

УДК 551.326.13

## Ледовые условия Северного Каспия в различные макроциркуляционные эпохи XX и XXI веков

*И.О. Думанская*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
dumansk@rambler.ru*

Даны количественные оценки изменчивости атмосферного давления в центрах действия атмосферы и повторяемости форм атмосферной циркуляции за длительные периоды наблюдений. Описаны общие механизмы влияния центров действия атмосферы и форм атмосферной циркуляции на ледовые условия Северного Каспия. Показано, что для многолетней изменчивости повторяемости различных форм атмосферной циркуляции характерны циклические закономерности. Найдены периоды ряда циклов (гармоник) и показано их участие в формировании изменчивости ледовых характеристик Северного Каспия. Выявлены и описаны существенные отличия в характеристиках температурного и ледового режима Северного Каспия для одинаковых по индексу макроциркуляционных эпох, которые наблюдаются в разные века. Показано, что полный цикл прохождения смены основных форм циркуляции в последовательности  $W \rightarrow C \rightarrow E$  совершается примерно за 84 года.

*Ключевые слова:* ледовые условия Северного Каспия, ледовитость Северного Каспия, суровость зим в Каспийском море, макроциркуляционные эпохи, центры действия атмосферы, повторяемость форм атмосферной циркуляции

## Ice conditions in the North Caspian Sea during different macrocirculation epochs in the XX and XXI centuries

*I.O. Dumanskaya*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
dumansk@rambler.ru*

Quantitative estimates of air pressure variability in the atmospheric centers of action and of the frequency of atmospheric circulation patterns over long-term observation periods are presented. The general mechanisms of influence of atmospheric centers of action and atmospheric circulation patterns on ice conditions in the North Caspian Sea are described. It is shown that cyclic variations are typical for a long-term variability of the frequency of various atmospheric circulation patterns. The periods of cycles (harmonics) and their participation in formation of variability of ice characteristics of the North Caspian Sea are identified. Significant differences in the characteristics of the temperature and ice regime of the North Caspian Sea for macrocirculation epochs with the same index observed in different centuries are revealed and described. It is shown that it takes about 84 years to complete the cycle of change in the main circulation patterns in the  $W \rightarrow C \rightarrow E$  sequence.

*Keywords:* ice conditions in the North Caspian Sea, ice coverage of the North Caspian Sea, severity of winters in the Caspian Sea, macrocirculation epochs, atmospheric centers of action, frequency of atmospheric circulation patterns

## Введение

Ледовые условия Северного Каспия (так же как и любого другого моря) зависят от преемственности и цикличности процессов, происходящих в природе [1, 2], связаны со спецификой макроциркуляционных атмосферных процессов [9]. Последние, в свою очередь, существенно зависят от состояния и взаимного влияния центров действия атмосферы (ЦДА) в течение ледового сезона и в периоды времени, предшествующие ледообразованию. Главной особенностью Северного Каспия является его мелководность (почти вся акватория лежит в зоне с глубинами менее 20 м) и слабая адвекция тепла из районов Среднего Каспия. В этой ситуации именно атмосферные процессы оказывают основное влияние на его ледовый режим.

На климат Каспийского моря влияют холодные арктические и влажные атлантические воздушные массы, сухой воздух из Казахстана, теплые средиземноморские воздушные массы. В течение года для моря характерно преобладание антициклональных условий погоды. Циклоны, образующиеся над Северной Атлантикой, смещаются на Балтику и далее – в район нижнего течения Волги. Продуцирование атлантических циклонов зависит от степени развития Исландского минимума (ИМ). Траектория движения этих циклонов располагается севернее Астрахани, таким образом, на формирование погоды на Северном Каспии оказывают влияние их ложбины. С ними связано усиление северо-западного ветра, осадки, зимой – метели. Южные циклоны (каспийские и черноморские) образуются к югу от параллели 45° с. ш. В среднем с ноября по март через Астрахань проходит 23 циклона.

Зимой условия для выхода циклонов на северную часть моря создаются при ослабленном влиянии Сибирского максимума (СМ). Один из его гребней с середины января до конца февраля ориентирован на Каспий и обеспечивает здесь преобладание ясной холодной погоды. Сибирский максимум аккумулирует холод, Азорский максимум (АЗМ) поставляет тепло, Исландский минимум продуцирует циклоны. Все три ЦДА находятся в состоянии непрерывной трансформации. Их влияние друг на друга проявляется в обмене воздушными массами, количеством тепла и движения. Наиболее быстрый обмен происходит между АЗМ и ИМ, находящимися на расстоянии примерно 3500 км друг от друга [5]. Медленнее, пропорционально расстоянию между центрами, осуществляется взаимное влияние СМ и АЗМ, СМ и ИМ. Участвует в обмене воздушными массами и Алеутский минимум (АЛМ), центр которого расположен примерно в 4500 км от центра сибирского антициклона.

Летом процессы атмосферной циркуляции над Каспийским морем определяются воздействием усиливающегося Азорского максимума [6, 7].

