

УДК 551.467.312(265.546):551.513

И.Л. Цыпышева¹, Л.С. Муктепавел¹, Г.Ш. Цицашвили²,
Т.А. Шатилина¹, Т.В. Радченкова^{2*}

¹ Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4;

² Институт прикладной математики ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛЕДОВИТОСТИ В ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ (ЯПОНСКОЕ МОРЕ) В СВЯЗИ С РЕГИОНАЛЬНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Анализируется изменчивость ледовитости Татарского пролива (Японское море) за период 1951–2014 гг. Определены доминирующие циклы во временном ряду ледовитости и значимость изменений ледовитости для всего ряда и по 32-летним периодам (1951–1982 и 1983–2014 гг.). Установлено, что доминирующие циклы для выделенных периодов различаются: в первом периоде доминирующим с января по март был 5-летний цикл, во втором периоде преобладал 2-летний цикл наряду с долгопериодными (7–10 лет). Показано, что формирование минимальной ледовитости в Татарском проливе может осуществляться при 2 сценариях развития региональной атмосферной циркуляции над центральным районом 2-го естественного синоптического района Северного полушария: при южном положении охотского тропосферного циклона и положении азиатского гребня над Японским морем и прилегающими районами суши. Рассмотрены особенности пространственного распределения поля льда, динамика и термический режим вод в южной части Татарского пролива в марте 2014–2015 гг. по спутниковым данным.

Ключевые слова: ледовитость, механизмы формирования ледовитости, доминирующие циклы, спутниковые данные, региональная атмосферная циркуляция, Татарский пролив.

Tsypysheva I.L., Muktepavel L.S., Tsitsiashvili G.Sh., Shatilina T.A., Radchenkova T.V. Features of the sea ice cover variability in the Tatar Strait (Japan Sea) in connection with the regional atmosphere circulation // *Izv. TINRO*. — 2016. — Vol. 185. — P. 135–149.

Variations of the sea ice cover in the Tatar Strait (Japan Sea) in 1951–2014 are analyzed in connection with changes of surface atmospheric pressure, geopotential height H_{500} , and air temperature over eastern Asia and the North-West Pacific. Besides, water circulation and spatial distribution of the sea ice and water temperature in the southern Tatar Strait are de-

* Цыпышева Ирина Леонидовна, ведущий инженер, e-mail: tsypysheva@tinro.ru; Муктепавел Лариса Станиславовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, e-mail: Larisamk@tinro.ru; Цицашвили Гурам Шалвович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, e-mail: guram@iam.dvo.ru; Шатилина Татьяна Александровна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, e-mail: shatilina@tinro.ru; Радченкова Татьяна Вадимовна, инженер, e-mail: tarad@yandex.ru.

Tsypysheva Irina L., leading engineer, e-mail: tsypysheva@tinro.ru; Muktepavel Larisa S., Ph.D., senior researcher, e-mail: Larisamk@tinro.ru; Tsitsiashvili G.Sh., D.Sc., head of laboratory, e-mail: guram@iam.dvo.ru; Shatilina Tatyana A., Ph.D., senior researcher, e-mail: shatilina@tinro.ru; Radchenkova Tatyana V., engineer, e-mail: tarad@yandex.ru.

scribed in detail for March of 2014 and 2015 using satellite data (MODIS/Terra, MODIS/Aqua, MTSAT1). Dominant periodicities are revealed for the whole time series of ice cover and its parts (1951–1982 and 1983–2014): the 5-year cycle dominated in January–March for the former period, and the 2-year cycle — for the latter period, whereas long-term cycles (7–10 years) were weaker. Significant trend is found for the 1950–1982 but it is not significant for the 1983–2014. The ice cover variation correlated with changes of the Siberian High strength in the 1951–1982 but mostly with atmosphere processes over south Asia and the Okhotsk Sea in the 1983–2014, that's why the 2-year cycle was stronger in the latter case. Mechanism of «cold» winters formation is considered in detail for a case of 2001, and the mechanism of «warm» winters formation — for the 1991, 2008, 2014, and 2015. Two scenarios are available for the latter case of low ice cover: i) abnormally southern position of the trough on H_{500} surface over the Okhotsk Sea; and ii) the ridge on H_{500} surface over the Japan Sea and adjacent continental areas. The ice cover fluctuations in 2015 are forecasted and this forecast comes true for February and March. Features of spatial distribution of the ice, water dynamics and thermal regime are considered in detail for the southern Tatar Strait in March 2014 and 2015 using satellite data.

Key words: ice cover, ice cover formation, cyclicity, satellite data, atmosphere circulation, Tatar Strait.

Введение

Одна из важнейших проблем промысловой океанографии в настоящее время — изучение изменений режима вод, регулирующих условия размножения и обитания морских гидробионтов. Знания об изменчивости прежде всего термического режима в конце зимы — начале весны важны для понимания биологических процессов в экосистеме прибрежных вод (сроки нереста рыб, начало роста водорослей и трав, в том числе и промысловых, и др.). Температура и соленость воды в прибрежных районах северо-западной части Японского моря, основное влияние на которые оказывает Приморское течение, зависят в конце зимы — начале весны от ледовых условий в Татарском проливе (Park et al., 2006). Основными факторами, определяющими гидрологический режим Японского моря, являются взаимодействие его поверхностных вод с атмосферой на фоне изменяющихся климатических условий и водообмен через проливы со смежными водными бассейнами. Большая межгодовая изменчивость ледовых условий в Татарском проливе значительно осложняет их прогноз как в краткосрочном, так и в долгосрочном аспекте. Это, в свою очередь, сказывается на точности прогноза распределения и подходов промысловых объектов.

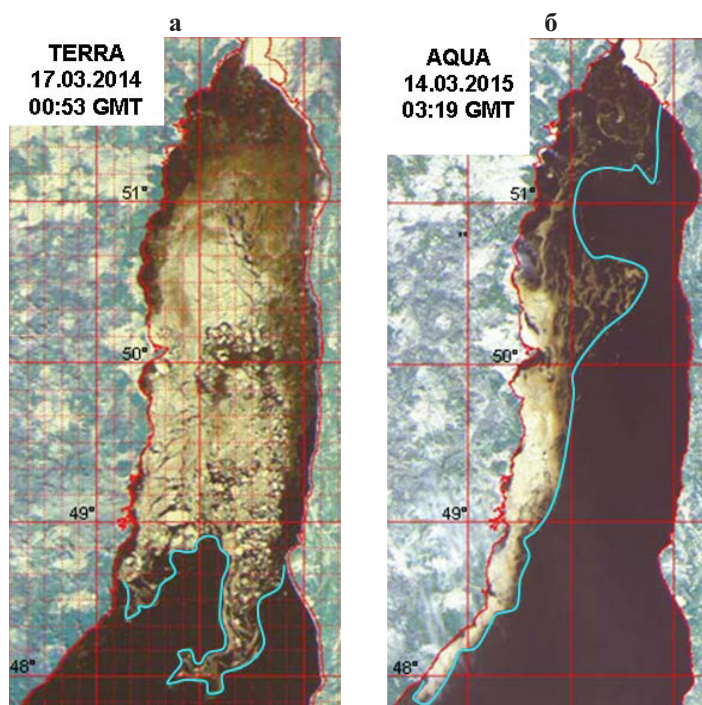
Особенностям гидрометеорологических условий в Татарском проливе посвящено большое количество публикаций (Алдошина, 1960; Столярова, 1974, 1977; Климов, 1987; Погодин, Шатилина, 1998; Ustinova, Sorokin, 2012; Лобанов и др., 2014; и др.). Также делались попытки прогноза ледового покрова и температурного режима (Глаголева и др., 1957; Шапкина, 1959; Уранов, 1971; Плотников, 1996, 2002; Пищальник и др., 2011). Исследуя сезонную и межгодовую изменчивость ледовитости Татарского пролива с 1950 по 1973 г., Г.А. Столярова (1974) показала наличие тесной связи ледяного покрова Татарского пролива с термическими и динамическими особенностями атмосферной циркуляции. Была выделена периодичность зим через 5–6 лет с очень малым распространением ледяного покрова (1956/57, 1962/63, 1967/68 и 1972/73 гг.). Периодичность зим предельно большой ледовитости (1950/51, 1959/60 и 1970/71 гг.) составляла 9–11 лет.

