушные массы [Шатилина и др., 2019]. Поэтому так важно на картах геопотенциальных высот H_{500} выделять очаги экстремально высоких и низких значений аномалий H_{500} .

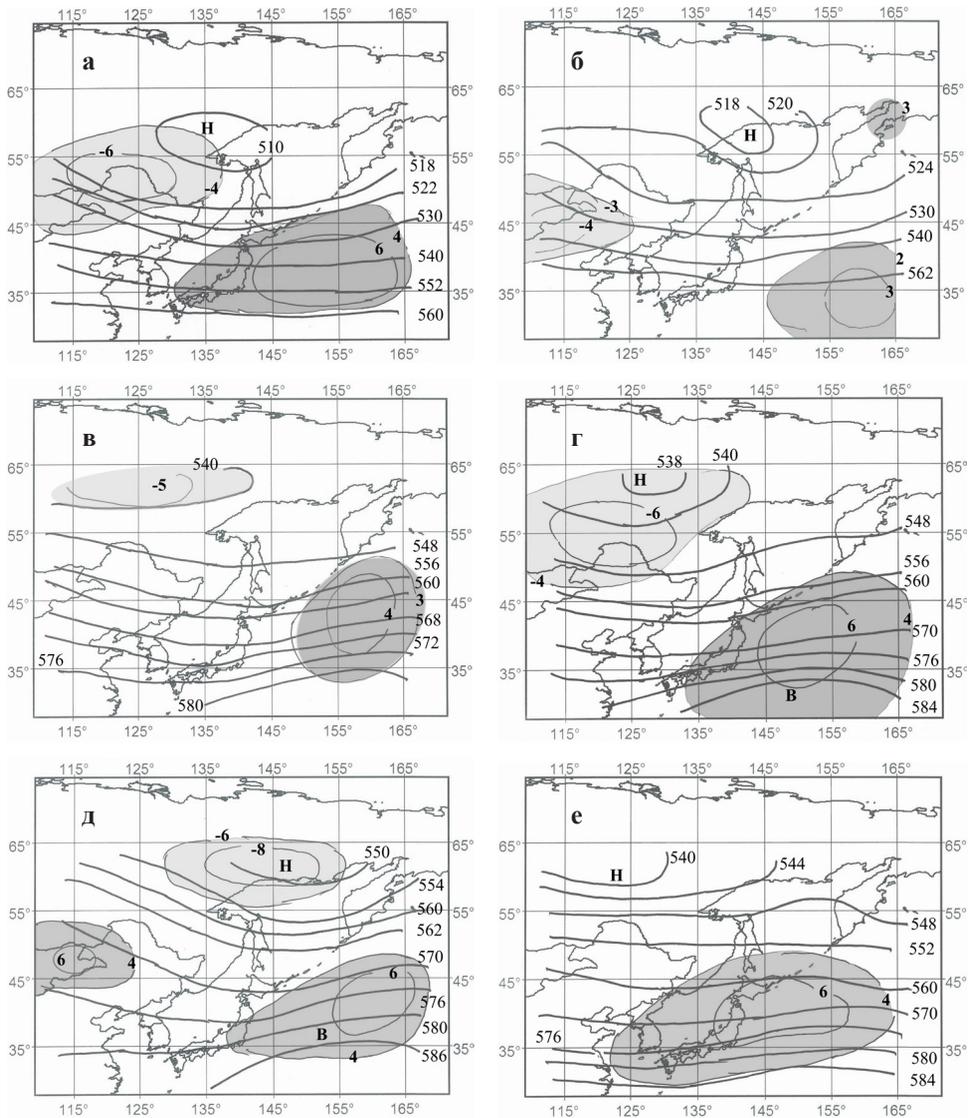


Рис. 3. Среднее поле H_{500} — барическое поле средней тропосферы над Восточной Азией: а — в феврале 2010 г.; б — марте 2004 г.; в — мае 1978 г.; г — мае 2004 г.; д — июне 2004 г.; е — мае 2016 г. Темно-серым цветом обозначены области высоких значений аномалий H_{500} , а светло-серым — низких значений аномалий H_{500} .