Количественная оценка макроциркуляционных атмосферных процессов может быть сделана, например, по классификации, разработанной

Г.Я. Вангенгеймом и А.А. Гирсом. Авторы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов исходили из того, что в Северном полушарии западно-восточный перенос (форма циркуляции W) нарушается меридиональными потоками тепла и количества движения (характерными для форм циркуляции E и C). Эти нарушения происходят из-за неравномерности нагревания суши и моря, циклонической деятельности на тропосферных фронтах, солнечной активности, «комплекса космогеофизических факторов» [3, 8]. Метод основан на выявлении однородных атмосферных процессов, а также сопряженных с ними гидрологических и ледовых процессов, которые в различное время года являются характерными для отдельных регионов земного шара. Так, например, была установлена связь между изменениями уровня Каспийского моря и преобладанием той или иной формы атмосферной циркуляции (АЦ) [4].

Целью исследования, положенного в основу данной статьи, является оценка изменчивости характеристик ЦДА и повторяемости форм атмосферной циркуляции в зимний период, а также выявление существующих и прогноз будущих особенностей ледового режима Северного Каспия в различные макроциркуляционные эпохи в условиях происходящих климатических изменений.

## 1. Используемые данные

Информационной основой исследования являются данные электронного архива метеорологической и ледовой информации, сформированного в ФГБУ «Гидрометцентр России» (ГМЦ России). В частности, использована метеорологическая информация о среднемесячной температуре воздуха в Астрахани (длина ряда – 132 года); приземном давлении в районах ЦДА: Сибирском максимуме (Иркутск), Исландском минимуме (Рейкьявик), Азорском максимуме (Понта-Делгада), Алеутском минимуме (о. Беринга). Длина рядов данных о параметрах центров действия атмосферы составляет: 109 лет (с 1909 по 2017 г.) – для Алеутского минимума, 132 года (с 1886 по 2017 г.) – для других ЦДА.

Также использованы многолетние данные наблюдений на морских гидрометстанциях Искусственный и Пешной. Длина рядов данных о датах наступления ледовых фаз (первом появлении льда – ПП и окончательном очищении моря ото льда – ОО); продолжительности ледовых периодов (ЛП); максимальных за зиму толщин льда (МТ); максимальной за зиму ледовитости Северного Каспия (МЛ) составляет 65–90 лет.

## 2. Изменчивость интенсивности ЦДА и повторяемости различных форм атмосферной циркуляции в XX – начале XXI века

Климатические изменения, происходящие в настоящее время, затрагивают все элементы климатической системы. Поскольку давление

воздуха в районах ЦДА в значительной мере характеризует особенности распределения крупных атмосферных барических образований, была исследована изменчивость этой характеристики в холодное время года за периоды, превышающие 100 лет. При этом было выявлено, что в районах Исландского минимума и Алеутского минимума в течение всего периода наблюдений в зимние месяцы отмечается нейтральный линейный тренд давления. Прослеживается небольшое уменьшение зимнего давления в районе Сибирского максимума (на 1 гПа). А вот в районе Азорского максимума изменчивость давления имеет значительный и устойчивый положительный тренд. Если в начале XX века среднее давление в январе-феврале в пункте наблюдения АЗМ составляло 1018 гПа, то к настоящему времени оно увеличилось до 1022 гПа (т. е. на 4 гПа), при этом среднегодовое давление увеличилось лишь на 2 гПа. В течение периода наблюдений увеличивалась также на 4 гПа разность значений приземного давления в районах АЗМ и ИМ (за счет АЗМ), а значит, и интенсивность западно-восточного переноса.

Тот факт, что в последние годы над европейской частью России преобладает форма циркуляции W (по классификации Г.Я. Вангенгейма и А.А. Гирса), подтверждают данные из табл. 1.

В таблице каждому году начиная с 1900 г. присвоен «индекс года» по наибольшему превышению над нормой повторяемости той или иной формы АЦ в течение года. При этом внутри периода с 1900 по 2016 г. удалось выделить две макроциркуляционные эпохи W, одну эпоху С и одну эпоху Е. Это весьма условное разбиение на эпохи, так как изменения происходят постепенно, о чем свидетельствуют графики изменчивости годовой (а) и зимней (б) повторяемости форм атмосферной циркуляции на рис. 1. На графиках показаны линейные тренды и полиномиальные тренды 4-го порядка.

Анализ годовых и сезонных графиков изменчивости повторяемости форм АЦ выявил существенные различия в их линейных трендах для 117-летних периодов наблюдений, а именно:

– годовая повторяемость формы Е возрастает, формы W – уменьшается, формы С – мало меняется;

– зимняя повторяемость формы Е уменьшается, формы W – мало меняется, формы С – возрастает;

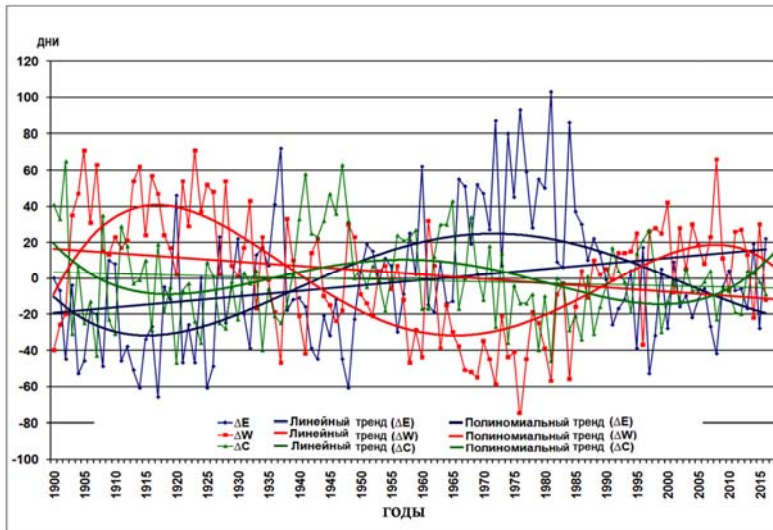
– летняя повторяемость формы Е сильно возрастает, формы W – уменьшается, формы С – уменьшается.