В настоящее время стало доступно следить за площадью распространения и структурой льда по спутниковым цветосинтезированным изображениям. Мониторинг ледовых условий в Татарском проливе позволил выявить аномалии в межгодовом ходе ледовитости. Так, на рис. 1 представлена ледовая обстановка малоледовитых сезонов 2014, 2015 гг. В зимний период 2015 г. сложились аномально теплые ледовые условия в северной части Японского моря, которые значительно отличались от условий предыдущего года.

Несмотря на большой объем публикаций, еще не ясны механизмы формирования ледовых условий в этом районе, особенно это касается экстремальных ледовых условий. Основной задачей работы является выявление механизмов формирования ледо-

Рис. 1. Поле льда в Татарском проливе на цветосинтезированных изображениях, построенных по спутниковым данным MODIS/Terra 17.03.2014 г. (а) и MODIS/Aqua 14.03.2015 г. (б)

Fig. 1. Ice cover in the Tatar Strait on RGB-synthesized images constructed using satellite data of MODIS/Terra received on March 17, 2014 (a) and of MODIS/Aqua received on March 14, 2015 (б)



вых условий в Татарском проливе с позиции региональных изменений атмосферной циркуляции и возможности прогноза развития ледовых процессов.

Материалы и методы

Сведения о ледовитости, рассчитанные в процентах от площади Татарского пролива ($51^{\circ}45' - 45^{\circ}50'$ с.ш.) за период 1951–2014 гг. взяты из базы данных о ледяном покрове дальневосточных морей, поддерживаемой в ТИНРО-центре (Хен и др., 2011). При характеристике атмосферных процессов использованы архивы реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables) атмосферного давления, геопотенциала H_{500} и температуры воздуха в узлах регулярной сетки $2,5 \times 2,5^{\circ}$ за период 1948–2014 гг. (URL: <http://www.esrl.noaa.gov/>). Нормированные значения атмосферного давления и геопотенциала H_{500} определялись над районами сибирского антициклона ($40 - 60^{\circ}$ с.ш. $90 - 140^{\circ}$ в.д.), азиатской депрессии ($13 - 35^{\circ}$ с.ш. $60 - 100^{\circ}$ в.д.) и гавайского антициклона ($30 - 45^{\circ}$ с.ш. $185 - 235^{\circ}$ в.д.). Для ежедневного анализа барических полей над Азией и Тихим океаном использовались карты приземного давления и геопотенциала H_{500} , составляемые Японским метеорологическим агентством (JMA), за 2001–2015 гг. и карты геопотенциальных высот поверхностей H_{500} и H_{925} за 2014 и 2015 гг., восстановленные по спутниковым данным в Дальневосточном центре «НИЦ «Планета»».

Для изучения особенностей динамики вод в данной работе использовались композиционные карты температуры поверхности моря по данным геостационарного спутника MTSAT1 (Центр спутникового мониторинга ИАПУ ДВО РАН). Ледяной покров Татарского пролива рассматривался по цветосинтезированным снимкам, построенным по данным с искусственных спутников Земли Aqua, Terra (спектрорадиометр MODIS) в Дальневосточном центре «НИЦ «Планета»». Для анализа температуры воды в прибрежной зоне северного Приморья использовалась температура поверхности моря, восстановленная по данным сканера MODIS в Центре спутникового мониторинга ИАПУ ДВО РАН.

В изучении многолетней изменчивости ледовитости Татарского пролива большое место занимает вопрос о периодичности. Для расчета значимости различных периодов во временном ряду ледовитости использовался метод Фурье в предположении, что имеется линейный тренд на фоне достаточно больших флюктуаций. Информативной

характеристикой для выделения циклов служили коэффициенты Фурье, которые были рассчитаны нестандартно, по программе, разработанной в Институте прикладной математики ДВО РАН (Цициашвили и др., 2011). Алгоритм вычисления коэффициентов Фурье построен так, чтобы на них не влияли ошибки определения тренда. Такой подход к вычислению коэффициентов был опробован ранее (Шатилина и др., 2014) и дал хорошие результаты.

Результаты и их обсуждение

Межгодовая изменчивость ледовитости в Татарском проливе за представленный период наблюдений делится на относительно малоледовитые и ледовитые периоды, в ней наблюдается определенная цикличность (рис. 2).

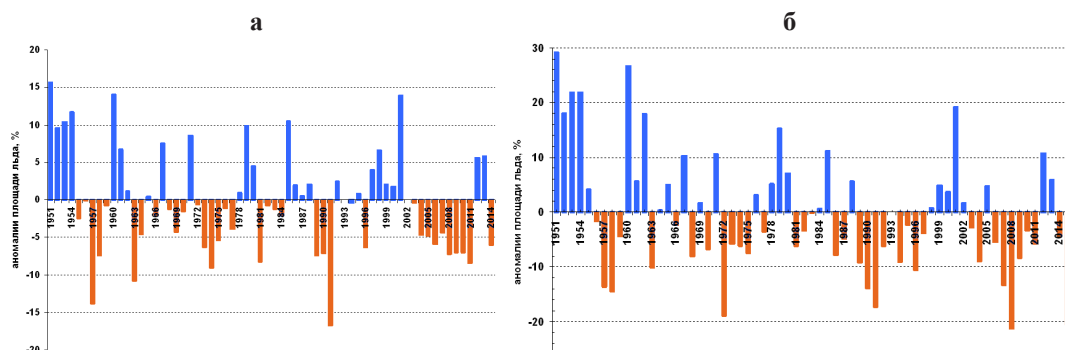


Рис. 2. Изменение аномалий ледовитости в Татарском проливе: **а** — средней за зимний сезон, **б** — в марте за период 1951–2014 гг.

Fig. 2. Year-to-year changes of the ice cover anomaly in the Tatar Strait: **а** — winter mean, **б** — March

График, представленный на рис. 2 (а), демонстрирует, что с 1951 г. экстремально ледовитые сезоны (более чем на 10 % от нормы) приходились на 1951, 1953, 1954, 1960, 1985 и 2001 гг. Экстремально малоледовитые сезоны (более чем на 10 % ниже нормы) были в 1957, 1963 и 1991 гг. Отрицательные аномалии параметра сохранялись с 1988 до 1996 г. В рассматриваемый период в Татарском проливе отмечалось уменьшение площади ледяного покрова в период формирования тяжелых льдов в марте (рис. 2, б), причем в 1991 г. зафиксирован минимум площади ледяного покрова, почти на 20 % меньше среднемноголетнего значения. Далее в зимние месяцы в течение 5 сезонов с 1997 по 2001 г. сохранялись относительно устойчиво ледовитые зимы. Интересной особенностью режима ледовитости Татарского пролива является продолжительный период преобладания отрицательных аномалий с 2004 по 2011 г. (8 лет).

Заметим, что характер ледовых условий в зимние месяцы в Татарском проливе и в северо-западной части Охотского моря тесно связан, что подтверждается оценками сопряженности ледовых процессов на рассматриваемых акваториях (Плотников, 2002), так как на термические условия в этих районах влияет интенсивность охотского тропосферного циклона (Муктепавел, Шатилина, 2012). Однако совпадение тенденций снижения ледовитости на акваториях Татарского пролива и северо-западной части Охотского моря несколько нарушают холодные условия зим двух сезонов — 2012 и 2013 гг. В эти годы охотский тропосферный циклон занимал северо-западное положение, что обусловило крайне суровые ледовые условия в северо-западной части Охотского моря и в Татарском проливе. Период с 2004 по 2011 г. (с минимумом ледовитости в 2011 г.) совпадает с 8-летним циклом в Охотском море.