Fig. 3. Mean month field of H_{500} over East Asia in February, 2010 (а); in March, 2004 (б); in May, 1978 (в); in May, 2004 (г); in June, 2004 (д); in May, 2016 (е). Dark gray shading — positive anomalies of H_{500} , light gray shading — negative anomalies of H_{500} .

Кроме того, над этими областями повышается или понижается не только температура воздуха, но и температура воды.

На рис. 4 представлены примеры формирования экстремальных термических режимов в августе 1993 г., который был аномально холодным, и в августе 2016 г., который был экстремально теплым.

В августе 1993 г. над восточной частью Охотского моря располагалась тропосферная депрессия, ложбина от этой депрессии оказывала влияние на Японское море и на районы Японских островов, над которыми аномалии H_{500} изменялись от минус 3 до минус 5 дам, второй очаг с пониженными значениями аномалий H_{500} отмечался над Охотским морем (рис. 4, а). Температура воды в области первой ветви Курошио,

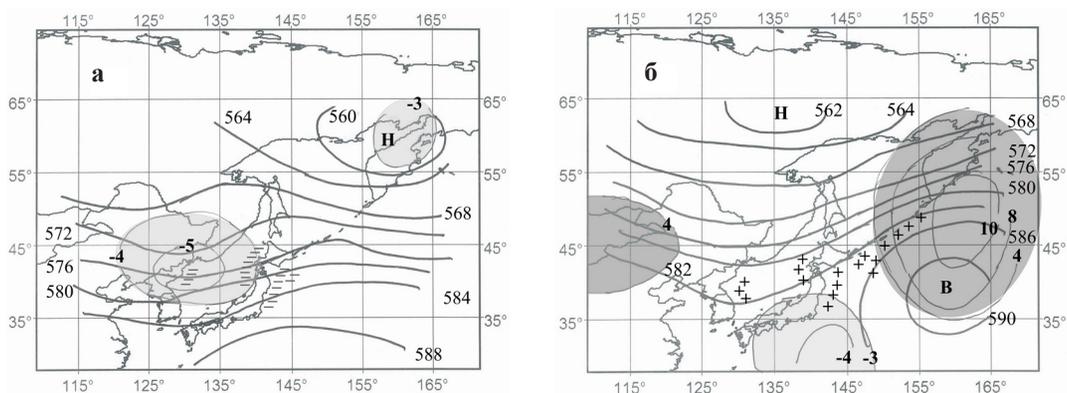


Рис. 4. Среднее поле AT_{500} в августе и положение экстремально высоких значений H_{500} у восточного побережья Азии: **а** — 1993 г.; **б** — 2016 г. Темно-серым цветом обозначены области высоких значений аномалий H_{500} , а светло-серым — низких значений аномалий H_{500} ; плюсом — аномально высокие значения температуры воды, минусом — аномально низкие.

Fig. 4. Mean month field of H_{500} over East Asia in August of 1993 (**a**) and 2016 (**b**). Dark gray shading — positive anomalies of H_{500} , light gray shading — negative anomalies of H_{500} ; «+» — cases of extreme high SST; «-» — cases of extreme low SST

к юго-востоку о. Хоккайдо, была экстремально низкой. В августе 2016 г. ЮКР находился под влиянием теплых тропосферных гребней от теплого субтропического антициклона (рис. 4, б). В приземном поле наблюдалось вторжение на Курильские острова гавайского антициклона. Температура воды была экстремально высокой (рис. 4, б). Следует также отметить, что по данным Гидрометцентра России [Бережная и др., 2016] на станции Усть-Камчатск в августе 2016 г. аномалия температуры воздуха составила $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что было зафиксировано впервые, на станции Петропавловск-Камчатский — $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 63 года.

Выводы

Использование метода интервального распознавания позволило выделить предшествующие барические поля H_{500} , определяющие экстремальность термического режима в прибрежных водах ЮКР в июле-августе.