Возрастание повторяемости процессов формы Е в летний период означает, что поток теплого воздуха от экватора к умеренным широтам увеличивается, обеспечивая усиление Азорского максимума и поступление дополнительных порций тепла на Северный Каспий. При этом усиливается прогрев водных масс Каспийского моря, что влечет за собой более позднее ледообразование и уменьшение ледовитости моря.

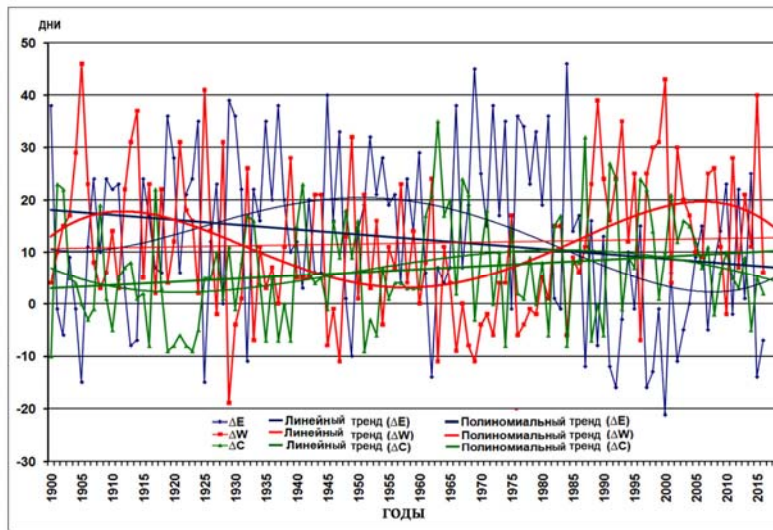
**Таблица 1.** Преобладающие формы атмосферной циркуляции (1900–2016 гг.)  
**Table 1.** Prevailing atmospheric circulation forms (1900-2016)

Год	Индекс года	Год	Индекс года	Год	Индекс года	Год	Индекс года
?		1929	W	1958	E+C	1989	E
		W+E		1959	C	W2	
1900	C	1930	E	1960	E	1990	W
1901	C	1931	W	1961	W	1991	C
1902	C	1932	W	1962	C	1992	W
W1		1933	E	1963	C	1993	W
1903	W	1934	E+W	1964	C	1994	W
1904	W	1935	E	1965	C	1995	E
1905	W	1936	E	E		1996	E+C
1906	W	1937	E	1966	E	1997	W+C
1907	W	1938	W	1967	E	1998	W
1908	C	1939	W	1968	E+C	1999	W
1909	E+W	C		1969	E	2000	W
1910	W	1940	C	1970	E	2001	E
1911	W+C	1941	C	1971	E+C	2002	W
1912	W+C	1942	C	1972	E	2003	W
1913	W	1943	C+W	1973	C	2004	W
1914	W	1944	C	1974	E	2005	W
1915	W+C	1945	C	1975	E	2006	W
1916	W	1946	C	1976	E	2007	W
1917	W+C	1947	C	1977	E	2008	W
1918	W	1948	C+W	1978	E	2009	W
1919	W	E+C		1979	E	2010	E
1920	E	1949	W	1980	E	2011	W
1921	W	1950	E+C	1981	E	2012	W
1922	W	1951	E	1982	E	2013	W
1923	W	1952	E	1983	E	2014	E
1924	W	1953	W	1984	E	2015	W
1925	W	1954	E	1985	E	2016	E
1926	W	1955	E	1986	E		
1927	E	1956	C	1987	E		
1928	W	1957	C	1988	E		

В ходе исследования для каждой группы лет, соответствующей тому или иному индексу эпохи, были вычислены средние значения приземного давления в четырех ЦДА. Анализ полученных результатов позволил выявить следующие закономерности.



а)



б)

**Рис. 1.** Изменчивость годовой (а) и зимней (б) повторяемости форм атмосферной циркуляции:  $\Delta E$  – отклонение от нормы (N) повторяемости формы E (N для года =159, N для зимы =41);  $\Delta W$  – отклонение от нормы повторяемости формы W (N для года =115, N для зимы =30);  $\Delta C$  – отклонение от нормы повторяемости формы C (N для года =91, N для зимы =19).

**Fig. 1.** Variability of annual (a) and winter (b) the frequency of occurrence of the forms of atmospheric circulation:  $\Delta E$  – the deviation from the norm (N) of the frequency of occurrence of form E (N for year =159, N for winter =41).  $\Delta W$  – the deviation from the norm of the frequency of occurrence of the form W (N for year =115, N for winter =30);  $\Delta C$  – the deviation from the norm of the frequency of occurrence of the form C (N for year =91, N for winter =19).