При анализе временного ряда ледовитости в Татарском проливе статистические оценки были сделаны для всего ряда и при разделении на два 32-летних периода. Первый период (1951–1982 гг.) характеризуется повышенными значениями ледовитости, а второй (1983–2014 гг.) — пониженными, он также совпадает с началом потепления в Северном полушарии и высокой интенсивностью Эль-Ниньо в 1982–1983 гг. Резуль-

таты количественной оценки значимости периодов различной продолжительности во временном ряду ледовитости Татарского пролива с помощью коэффициентов Фурье представлены в табл. 1, 2. Для каждого месяца холодного сезона выраженность периодов меняется. Так, в декабре наиболее выражен 2-летний цикл, в январе — 7-летний цикл (цикл, связанный с Эль-Ниньо). В феврале наиболее выражены 2- и 10-летние циклы. В марте доминирующими циклами были 2-, 5-, 7- и 10-летний. Видимо, в этом месяце сказывается влияние циклов, присущих сибирскому антициклону и Эль-Ниньо (Плотников, 2002). В апреле выраженность всех циклов значительно уменьшается (табл. 1). В первом периоде доминирующим был 5-летний цикл с января по март, во втором периоде преобладал 2-летний цикл (табл. 2).

Таблица 1
Модули коэффициентов Фурье для временного ряда ледовитости в Татарском проливе с 1951 по 2014 г.

Table 1
Absolute values of Fourier coefficients for the ice cover time series for the 1951–2014

Месяц	Период					
	2-летний	3-летний	5-летний	6-летний	7-летний	10-летний
Декабрь	2,044	1,660	0,327	0,844	0,637	0,522
Январь	1,555	0,228	0,653	0,358	1,838	0,268
Февраль	2,660	1,559	1,578	0,615	1,788	1,817
Март	2,301	0,883	2,498	1,003	1,933	2,139
Апрель	0,750	0,231	0,629	1,054	0,734	1,370

Примечание. Здесь и в табл. 2 жирным шрифтом выделены значения модулей > 2.

Таблица 2
Модули коэффициентов Фурье для временных рядов ледовитости Татарского пролива в 1951–1982 и 1983–2014 гг.

Table 2
Absolute values of Fourier coefficients for the ice cover time series for the 1951–1982 and 1983–2014

Месяц	Период											
	2-летний		3-летний		5-летний		6-летний		7-летний		10-летний	
	51–82	83–14	51–82	83–14	51–82	83–14	51–82	83–14	51–82	83–14	51–82	83–14
Декабрь	1,88	0,15	0,71	1,18	1,25	0,58	0,06	1,81	2,33	1,52	0,83	0,66
Январь	1,18	3,68	0,92	1,14	2,84	1,01	0,73	0,39	1,61	0,96	0,24	0,43
Февраль	2,64	4,25	1,56	0,38	4,59	0,60	0,62	1,06	0,07	0,34	0,52	0,54
Март	3,44	4,79	1,68	0,91	3,69	1,50	0,77	0,62	0,44	1,24	0,48	0,72
Апрель	0,91	2,23	1,16	0,81	1,74	1,14	0,58	0,42	0,19	0,23	1,28	0,23

Для объяснения выделенных периодов сопоставим их с рассчитанными периодами интенсивности центров действия атмосферы. Модули коэффициентов Фурье во временных рядах интегральных значений интенсивности атмосферной циркуляции в центрах действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона (методика их расчета дана в статье Шатилина и др., 2014) за два рассматриваемых периода представлены в табл. 3–5.

В первый период (1948–1979 гг.) в январе наиболее выражены 5–6-летние циклы, а во второй период (1980–2012 гг.) — 2- и 7-летние. В феврале первого периода наиболее выражена цикличность 2 и 5 лет, а во второй период наибольшая значимость отмечалась для 10-летнего цикла. В марте в первый период наибольшую значимость имели 2- и 3-летние циклы, а во второй — 2- и 7-летние. В апреле первого периода самыми значительными были 2- и 7-летние, а во втором — 2–3-летние циклы. В общем, можно отметить, что в 1948–1979 гг. над Азией (область сибирского антициклона) доминировали 5–6-летние циклы, а в 1980–2012 гг. — 2- и 7-летние циклы (табл. 3).

В первом периоде над областью азиатской депрессии доминирующим циклом был 6-летний, а во втором — 2-летний (табл. 4). Известно, что квазидвухлетний цикл связан со сменой восточных и западных ветров в нижней экваториальной стратосфере

Таблица 3

Модули коэффициентов Фурье для временных рядов нормированных значений
приземного давления (P_0) над областью сибирского антициклона в 1948–1979 и 1980–2012 гг.
Table 3

Absolute values of Fourier coefficients for time series of the surface pressure (P_0)
over the Siberian High area in the 1948–1979 and 1980–2012

Месяц	Период											
	2-летний		3-летний		5-летний		6-летний		7-летний		10-летний	
	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12
Январь	0,08	0,14	0,11	0,04	0,13	0,12	0,12	0,11	0,06	0,11	0,04	0,03
Февраль	0,09	0,08	0,23	0,15	0,55	0,04	0,22	0,05	0,10	0,15	0,18	0,17
Март	0,23	0,19	0,16	0,05	0,07	0,10	0,14	0,13	0,14	0,18	0,08	0,16
Апрель	0,54	0,23	0,11	0,18	0,06	0,13	0,03	0,05	0,12	0,08	0,08	0,16

Примечание. Здесь и в табл. 4, 5 жирным шрифтом выделены значения модулей $> 0,2$.

Таблица 4

Модули коэффициентов Фурье для временных рядов нормированных значений
геопотенциала H_{500} над областью азиатской депрессии в 1948–1979 и 1980–2012 гг.

Table 4

Absolute values of Fourier coefficients for time series of the geopotential height H_{500}
over the Asian Low area in the 1948–1979 and 1980–2012

Месяц	Период											
	2-летний		3-летний		5-летний		6-летний		7-летний		10-летний	
	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12
Январь	0,19	0,40	0,12	0,14	0,17	0,04	0,08	0,13	0,15	0,11	0,09	0,06
Февраль	0,16	0,22	0,03	0,06	0,10	0,03	0,21	0,12	0,02	0,03	0,20	0,05
Март	0,05	0,11	0,05	0,09	0,08	0,20	0,26	0,07	0,22	0,02	0,17	0,32
Апрель	0,20	0,23	0,31	0,14	0,07	0,11	0,47	0,15	0,17	0,04	0,08	0,14

Таблица 5

Модули коэффициентов Фурье для временных рядов нормированных значений
геопотенциала H_{500} над областью гавайского антициклона в 1948–1979 и 1980–2012 гг.

Table 5

Absolute values of Fourier coefficients for time series of the geopotential height H_{500}
over the Hawaiian High area in the 1948–1979 and 1980–2012

Месяц	Период											
	2-летний		3-летний		5-летний		6-летний		7-летний		10-летний	
	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12	48–79	80–12
Январь	0,05	0,14	0,12	0,07	0,01	0,09	0,04	0,08	0,06	0,11	0,05	0,12
Февраль	0,09	0,14	0,20	0,01	0,09	0,12	0,13	0,14	0,06	0,22	0,05	0,14
Март	0,10	0,09	0,09	0,12	0,17	0,01	0,02	0,04	0,10	0,17	0,01	0,21
Апрель	0,03	0,08	0,08	0,11	0,04	0,08	0,10	0,05	0,05	0,10	0,05	0,09

(Полонский, Кибальчич, 2015). Возможно, что изменения в ледовитости Татарского пролива обуславливаются изменчивостью в режиме азиатской депрессии, особенно в последние годы.

Во временном ряду интенсивности гавайского антициклона в период 1980–2012 гг. в феврале и марте доминируют 7- и 10-летний циклы (они более значимы для второго периода) (табл. 5). Известно, что это циклы, связанные с Эль-Ниньо и гелиогеофизическими факторами (Максимов и др., 1977). Интенсивность и пространственное распределение гребня гавайского антициклона на районы Охотского моря влияет на положение охотского тропосферного циклона (Шатилина и др., 2014).

На следующем этапе рассчитывалась значимость трендов ледовитости в Татарском проливе за период с 1951 по 2014 г., а также для двух периодов: 1951–1982 гг. и 1983–2014 гг. (табл. 6).

Величина a/s (здесь a — коэффициент линейного тренда временного ряда, s — среднеквадратическая амплитуда остаточных вариаций ледовитости Татарского пролива

Таблица 6

Значимость трендов (a/s) ледовитости Татарского пролива для временных рядов
1951–2014, 1951–1982 и 1983–2014 гг.