В ходе вычислений показано, что уменьшение числа критических объектов (аномалий температуры воды) за счет увеличения предельного значения аномалий (с $\Delta T_w > 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\Delta T_w > 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) при использовании метода существенно увеличивает значения коэффициентов распознавания по геопотенциалу H_{500} в предшествующие месяцы.

Показано, что структура барических полей, предшествующих экстремально холодным и экстремально теплым режимам, существенно различается. Экстремально холодные годы характеризуются наличием глубокой тропосферной ложбины над Охотским морем в зимний и весенний сезоны. Теплым сезонам предшествуют процессы с повышенной зональностью, зимняя тропосферная ложбина у восточного побережья Азии развита слабо, а высотная фронтальная зона располагается выше климатического положения, о чем свидетельствуют устойчивые положительные аномалии в умеренных широтах 2-го естественного синоптического района.

Результаты работы дают возможность использовать метод интервального распознавания для разработки прогноза экстремальности термического режима в южно-курильском районе по предшествующим барическим полям с заблаговременностью 2–5 мес. Данный прогноз будет не в виде уравнений регрессии, а в виде региональной модели взаимодействия атмосферы и океана, т.е. подбираются аналоги барических структур, предшествующих экстремальным режимам.

Благодарности

Благодарим рецензентов за конструктивные замечания, которые способствовали улучшению содержательной части статьи.

Финансирование работы

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Соблюдение этических стандартов

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Информация о вкладе авторов

Идея работы и постановка задачи — Т.А. Шатилина, Г.Ш. Цициашвили. Содержательная часть статьи — Т.А. Шатилина, математические методы — Г.Ш. Цициашвили, программы по опубликованным алгоритмам — Т.В. Радченкова.

Список литературы

Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в августе 2016 г. // Метеорол. и гидрол. — 2016. — № 11. — С. 109–118.

Завьялова Е.В., Морозова С.В., Полянская Е.А. Синоптико-статистический метод долгосрочного прогноза аномально жарких температурных условий в нижнем Поволжье // Тр. 3-й Всерос. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». — СПб. : Химиздат, 2019. — С. 358–362.

Мультиановский Б.П. Современное состояние разработки метода долгосрочных предсказаний погоды в СССР // Метеорол. вестн. — 1933. — № 5. — С. 129–143.

Налимов В.В. Теория эксперимента : моногр. — М. : Наука, 1971. — 208 с.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных районов Охотского моря за последние десятилетия // Изв. ТИНРО. — 2017. — Т. 191. — С. 176–195. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-191-176-195.

Цициашвили Г.Ш., Шатилина Т.А., Радченкова Т.В. Особенности изменчивости поверхностной температуры воды в районах, расположенных в области основных течений Японского моря и северо-западной части Тихого океана в 2000–2012 гг., и ее влияние на промысел сайры // Вопр. промысл. океанологии. — 2012. — Вып. 9, № 2. — С. 96–116.

Шатилина Т.А. Анализ ошибок прогнозирования температуры воды в Южно-Курильском районе // Тез. докл. 6-й Всерос. конф. по проблемам промыслового прогнозирования. — Мурманск : ПИНРО, 1995. — С. 166.

Шатилина Т.А., Егорова Т.С., Красиков В.А., Сафин В.И. Линейные прогностические модели температуры воды по метеорологическим предикторам в Южно-Курильском промысловом районе // Технологии и средства моделирования сложных систем. — Владивосток, 1992. — С. 130–141.

Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Комплексная оценка изменчивости температуры воды на поверхности в северо-западной части Тихого океана в июле-сентябре 1950–2014 гг. // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 184. — С. 120–134.

Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Опыт использования метода интервального распознавания для прогноза экстремальной ледовитости Татарского пролива (Японское море) // Метеорол. и гидрол. — 2006. — № 10. — С. 65–73.

Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Особенности изменчивости летних центров действия атмосферы над Дальним Востоком и климатические экстремумы в период 1980–2017 гг. // Уч. зап. РГГМУ. — 2019. — № 56. — С. 61–80. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-56-61-80.