Для преобладания формы *W*, когда над Каспийским морем наблюдается частое прохождение атлантических циклонов, ИМ и АЗМ в зимнее время усилены, между ними наблюдается большая разность давлений (около 23 гПа). СМ ослаблен, так же как и АЛМ.

Для преобладания формы *E* над европейскими морями России наблюдается высотный гребень. Траектории движения атлантических циклонов смещаются на север. Такая ситуация способствует распространению отрога СМ на акваторию Северного Каспия, что вызывает заток холодного воздуха. При этом СМ достаточно активен (близок к норме за весь период наблюдений), однако менее активен, чем при форме *S*. Разность давлений между АЗМ и ИМ составляет 19 гПа.

Для преобладания формы *S* над регионами европейского сектора России наблюдается высотная ложбина, определяющая сдвиг на юг траекторий атлантических циклонов в холодное время года и затоки холодного воздуха в тылу циклонов. При этом ИМ и АЗМ ослаблены (разность давлений между АЗМ и СМ составляет только 14 гПа. СМ и АЛМ, напротив, наиболее активны. Зимние атмосферные процессы разнообразны: возможны как затоки холода в тылу циклонов, так и вынос тепла с акватории Средиземного моря.

Исследование изменчивости давления в зимние месяцы в районе Азорского максимума позволило выявить не только значительный восходящий линейный тренд, но и циклическую составляющую изменчивости этой характеристики (после вычета линейного тренда) с максимумами в 1922–1924 и 2006–2008 гг. и минимумом в 1964–1966 гг. Ее период составил примерно 84 года. Анализ изменчивости годовой и зимней повторяемости трех форм АЦ (рис. 1) показывает, что в изменчивости этих характеристик также имеют место циклические закономерности.

График годовой повторяемости трех форм АЦ (рис. 1 а) имеет две ярко выраженных волны, демонстрирующих циклическую изменчивость повторяемостей форм *W* и *E*. Процессы формы *S* более пассивны и получают свое развитие тогда, когда отклонения от нормы повторяемостей форм *W* и *E* приближаются к нулю. Это происходило, например, в период с 1940 по 1948 год (в эпоху *S*).

### 3. Ледовые условия Северного Каспия в различные макроциркуляционные эпохи в XX веке

Ранее предполагалось, что при повторении макроциркуляционных эпох одной и той же формы циркуляции в конкретном районе Европейской территории России можно ожидать повторения схожих метеорологических и ледовых условий [3]. После выявления устойчивых температурных трендов можно говорить лишь о схожих тенденциях в изменении этих условий при переходе от одного вида атмосферной циркуляции к другому. К настоящему времени накоплены данные для эпох всех трех основных видов АЦ, и мы можем отследить отклик климатической системы Северного Каспия на смену индекса эпохи. Кроме того, как показывает табл. 1,

в XX веке дважды наблюдалась эпоха W: с 1903 по 1928 год – W1 и с 1990 по 2017 год – W2, что дало возможность определить изменения параметров климатической системы для двух соседних эпох W на примере региона Каспийского моря. Оказалось, что во вторую эпоху W2 СГДМ в Астрахани была в 1,74 раза меньше, чем в первую эпоху W1. При переходе от первой эпохи ко второй повторяемость суровых зим уменьшилась почти в 5 раз, а мягких – увеличилась более чем в 3,5 раза. Ледовитость моря уменьшилась на 5 %, а толщина льда на 10–20 см. Таким образом, термические и ледовые характеристики одинаковых по индексу эпох существенно отличаются. При этом средние показатели приземного давления во всех ЦДА для первой и второй эпох W оказались довольно близкими, за исключением АЗМ, для которого зимнее давление во втором случае было существенно выше (более чем на 2 гПа).

В течение 132-летнего периода в целом наблюдается уменьшение СГДМ в Астрахани, средняя скорость которого составляет  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ : если в начале XX века средняя СГДМ в районе Астрахани составляла  $500\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а в районе Атырау  $800\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), то в начале XXI века она уменьшилась до  $300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в районе Атырау до  $600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). На рис. 2 а – пример ледовых условий для зимы, обычной для начала XX века, на рис. 2 б – для зимы, характерной для начала XXI века. При сохранении таких темпов уменьшения СГДМ в середине XXII века возможно ее понижение до  $50\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в районе Атырау – до  $150\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Примером такой предполагаемой типичной зимы для середины XXII века может служить сезон 1999/2000 гг., когда СГДМ в Астрахани составляла около  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в районе Атырау –  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 2 в).

В общий длительный процесс уменьшения суровости зим смена макроциркуляционных эпох вносит свои коррективы на отдельных отрезках времени. В частности, расчет фактической повторяемости суровых, умеренных и мягких зим в Астрахани (определение типа суровости зим для каждого года приведено в [10]) для различных макроциркуляционных эпох в XX веке показал, что для эпохи W1 число суровых зим составило 19 %, а мягких – 12 %; для эпохи С – 44 и 22 %, для эпохи E – 12 и 21 % соответственно. Обращает на себя внимание тот факт, что на общем тренде потепления в эпоху С (1940–1948 гг.) количество суровых зим резко возросло, что повлияло соответственно и на ледовые условия в этот период.