Table 6

Significance of the trends for time series of the ice cover in the Tatar Strait in the 1951–2014,
1951–1982, and 1983–2014

Месяц	1951–2014 гг.			1951–1982 гг.			1983–2014 гг.		
	a	s	a/s	a	s	a/s	a	s	a/s
Декабрь	–0,092	7,294	–0,013	–0,209	7,441	–0,028	–0,220	6,901	–0,032
Январь	–0,207	9,209	–0,022	–0,609	9,425	–0,065	–0,179	8,059	–0,022
Февраль	–0,160	10,258	–0,016	–0,538	10,749	–0,050	–0,016	8,956	–0,002
Март	–0,196	10,267	–0,019	–0,481	11,241	–0,043	0,037	8,536	0,004
Апрель	–0,120	6,356	–0,019	–0,287	6,704	–0,043	–0,039	5,700	–0,007

относительно её трендового изменения) характеризует статистическую значимость результатов при фиксированной длине рядов и при указании критического значения, соответствующего принятому уровню значимости. В случае рядов длительностью 32 года для 95 %-ного уровня значимости критическое значение составляет 0,04 (Цициашвили, 2008). Получилось, что для всего ряда тренд незначим, а при разделении на два периода выявляются значимые тренды для временного ряда 1951–1982 гг., что, вероятно, связано с высокой ледовитостью в 1950-е гг. Кроме того, следует заметить, что ледовитость отличалась в первый период высокой флюктуацией в феврале и марте.

На основании выделенных доминирующих периодов и расчета значимых трендов для временного ряда в 1951–2014 гг. составлен прогноз ледовитости в Татарском проливе на февраль-март 2015 г. (месяцы максимально устойчивого развития льда) (табл. 7). Видно, что прогноз на 2015 г. хорошо оправдался.

Таблица 7

Прогноз ледовитости в Татарском проливе на февраль-март 2015 г. по коэффициентам Фурье
(по среднему значению ряда с трендом), %

Table 7

Forecast of the ice cover (%) in the Tatar Strait for February-March of 2015 on the base of Fourier
decomposition and trend extrapolation

Месяц	Фактическая ледовитость в 2015 г.	Прогноз ледовитости на 2015 г. по ряду 1951–2014 гг.	Среднегодовлетьная ледовитость (по ряду 1980–2009 гг.), %
Февраль	37,8	33,59	45,6
Март	18,3	19,38	35,4

На основании выделения доминирующих периодов во временном ряду ледовитости и значимости трендов можно перейти к выявлению механизма формирования экстремальной ледовитости под влиянием центров действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом.

Как следует из предыдущих исследований (Шатилина и др., 2006; Муктепавел, Шатилина, 2009), механизмы формирования ледяного покрова хорошо видны в экстремальные по ледовитости годы. Особенностью развития ледовитости Татарского пролива являются ее резкие колебания по месяцам. После интенсивного прироста ледовитости, например в декабре или январе, может произойти резкое разрушение ледяного покрова после прохождения циклона, приносящего теплый воздух с юга. Поэтому экстремальную ледовитость рассматривали по месяцам, а не по среднему за зимний сезон значению площади льда (табл. 8), и попытались определить основные различия в гидрометеорологических условиях в разные годы.

В Татарском проливе абсолютный максимум ледовитости (86,8 % относительно площади пролива) был зафиксирован зимой 1950/51 г., в табл. 8 показано, что экстремальная ледовитость наблюдалась на протяжении 4 месяцев — с декабря по март, что было обусловлено интенсивным развитием зимнего муссона (Столярова, 1977; Шатилина и др., 2014).

Таблица 8

Годы с экстремальной ледовитостью в Татарском проливе

Table 8

Years of extreme ice cover in the Tatar Strait

Тип лет	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
Холодные годы	1950, 1952, 1953, 1984, 1985, 1991	1951, 1953, 1954, 1971	1951, 1952, 1953, 1954, 1960, 1979, 1985, 2001	1951, 1954, 1960, 1962, 1979, 2001, 2012	1960, 1999
Теплые годы	1956, 1961, 1968, 1997, 2004, 2013	1963, 1981, 1991, 2005, 2010	1957, 1963, 1974, 1991	1972, 1991, 2008	1968, 1972, 2008, 2014

В 1991 г., когда ледовитость в Татарском проливе в январе-марте достигла исторического минимума, над северо-западной частью Охотского моря наблюдалось экстремальное повышение поверхности AT_{500} (рис. 3, а, б), что свидетельствовало об ослаблении очага холода. В приземном поле увеличивалась адвекция теплого воздуха (рис. 3, в, г). При такой барической ситуации отмечались аномальная структура вод в северной части Японского моря и положительные аномалии температуры воды (Дьяков, 2000). Ослабление очага холода наблюдалось в Татарском проливе в экстремально малоледовитые годы — 1957, 1963 и 1974 (Шатилина и др., 2006).

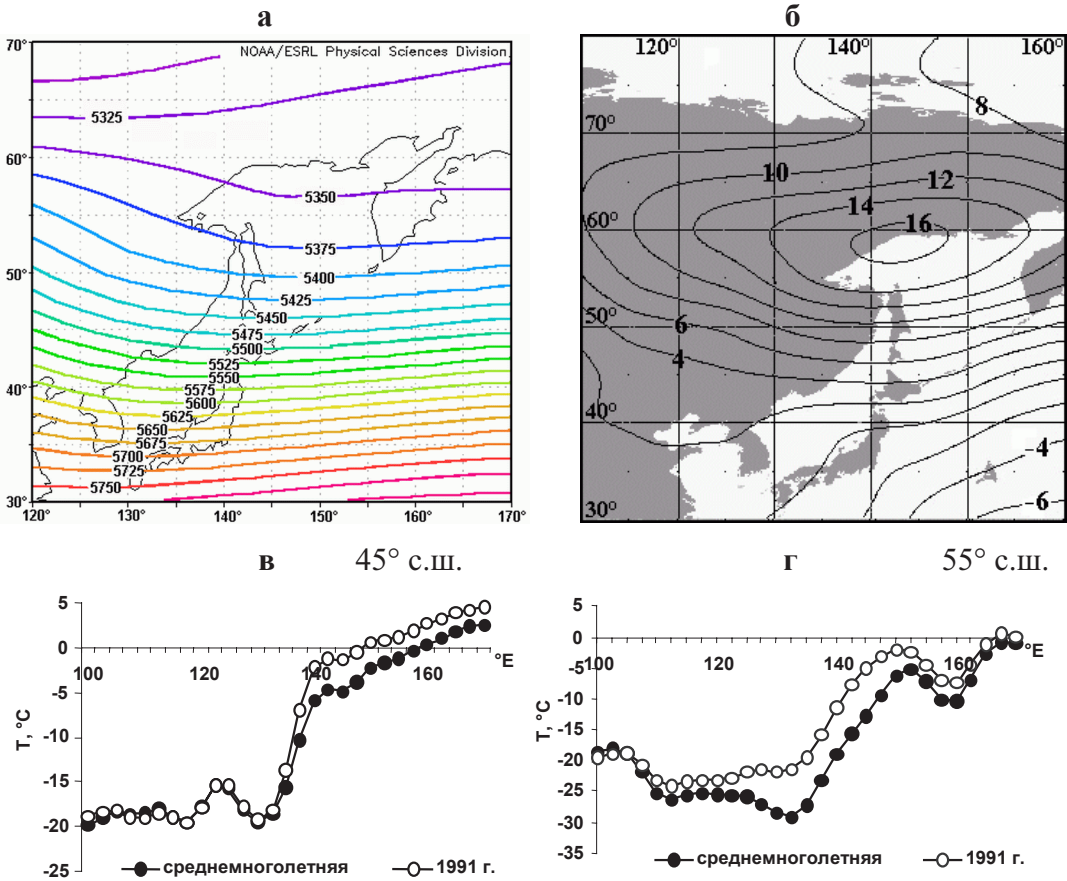


Рис. 3. Карта средней высоты изобарической поверхности 500 гПа (а) и поле аномалий геопотенциала H_{500} в январе 1991 г. (б); изменчивость среднемноголетней температуры воздуха в январе и температуры воздуха у земли вдоль 45° (в) и 55° с.ш. (г) между 100 и 170° в.д. в январе 1991 г.