Efficient Algorithms of Time Series Processing and their Applications / ed. G.Sh. Tsitsiashvili. — N.Y. : Nova Science Publishers, Inc., 2009. — 97 p.

References

Berezhnaya, T.V., Golubev, A.D., and Parshina, L.N., Anomalous hydrometeorological phenomena on the territory of the Russian Federation in August 2016, *Tr. Gidrometeorol. Nauchno-Issled. Tsentra Ross. Fed.*, 2016, no. 11, pp. 109–118.

Zavyalova, E.V., Morozova, S.V., and Polyanskaya, E.A., Synoptic-statistical method of long-term forecast of anomalously hot temperature conditions in the lower Volga Region, in *Tr. 3-y Vseros. konf. «Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya»* (Proc. 3rd All-Russ. Conf. “Hydrometeorology and ecology: scientific and educational achievements and perspectives”), St. Petersburg: Khimizdat, 2019., pp. 358–362.

Multanovsky, B.P., The current state of the development of a method for long-term weather predictions in the USSR, *Meteorol. vestn.*, 1933, no. 5, pp. 129–143.

Nalimov, V.V., *Teoriya eksperimenta* (Experiment theory), Moscow: Nauka, 1971.

Rostov, I.D., Dmitrieva, E.V., and Vorontsov, A.A., Tendencies of climatic changes for thermal conditions in the coastal areas of the Okhotsk Sea in last decades, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2017, vol. 191, pp. 176–195. doi 10.26428/1606-9919-2017-191-176-195

Tsitsiashvili, G.Sh., Shatilina, T.A., and Radchenkova, T.V., Surface water temperature variability in the Japan Sea and the North-West Pacific in 2000–2012 and the impact on saury fishing, *Vopr. Promysl. Okeanologii*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 96–116.

Shatilina, T.A., Analysis of errors in predicting water temperature in the South Kuril region, in *Tezisy dokl. 6 Vseross. konf. probl. rybopromyslovogo prognozirovaniya* (Proc. 6th All-Russ. Conf. Probl. Prediction), Murmansk: PINRO, 1995, p. 166.

Shatilina, T.A., Egorova, T.S., Krasikov, V.A., and Safin, V.I., Linear predictive models of water temperature by meteorological predictors in the South Kuril fishing area, *Tekhnologii i sredstva modelirovaniya slozhnykh sistem* (Technologies and tools for modeling complex systems), Vladivostok, 1992, pp. 130–141.

Shatilina, T.A., Tsitsiashvili, G.Sh., and Radchenkova, T.V., Complex assessment of variability for the sea surface temperature in the North-West Pacific in July–September 1950–2014, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 184, pp. 120–134.

Shatilina, T.A., Tsitsiashvili, G.Sh., and Radchenkova, T.V., Experience of using the method of interval recognition for predicting extreme ice coverage of the Tatar Strait (Sea of Japan), *Tr. Gidrometeorol. Nauchno-Issled. Tsentra Ross. Fed.*, 2006, no. 10, pp. 65–73.

Shatilina, T.A., Tsitsiashvili, G.Sh., and Radchenkova, T.V., Features of the summer atmospheric force centers variability over the Far East and climatic extremes in the period 1980–2017, *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2019, no. 56, pp. 61–80. doi 10.33933/2074-2762-2019-56-61-80

Efficient Algorithms of Time Series Processing and their Applications, Tsitsiashvili, G.Sh., ed., New York: Nova Science Publishers, Inc., 2009.

JMA: Japan Meteorological Agency. <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/rtrdb/jma-pro.html>. Cited September 20, 2019.

Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut gidrometeorologicheskoy informatsii — Mirovoy tsentr dannykh (All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information — World Data Center). [htt://meteo.ru](http://meteo.ru). Cited September 20, 2019.

Поступила в редакцию 9.07.2020 г.

После доработки 25.03.2021 г.

Принята к публикации 21.05.2021 г.