#### **4. Прогноз ледовых условий Северного Каспия в различные макроциркуляционные эпохи XXI века**

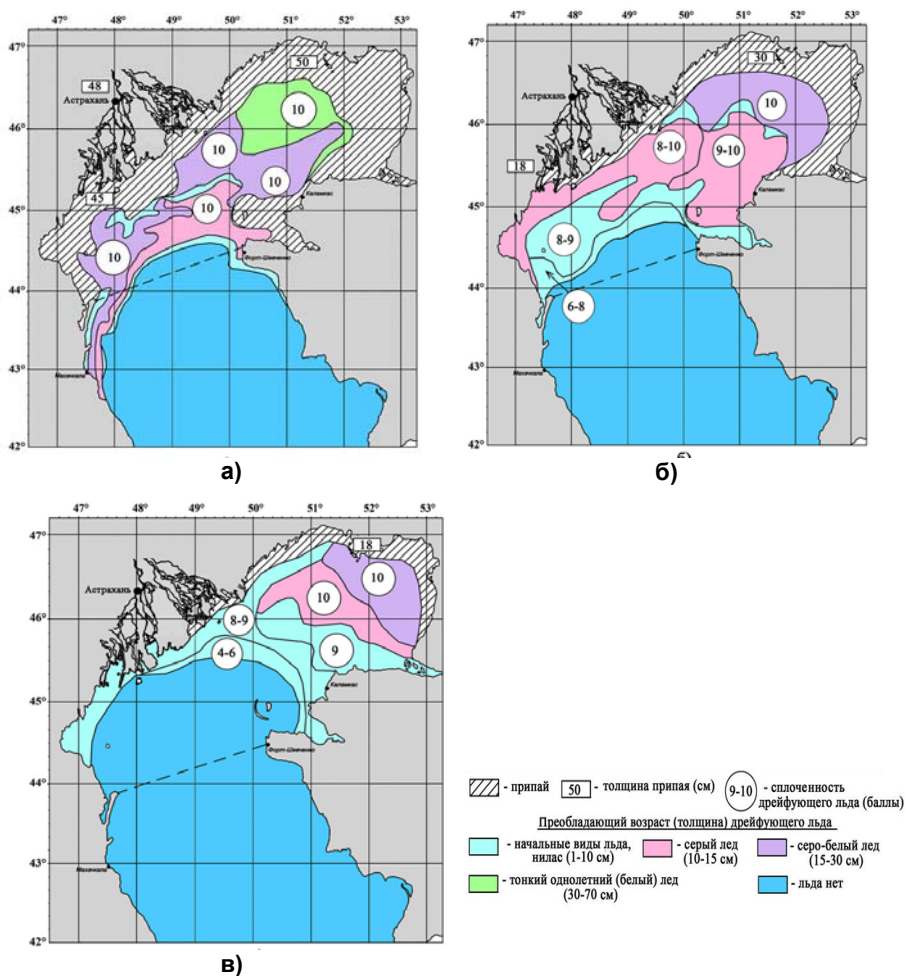
Попробуем представить, какими могут быть ледовые условия на Северном Каспии в XXI веке. Для этого осуществим расчет двумя различными способами.

**I способ** основывается на использовании линейных связей СГДМ в Астрахани с ледовыми характеристиками Северного Каспия.



Об информативности СГДМ (в плане характеристики ледовых условий) свидетельствуют коэффициенты корреляции между СГДМ и ледовыми параметрами:

- ледовитостью Каспийского моря: +0,76;
- толщиной льда в районе о. Пешной: +0,79, о. Искусственный: +0,85;
- продолжительностью ЛП у о. Пешной: +0,55 и у о. Искусственный: +0,51.



**Рис. 2.** Ледовая обстановка на Северном Каспии в феврале в характерную зиму: начала XX века, СГДМ (А) = 550 °С (а); начала XXI века, СГДМ (А) = 310 °С (б); середины XXII века СГДМ (А) = 50 °С (в).

**Fig. 2.** Ice situation in the Northern Caspian in February in a typical winter: the beginning of the XX century (the sum of degree-days of frost in Astrakhan is 550 °C) (a); the beginning of the XXI century (the sum of degree-days of frost in Astrakhan is 310 °C) (б); the middle of the XXII century (the sum of degree-days of frost in Astrakhan is 50 °C) (в).

Если предположить, что уменьшение СГДМ, характерное для перехода от эпохи W1 к эпохе W2, в той же степени (в 1,74 раза) коснулось и других типов макроциркуляционных эпох, можно рассчитать характерные значения СГДМ для аналогичных эпох в XXI веке (изменяющихся, например, в той же последовательности).

Поскольку коэффициенты корреляции между СГДМ в Астрахани и такими ледовыми характеристиками, как толщина льда и ледовитость Северного Каспия, довольно велики ( $K=0,8$ ), по корреляционным уравнениям были определены средние значения этих характеристик для различных макроциркуляционных эпох XXI век. С несколько меньшим правдоподобием (при  $K=0,5-0,6$ ) выполнен расчет по СГДМ возможной продолжительности ледового периода.