Fig. 3. Mean month patterns of absolute topography H_{500} in January 1991 (а); its anomalies in January 1991 (б); surface air temperature at 45°N between 100–170° E in January 1991 vs. its climatic variation in January (в) and at 55° N between 100–170° E in January 1991 vs. its climatic variation in January (г)

На рис. 4 представлены данные барического поля и температуры воздуха для экстремально холодного 2001 г. (второй максимум после 1960 г.). Видно, что над Охотским морем располагалась область с очень низкими значениями H_{500} гПа (рис. 4, а), а его аномалии в восточной части моря достигали минус 12 дам (рис. 4, б). В годы с холодными ледовыми условиями тропосферный полярный вихрь над акваторией Охотского моря активизируется, от него зависят траектории и глубина циклонов, выходящих в Охотское море, по периферии которых осуществляется вынос холодного арктического воздуха на акваторию Татарского пролива (рис. 4, в, г).

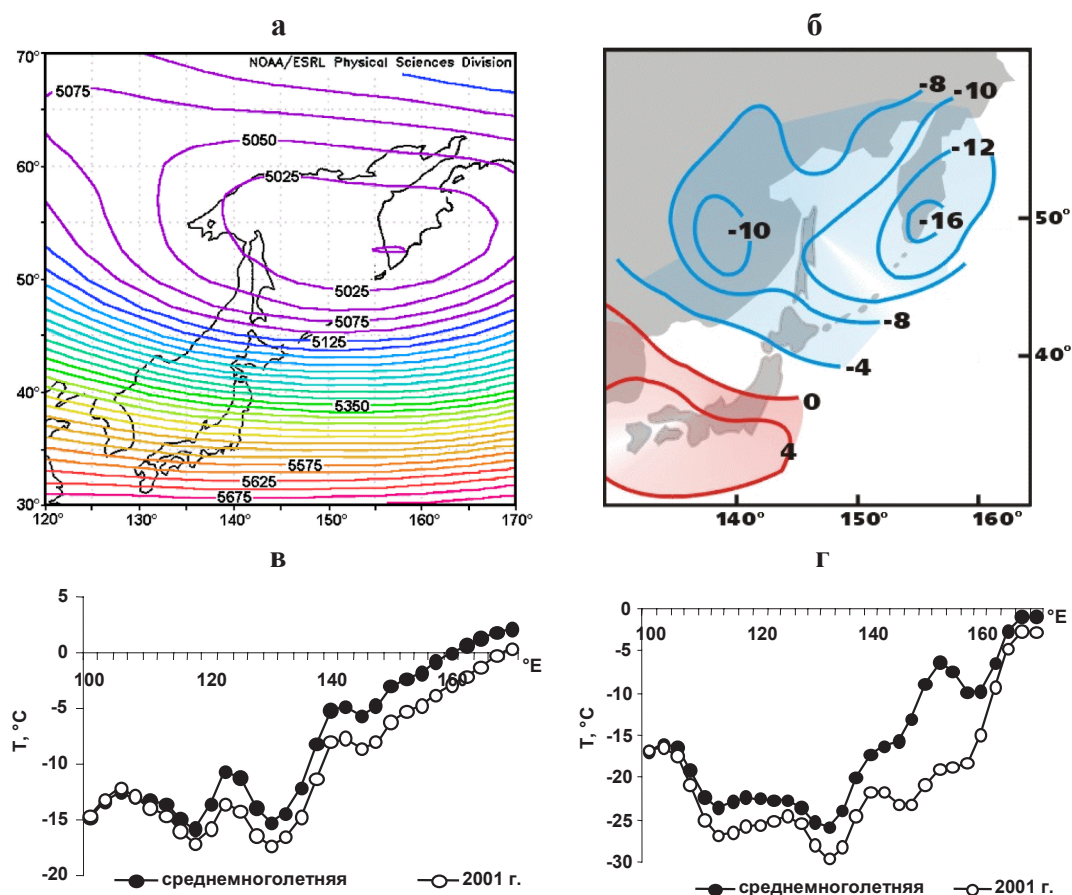


Рис. 4. Карта средней высоты изобарической поверхности 500 гПа (а) и поле аномалий геопотенциала H_{500} в феврале 2001 г. (б); изменчивость средне многолетней температуры воздуха в феврале и температуры воздуха у земли в феврале 2001 г. вдоль 45° (в) и 55° с.ш. (г) между 100 и 170° в.д.

Fig. 4. Mean month AT_{500} patterns of absolute topography H_{500} in February 2001 (а); its anomalies in February 2001 (б); surface air temperature at 45° N between 100–170° E in February 2001 vs. its climatic variation in February (в) and at 55° N between 100–170° E in February 2001 vs. its climatic variation in February (г)

Далее с 2004 г. отмечается устойчивый период малоледовитых зим в Татарском проливе. Исключение составили ледовые условия зим 2012, 2013 гг. с положительными аномалиями (см. рис. 2), что было вызвано усилением влияния холодного охотского тропосферного циклона, а ледовитость Татарского пролива проходила по сценарию «холодных» зим. Детализация механизма формирования экстремально «теплых» зим в весенний период представлена на примере марта 2008 г. (рис. 5).

Видно, что вся северная часть Охотского моря находилась под влиянием теплого тихоокеанского гребня, а Японское море и Татарский пролив под влиянием дальневосточной ложбины с южным положением тропосферного циклона (рис. 5, а, б). Такие условия вызвали ослабление адвекции холодного арктического воздуха и адвекцию

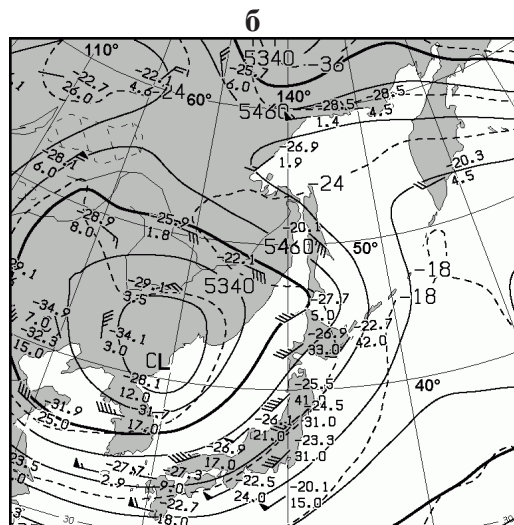
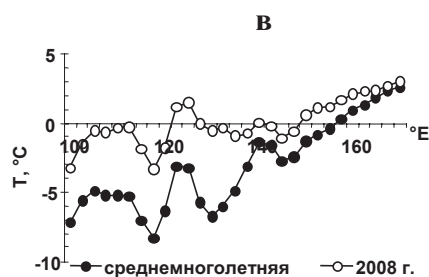
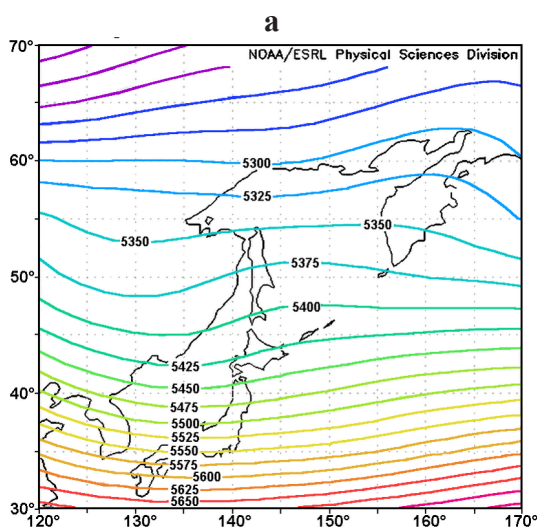


Рис. 5. Карта средней высоты изобарической поверхности 500 гПа за март 2008 г. (а) и пример карты геопотенциала AT_{500} за 25.03.2008 г. (срок 00 UTC) (б); изменчивость среднемноголетней температуры воздуха в марте и температуры воздуха у земли в марте 2008 г. по 45° с.ш. 100–170° в.д. (в)

Fig. 5. Mean month patterns of absolute topography H_{500} in March 2008 (а) and on March 25, 2008 (00 h UTC) (б); surface air temperature at 45° N between 100–170° E in March 2008 vs. its climatic variation in March (в)

теплых воздушных масс из южных районов Азии. Циклоны способствовали поступлению теплых воздушных масс в Татарский пролив. Ход среднемесячной температуры воздуха вдоль 45° с.ш. между долготами 100 и 170° в.д. показан на графике (рис. 5, в).

Замеченные закономерности проявились и при формировании ледовитости в 2014–2015 гг. В 2014 г. в марте ледовитость в Татарском проливе составила 34,6 %, что было ниже нормы. Рис. 6 демонстрирует основные особенности барических полей и термического состояния атмосферы для марта 2014 г. Видно, что тихоокеанский тропосферный гребень ослаблен, а доминирующее отепляющее воздействие оказывал азиатский тропосферный гребень (рис. 6, а). При этом охотский тропосферный циклон был вытеснен к юго-востоку Камчатки. В результате основной очаг тепла располагался над континентальными районами между 100 и 125° в.д. (рис. 6, в). Это отображено в поле AT_{500} , где видно, что поле пониженных геопотенциальных высот наблюдается над областью Охотского моря (рис. 6, б). Более наглядно такая ситуация проявляется на цветокодированных картах геопотенциальных высот H_{500} (рис. 6, г), восстановленных по спутниковым данным температурно-влажностного зондирования атмосферы в НИЦ «Планета» г. Хабаровск (URL: <http://www.dvtcpod.ru/>), так как дает более подробную информацию особенно над водной поверхностью, как наименее освещенной результатами фактических наблюдений.

Аномально низкая ледовитость в Татарском проливе отмечалась в 2015 г. (см. рис. 1, б). Так, в январе она составила 38,4 %, феврале — 37,8, а в марте — 18,3 %. Особенно аномальным был март 2015 г. (минимальная ледовитость за период 1951–2014 гг. была в марте 1991 г. — 22,5 %). На рис. 7 представлена карта средней высоты изобарической поверхности 500 гПа за март 2015 г., пример карт геопотенциала H_{500} и приземного давления (ЖМА), а также карты геопотенциальных высот поверхностей H_{500} и H_{925} гПа (НИЦ «Планета»), среднемесячная изменчивость приземного давления и температуры воздуха по 45° с.ш. между 100 и 170° в.д. в марте 2015 г. Видно, что в средней тропо-

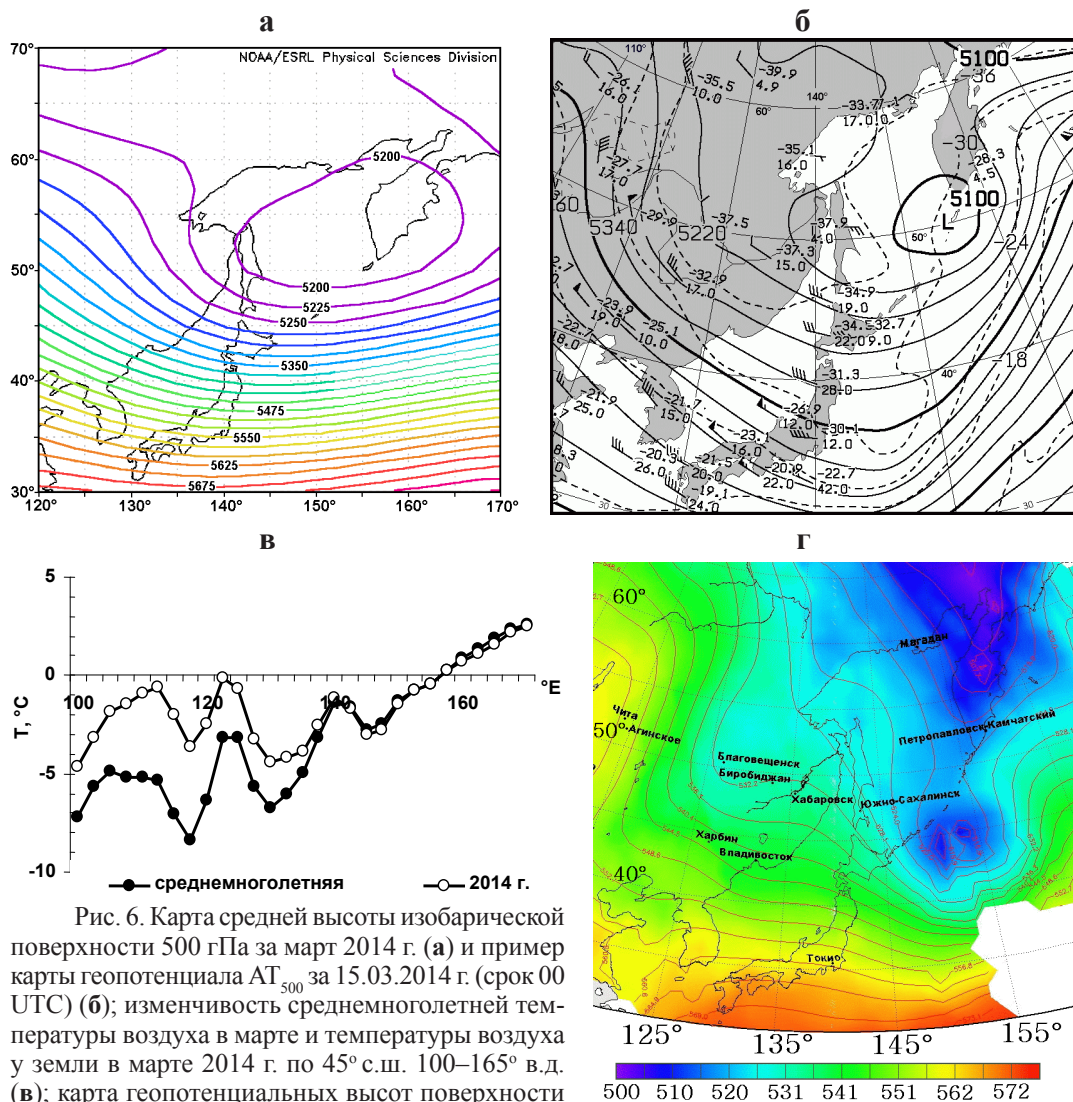


Рис. 6. Карта средней высоты изобарической поверхности 500 гПа за март 2014 г. (а) и пример карты геопотенциала AT_{500} за 15.03.2014 г. (срок 00 UTC) (б); изменчивость среднемноголетней температуры воздуха в марте и температуры воздуха у земли в марте 2014 г. по 45° с.ш. 100–165° в.д. (в); карта геопотенциальных высот поверхности H_{500} (Гп.м.) за 14.03.2014 г. (г)

Fig. 6. Mean month patterns of absolute topography H_{500} in March 2014 (а) and on March 15, 2014 (00 h UTC) (б), surface air temperature at 45° N between 100–170° E in March 2014 vs. its climatic variation in March (в); absolute topography H_{500} on March 14, 2014 (г)

сфере над Японским морем в марте наблюдался зональный перенос воздушных масс (рис. 7, а). Характерным процессом для марта 2015 г. было наличие теплого гребня над Татарским проливом (рис. 7, б), а в приземном поле наблюдался антициклон (рис. 7, в). Наиболее наглядно вторжение теплых воздушных масс из южных районов Азии представлено на картах геопотенциальных высот поверхностей H_{500} и H_{925} (рис. 7, г). Наличие теплого гребня обусловило рост в марте приземного давления (рис. 7, е) и рост температуры воздуха (рис. 7, ж) по сравнению со среднемноголетними значениями, причем на 140–142° в.д. температурная аномалия являлась экстремальной. Можно предположить, что существенная перестройка атмосферной циркуляции в данном регионе, повлиявшая на минимальную ледовитость в Татарском проливе в 2015 г., связана с началом пика Эль-Ниньо (данные Японского метеорологического агентства URL: <http://ds.data.jma.go.jp/>).