**II способ** основывается на суммировании гармоник (синусоид). В данном случае в качестве прогностического инструмента использован один из компонентов методики долгосрочного прогноза, разработанного в Гидрометцентре России. Подробное описание методики можно найти в [10, 11]. При работе над одним из компонентов прогноза было сделано предположение о том, что в пределах обширных территорий изменчивость природных явлений подвержена влиянию единых циклов (являющиеся, вероятно, результатом внешнего гравитационного воздействия). Периоды циклов определялись по ряду приземной температуры воздуха в Санкт-Петербурге, для которого имелось наибольшее число наблюдений. Разложению на гармоники подвергался 200-летний ряд отклонений СГДМ от генерального тренда. При этом генеральный тренд также описывался синусоидой, наиболее соответствующей полиномиальному тренду 2-го порядка. Всего выделена 31 синусоида. Было обращено внимание на близость периодов отдельных найденных гармоник с периодами колебания гравитационных воздействий (орбитальных периодов) Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна, а также с циклами солнечной активности. Кроме того, была доказана согласованность изменчивости сумм градусодней мороза, аппроксимированной первой (генеральной) гармоникой с периодом 1008,8 года, с палеоклиматическими представлениями [10].

Коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по суммам гармоник, и соответствующими рядами фактических значений для разных ледовых характеристик российских морей варьируют от 0,5 до 0,8. Эффективность расчета ледовых характеристик по сравнению с климатом составляет 10–25 % [11]. Для примера некоторые значимые частные коэффициенты корреляции между значениями гармоник и параметрами различных природных процессов приведены в табл. 2 (уровень значимости этих коэффициентов с учетом длины рядов наблюдений не менее 0,1). Эта таблица могла бы быть дополнена многими другими выявленными случаями связи гармоник с изменчивостью параметров природных рядов.

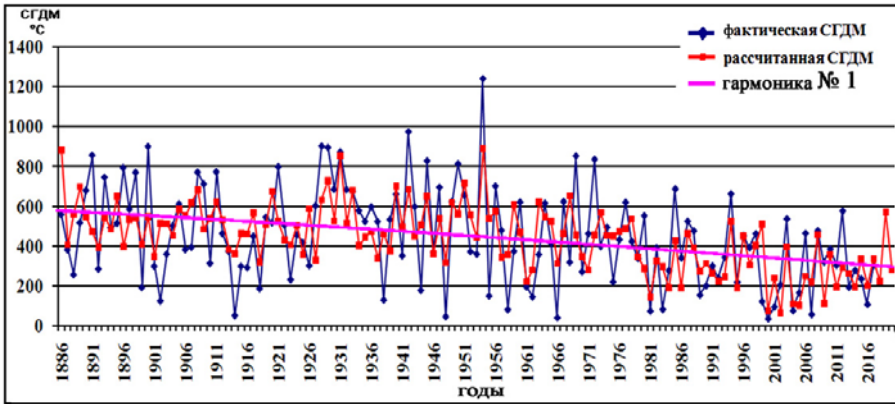
**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции между отдельными гармониками в разных частях спектра и параметрами ЦДА, СГДМ, ледовыми характеристиками Северного Каспия

**Table 2.** Coefficients of correlation between the individual harmonics and the parameters of the centers of action of the atmosphere, the sums of the degree-days of frost, the ice characteristics of the Northern Caspian

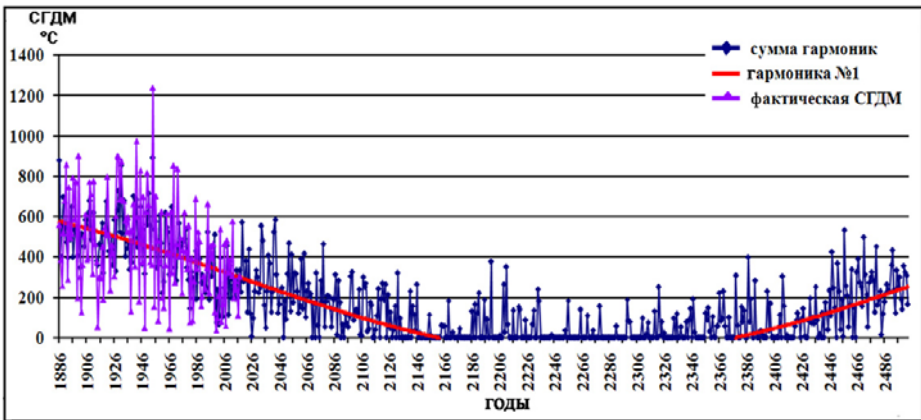
Период гармоник, годы	Характеристика (длина ряда наблюдений, годы)														
	Циркуляция в I-II			Давление в ЦДА в I-II				Сумма градусодней мороза					Лед на Каспии		
	ΔE (118)	ΔW (118)	ΔC (118)	АЗМ (109)	ИМ (132)	СМ (132)	АЛМ (132)	СПб (211)	Арх (204)	Мск (138)	А (132)	Свг (104)	МЛ (СК) (90)	ПП (П) (88)	ОО (П) (88)
1008,8				+0,26				-0,34	-0,30	-0,58	-0,34	-0,60		+0,41	-0,44
136,32	+0,18	-0,19		-0,16	+0,26	+0,15			-0,16		+0,17				
84,07	+0,25	-0,31		-0,21		+0,15					+0,16			-0,15	
21,74				-0,22	+0,29			+0,18	+0,16		-0,16		-0,25		-0,16
18,14			+0,17	-0,15			-0,23			+0,15		+0,26		-0,23	-0,35
13,56				-0,21	+0,16							+0,25	+0,19	+0,17	+0,26
11,21						+0,16				+0,21	+0,23	+0,21			
7,84					+0,20			+0,21		+0,22					-0,15
5,30						-0,21			+0,20						-0,17
4,37									+0,16		+0,16		+0,21	-0,19	
3,94						-0,16	+0,27	+0,18		+0,20			-0,17		
3,38				+0,22			-0,17	+0,17							+0,15
3,08								+0,15	+0,18	+0,21			+0,18		
2,40								+0,18	+0,20	+0,23					+0,17
2,34										+0,19	+0,22		+0,21	-0,23	+0,26
2,26	-0,26	+0,27			+0,18			+0,22	+0,15	+0,23	+0,19			-0,17	+0,25
2,03			-0,17					+0,18	+0,17	+0,16					