Сложный процесс льдообразования в Татарском проливе связан как с глобальными атмосферными процессами, так и с динамикой вод в Японском море. Ледовитость в южной части пролива в большей степени зависит от притока теплых вод с Цусимским

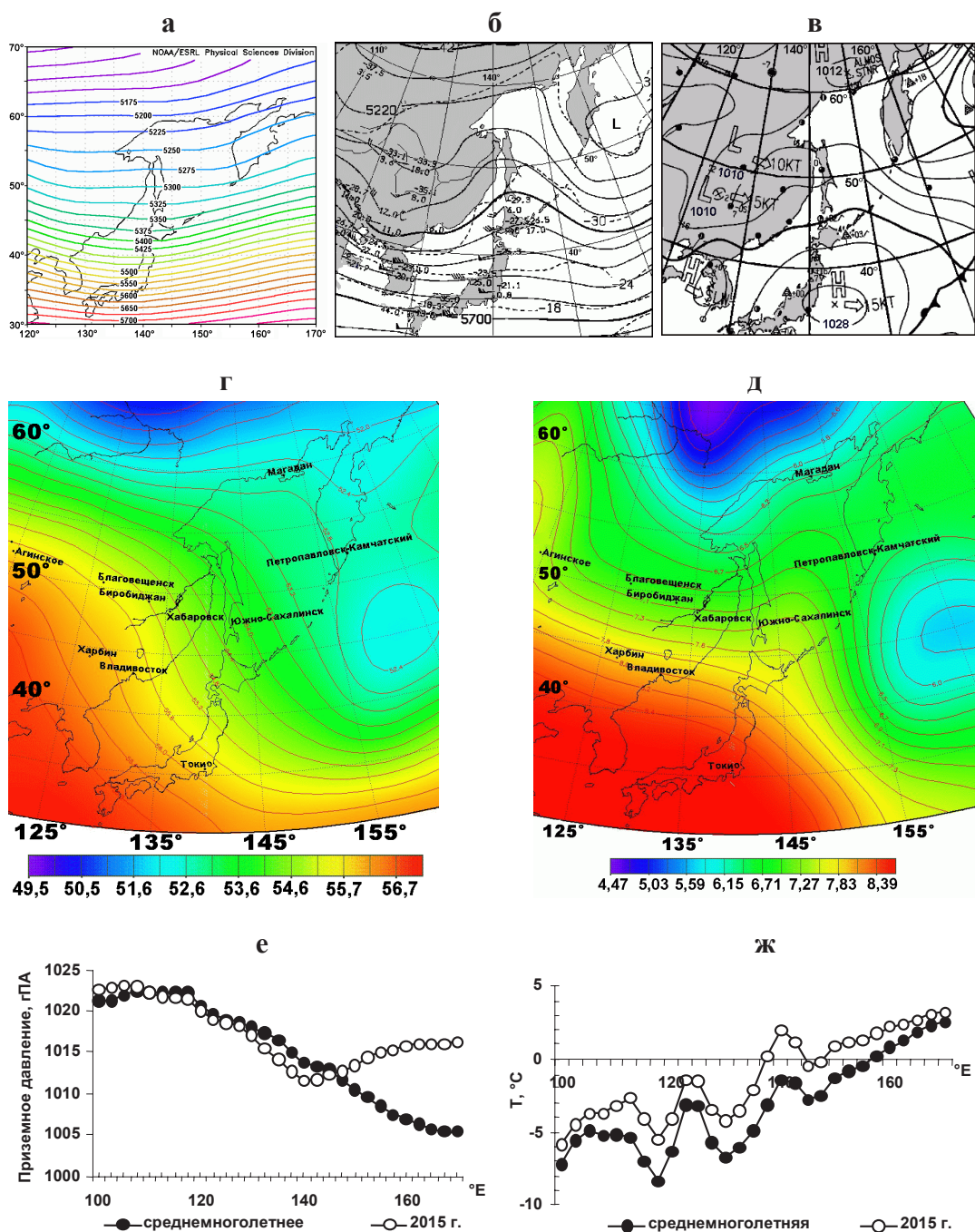


Рис. 7. Карта средней высоты изобарической поверхности 500 гПа за март 2015 г. (а), пример карт геопотенциала AT_{500} (б) и поля приземного давления (в) за 15.03.2015 г. (срок 00 UTC); карта геопотенциальных высот поверхностей H_{500} и H_{925} (Гп.м.) за 25.03.2015 г. (г, д); изменчивость среднемесячного приземного давления и приземного давления в марте 2015 г. (е); изменчивость среднемесячной температуры воздуха и температуры воздуха у земли в марте 2015 г. (ж) по 45° с.ш. 100–170° в.д.

Fig. 7. Mean month patterns of absolute topography H_{500} map in March 2015 (а) and on March 15, 2015 (00 h UTC) (б); atmospheric pressure at the sea surface on March 15, 2015 (00 h UTC) (в); absolute topography H_{500} and H_{925} on March 25, 2015 (г, д); atmospheric pressure at the sea surface for 45° N between 100–170° E in March 2015 vs. its climatic variation in March (е); and surface air temperature at 45° N between 100–170° E in March 2015 vs. its climatic variation in March (ж)

течением. Г.А. Столярова (1974) считала, что межгодовые колебания теплосодержания водных масс и ледовитости Татарского пролива определяются в значительной степени адвективными составляющими. Аномальные барические структуры проявляются на термическом и динамическом состоянии всего Японского моря.

Рассмотрим термическую структуру вод в Татарском проливе в середине марта в 2014 и 2015 гг. (рис. 8). По полю температуры поверхности моря, построенному по спутниковым данным, отчетливо прослеживаются основные элементы динамики вод — зоны распространения теплых субтропических вод Цусимского течения вдоль японских островов и холодных субарктических вод в северо-западной части моря. На картах белым цветом выделены области, занятые морским льдом. Видно, что в 2014 г. площадь льда на этот период превышала значения 2015 г. Также привлекает внимание зона восточной ветви теплого Цусимского течения, проходящего вдоль японских островов и южной части о. Сахалин. В 2015 г. интенсивность Цусимского течения была высокой, его воды проникали в Татарский пролив вплоть до 49° с.ш. Струя теплых вод шириной 9–17 км доходила в побережье западной части о. Сахалин почти до 50° с.ш. Установившийся атмосферный антициклон над японскими островами (см. рис. 7, в) способствовал усилению мощности потока теплых вод через Корейский пролив, при этом наблюдался активный сток через Сангарский пролив и прол. Лаперуза.

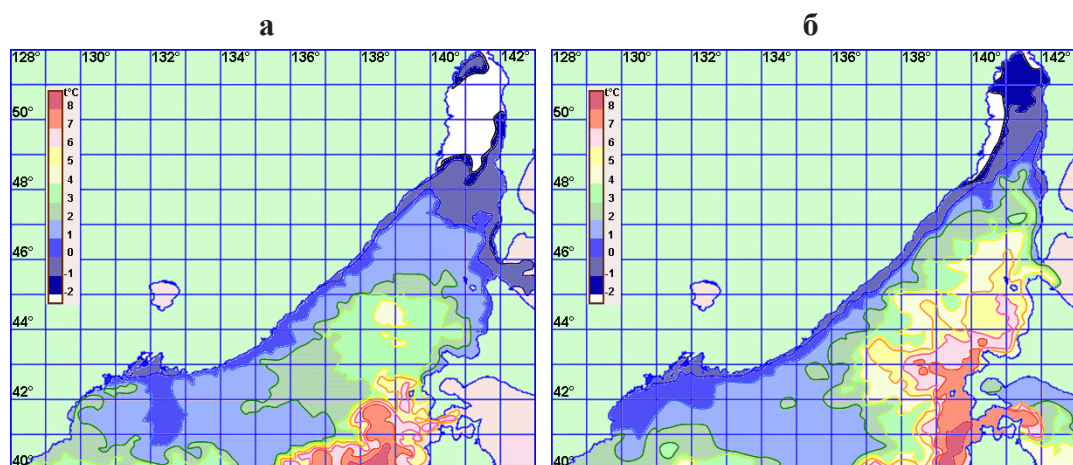


Рис. 8. Композиционная карта температуры поверхности моря по данным геостационарного спутника MTSAT1 за 14–18 марта 2014 г. (а) и 2015 г. (б)

Fig. 8. Composite map of the sea surface temperature on the data of geostationary satellite MTSAT1 received on March 14–18, 2014 (а) and on March 14–18, 2015 (б)

Был проведен анализ температуры поверхности моря, восстановленной спутниковыми методами, в 7 пунктах (в бухтах и близ мысов) в северном побережье Приморья (43–47° с.ш.). К концу марта 2014–2015 гг. уже наблюдались положительные значения температуры воды по ночным виткам, кроме бухт, в которых имелся речной сток. В 2012–2013 гг., отличавшихся большей площадью покрытия льдом Татарского пролива, наблюдалась задержка прогрева прибрежных вод на 2–3 недели. Напрашивается вывод, что концентрация льда в Татарском проливе согласуется с аномалиями температуры прибрежных вод северного Приморья, однако для верификации этого отношения требуется проверка на более длительном периоде. Знания о начале сроков прогрева вод в прибрежной зоне важны для прогноза условий для размножения гидробионтов, начала роста морских водорослей.

Заключение

Во временном ряду ледовитости Татарского пролива выявлены доминирующие циклы и значимость изменений ледовитости для всего ряда и по 32-летним периодам (1951–1982 и 1983–2014 гг.). Установлено, что доминирующие циклы для

выделенных периодов различаются: в первом периоде доминирующим с января по март был 5-летний цикл, во втором периоде преобладал 2-летний цикл. Значимые тренды (величина $a/s > 0,04$) выделяются для временного ряда 1951–1982 гг., для 1983–2014 гг. тренд незначим.

В период 1951–1982 гг. доминирующее влияние на ледовитость оказывал сибирский антициклон. В период 1983–2014 гг. условия формирования ледовитости Татарского пролива находились под доминирующим воздействием атмосферных процессов над южными районами Азии, где преобладала 2-летняя цикличность, а роль сибирского антициклона ослабела. Наряду с этим на ледовитость Татарского пролива влияли и долгопериодные циклы, обнаруженные в области гавайского антициклона (7–10 лет). Усиление гавайского гребня над акваторией Охотского моря способствует ослаблению охотского тропосферного циклона и смещению его к югу.

В период потепления (1983–2014 гг.) ледовитость Татарского пролива находилась под доминирующим воздействием южных крупномасштабных барических систем (высотных антициклонов — азиатского и гавайского), а также зависела от положения регионального климатического центра — охотского тропосферного циклона.

Показано, что формирование минимальной ледовитости в Татарском проливе может осуществляться при двух сценариях развития региональной атмосферной циркуляции над центральным районом 2-го естественного синоптического района Северного полушария: 1-й сценарий — доминирующим фактором формирования ледовитости является южное положение вторичного полярного тропосферного циклона, которое определяется откликом на интенсивность крупномасштабных атмосферных процессов над Азией и Тихим океаном; 2-й — доминирующим фактором будет интенсивность азиатского гребня над Японским морем и прилегающими районами суши. При втором сценарии наблюдаются аномальные процессы в поле поверхностных течений Татарского пролива и смежной зоны прол. Лаперуза. Происходит раннее очищение Татарского пролива ото льда. В экстремально малоледовитом 2015 г. действовали два фактора: в первые зимние месяцы (январь, февраль) ледовые условия формировались при ослабленном, смещенном к югу охотском тропосферном циклоне, а со второй половины марта — при влиянии развитого тепляющего азиатского гребня.

Особенности пространственного распределения льда, термического режима вод показали, что ледовитость в южной части Татарского пролива в 2014–2015 гг. зависела от адвекции теплых вод Цусимского течения.

Список литературы

Алдошина Е.И. Изменение ледовитости и положения кромки льда в Японском и Охотском морях // Тр. ГОИН. — 1960. — Вып. 54. — С. 22–35.

Глаголева М.Г., Саускан Е.М., Тютнев Я.М. Метод прогноза температуры воды у юго-западного побережья о. Сахалин // Тр. ЦИП. — 1957. — Вып. 57. — С. 98–131.

Дьяков Б.С. Многолетняя изменчивость структуры вод в юго-восточной части Японского моря в зимний период // Изв. ТИНРО. — 2000. — Т. 127. — С. 70–77.

Климов С.М. Особенности годового хода и аномалии температуры на Антоновском разрезе // Инф. письмо СахУГКС. — 1987. — № 1/111. — С. 41–50.

Лобанов В.Б., Данченков М.А., Лучин Е.В. и др. Глава 5.4. Дальневосточные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014. — С. 684–743.

Максимов И.В., Сарухян Э.И., Смирнов Н.П. Космогеофизический фон макропроцессов в океане и атмосфере и сверхдолгосрочный прогноз // Климатология и сверхдолгосрочный прогноз. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — С. 18–25.

Муктепавел Л.С., Шатилина Т.А. Некоторые особенности формирования экстремально малоледовитых зим в Охотском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2009. — Т. 1, вып. 6. — С. 429–440.

Муктепавел Л.С., Шатилина Т.А. Основные причины формирования аномально тяжелых ледовых условий в районе северо-западной части Охотского моря с учетом распределения основных нерестилищ охотской сельди // Вопр. промысл. океанол. — 2012. — Вып. 9, № 1. — С. 89–103.

Пищальник В.М., Леонов А.В., Архипкин В.С., Мелкий В.А. Математическое моделирование условий функционирования экосистемы Татарского пролива : моногр. — Южно-Сахалинск : СахГУ, 2011. — 104 с.

Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз : моногр. — Владивосток : ТОИ, 2002. — 167 с.

Плотников В.В. Опыт использования вероятностной байесовской модели для прогноза некоторых ледовых характеристик на Охотском и Японском морях // Метеорол. и гидрол. — 1996. — № 4. — С. 81–86.

Погодин А.Г., Шатилина Т.А. Особенности термического режима вод и нерест эвфаузиид в северной части Японского моря // Изв. ТИНРО. — 1998. — Т. 123. — С. 168–184.

Полонский А.Б., Кибальчич И.А. Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // Метеорол. и гидрол. — 2015. — № 1. — С. 5–17.

Столярова Г.А. Изменчивость ледовитости Японского моря // Тр. ДВНИГМИ. — 1977. — Вып. 23. — С. 68–74.

Столярова Г.А. О влиянии адвекции водных масс на ледовитость Татарского пролива // Тр. ДВНИГМИ. — 1974. — Вып. 55. — С. 45–50.

Уранов Е.Н. Прогноз многолетних колебаний термического режима вод у юго-западного берега Сахалина // Изв. ТИНРО. — 1971. — Т. 75. — С. 103–105.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д., Матюшенко Л.Ю. Базы данных о ледяном покрове дальневосточных морей, поддерживаемые в ТИНРО-Центре // Мат-лы докл. Седьмого Всерос. симпоз. «Физика Геосфер». — Владивосток : Дальнаука, 2011. — С. 245–250.

Цициашвили Г.Ш. Оценки дисперсий // Дальневост. мат. журн. — 2008. — Т. 8, № 2. — С. 89–94.

Цициашвили Г.Ш., Шатилина Т.А., Радченкова Т.В. Сравнительная оценка климатических изменений над восточным побережьем Азии в период 1950–1979 и 1980–2009 гг. // Вопр. промысл. океанол. — 2011. — Вып. 8, № 2. — С. 93–108.

Шапкина В.Ф. Прогноз температуры воды в районах течения Куро시오, Цусимского и Приморского // Тр. ЦИП. — 1959. — Вып. 91. — С. 18–50.

Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Муктепавел Л.С. и др. Статистические оценки трендов климатических изменений над Дальним Востоком в зимний и летний периоды 1980–2012 гг. // Вопр. промысл. океанол. — М. : ВНИРО, 2014. — Вып. 11, № 1. — С. 76–97.

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. 65–72.

Park K.A., Kim K., Cornillon P.C. and Chung J.Y. Relationship between satellite-observed cold water along the Primorye coast and sea ice in the East Sea (the Sea of Japan) // Geophys. Res. Lett. — 2006. — Vol. 33. — P. 10602–10606.

Ustinova E.I., Sorokin Yu.D. Sea ice cover variability and change in the Tatar Strait // Proc. of the 27th Intern. Symp. on Okhotsk Sea & Sea Ice. — Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2012. — P. 174–177.

Поступила в редакцию 23.10.15 г.