*Примечание.* Δt – период гармоники (синусоиды); СПб – Санкт-Петербург, Арх – Архангельск, Мск – Москва, А – Астрахань, Свг – Советская Гавань; I – январь; II – февраль. Здесь, а также в табл. 3: П – о. Пешной, И – о. Искусственный, СК – Северный Каспий.

Тот факт, что многие параметры климатической системы при достаточно большом их географическом разбросе имеют довольно сильные связи с гармониками, подтверждает высокую вероятность их закономерной обусловленности (неслучайности) и универсальности для зимнего периода. На рис. 3 а для примера показан результат аппроксимации изменчивости СГДМ в Астрахани суммой гармоник.



а)



б)

**Рис. 3.** Аппроксимация изменчивости природных процессов гармониками: гармоника № 1 для СГДМ в Астрахани и расчет СГДМ по сумме 17 гармоник за 132-летний период наблюдений (с 1886 по 2017 г.) (а); СГДМ в Астрахани, аппроксимированная суммой гармоник в XIX–XXV вв. (б).

**Fig. 3.** Approximation of variability of natural processes by harmonics: the harmonic N 1 for the sum of degree-days of frost in Astrakhan and the calculation of the sum of degree-days of frost on the sum of the 17 harmonics for the 132-year period of observations (from 1886 to 2017) (a); the sum of degree-days of frost in Astrakhan, approximated by the sum of harmonics in the XIX–XXV centuries (б).

На рис. 3 б – изменчивость СГДМ в Астрахани в XIX–XXV вв., аппроксимированная суммой гармоник. Можно видеть, что фактические данные хорошо согласуются с расчетом и с положением гармоники № 1. При этом визуально определяется период наименьших значений СГДМ и наилегчайших ледовых условий на Северном Каспии – с середины XXII века до конца XXIII века.

Прогностические данные, полученные первым способом, имеют значительные погрешности в силу использования линейных трендов, не учитывающих сложные реальные природные закономерности. Данные, полученные суммированием гармоник, имеют погрешности, связанные с недобором экстремальных значений (это можно видеть, например, на рис. 3 а). Поэтому за наиболее правдоподобные принимались средние значения для двух способов расчета. В табл. 3 показаны ожидаемые изменения параметров ледового режима Северного Каспия для различных макроциркуляционных эпох в XXI веке по сравнению с фактическими данными в XX веке.

**Таблица 3.** Ожидаемые изменения ( $\Delta$ ) параметров ледовых условий на Северном Каспии для различных макроциркуляционных эпох в XXI веке по сравнению с XX веком

**Table 3.** Expected changes ( $\Delta$ ) in the parameters of ice conditions in the Northern Caspian for different macro-circulation epochs in the XXI century compared with the twentieth century

Эпоха	W(1,2)	W+E	C	E+C	E	W(2,3)	Среднее	
Годы	0-20-е	30-е	40-е	50-е	60-80-е	90-е		
СГДМ (А), °С	XX	514	610	523	475	405	295	470
	XXI	295	322	298	266	217	155	259
	$\Delta$	219	288	225	209	188	140	211
ПОВ суровых зим, %	XX	19	45	44	24	12	4	25
	XXI	4	4	4	2	1	>1	3
	$\Delta$	15	41	40	22	11	4	22
ПОВ мягких зим, %	XX	12	10	22	23	21	46	22
	XXI	46	45	56	59	67	86	60
	$\Delta$	-34	-35	-34	-36	-46	-40	-38
МТ (П), см	XX	53	59	53	62	48	32	51
	XXI	32	40	36	34	34	25	33
	$\Delta$	21	19	17	28	14	7	18
МЛ (СК), %	XX	81	83	77	79	80	76	79
	XXI	76	77	76	74	73	71	74
	$\Delta$	5	6	1	5	7	5	5
ЛП (П), сутки	XX	н.д.	н.д.	139	151	123	114	132
	XXI	114	120	119	107	81	69	102
	$\Delta$	н.д.	н.д.	20	43	42	45	30

*Примечание.* W(1,2) – изменения, происшедшие между эпохами W1 и W2; W(2,3) – изменения, предполагаемые между эпохами W2 и W3; W3 – эпоха W конца XXI века; ПОВ – повторяемость.

Анализ табл. 3 показывает, что на фоне длительного повышения зимних температур воздуха при смене смежных макроциркуляционных эпох ожидаются некоторые отклонения от основного линейного тренда, связанного с потеплением, в ту или иную сторону.

По сравнению с существенными изменениями большинства ледовых параметров для аналогичных макроциркуляционных эпох при переходе от XX к XXI веку наименее заметны изменения ледовитости Северного Каспия, поскольку его акватория находится в основном в пределах глубин менее 20 м, выхолаживание воды происходит быстро, а ледообразование охватывает большие площади при небольшом накоплении СГДМ: как показывает рис. 2 в и табл. 3, лишь при условии, что СГДМ в Астрахани менее 200 °С, ледовитость Северного Каспия приближается к 70 %; при более высоких значениях СГДМ средняя по эпохе ледовитость на момент максимального развития ледяного покрова меняется в пределах 73–76 %.

При малой изменчивости параметра ледовитости, тем не менее, сильно меняется состав льдов дрейфующего ледяного покрова в зависимости от СГДМ: так для начала XX века характерным являлось наличие хорошо развитой зоны тонкого однолетнего льда толщиной более 30 см на севере моря; для начала XXI века преобладающими возрастными видами льда являются серый и серо-белый лед толщиной 10–30 см; а в первой половине XXII века ожидается преобладание ниласа и серого льда толщиной 5–15 см и резкое сокращение ледовитости моря.

### Выводы

На фоне длительного повышения температуры воздуха в Астрахани, которое предположительно (при сохранении существующих тенденций) может смениться похолоданием не ранее, чем в XXIII веке, в одинаковые по индексу макроциркуляционные эпохи на Северном Каспии будут наблюдаться различные температурные и ледовые условия. Это показал анализ дважды наблюдавшихся (в XX – начале XXI века) эпох W, в результате которого было выявлено, что во вторую эпоху W2 сумма градусо-сутки мороза в Астрахани, ледовитость Северного Каспия и толщина льда в среднем значительно меньше, чем в первую эпоху W1.

При этом характерные показатели приземного давления во всех ЦДА для первой и второй эпох W были близки по своим средним значениям, за исключением Азорского максимума, для которого давление во втором случае оказалось существенно выше. Исследование показало, что из четырех центров действия атмосферы именно усиление Азорского максимума оказывает наибольшее влияние как на увеличение повторяемости циркуляции формы W, так и на уменьшение повторяемости суровых зим на Северном Каспии.

При переходах от одного вида макроциркуляционной эпохи к другому происходят следующие изменения температурных и ледовых условий:

– при переходе от эпохи W к ближайшей эпохе С увеличивается СГДМ в Астрахани, в 2 раза и более возрастает повторяемость суровых зим, на 5–6 дней увеличивается продолжительность ледового периода, на 3–4 см – средняя толщина льда у о. Пешной;

– при переходе от эпохи С к ближайшей эпохе Е снижается СГДМ в Астрахани, в 3 раза по сравнению с эпохой С уменьшается повторяемость суровых зим, на 2–3 недели и более – ледовый период; на 3–5 см – средняя толщина льда у о. Пешной;

– при переходе от эпохи Е к ближайшей эпохе W существенно (примерно в 1,4 раза относительно эпохи Е и почти в 2 раза относительно эпохи С) уменьшается СГДМ в Астрахани; резко снижается повторяемость суровых зим; толщина льда в районе о. Пешной уменьшается на 7–10 см, продолжительность ледового периода – на 1–1,5 недели.

Для многолетней изменчивости повторяемости различных форм АЦ характерны циклические закономерности, при этом процессы формы С наиболее пассивны и получают свое развитие тогда, когда приближаются к нулю отклонения от нормы повторяемостей форм W и Е.

Сопоставление данных о сезонной повторяемости форм АЦ с данными о суровости зим показали, что для Северного Каспия (а также для Азовского моря) самая суровая за весь период наблюдений зима 1953/1954 гг. сопровождалась повышенной повторяемостью формы Е (несмотря на то, что наибольшая повторяемость суровых зим на Каспии приходится на эпоху С). При этом в экстремально суровые зимы на Белом море (1965/1966 гг.) и на Балтике (1941/1942 гг.) наблюдалась повышенная повторяемость формы С.

Полный цикл прохождения смены основных форм циркуляции в последовательности W→С→Е совершается примерно за 84 года (т. е. за период, близкий к орбитальному периоду Урана, равному 84,02 года). Этот же период имеет циклическая составляющая изменчивости давления в Азорском максимуме.

Анализ и расчеты, сделанные для повторяющихся эпох W, показали, что для эпохи W3, ожидаемой в конце XXI века, возможно уменьшение среднего значения СГДМ до 155 °С (что на 140 °С меньше, чем в современную эпоху W2), увеличение повторяемости мягких зим до 86 % (что на 40 % больше, чем в эпоху W2), уменьшение средней толщины льда в районе о. Пешной до 25 см (что на 7 см меньше, чем в эпоху W2), сокращение среднего ледового периода до 69 дней (на 46 дней по сравнению с нынешними показателями). В это же время вероятно уменьшение до 70 % средней ледовитости моря на момент максимального развития ледяного покрова с уменьшением толщины дрейфующего льда до 5–10 см.

## Список литературы

1. *Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С.* Оперативное океанографическое обслуживание. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 286 с.
2. *Абузяров З.К., Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И.* Морские прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 20 с.
3. *Вангенгейм Г.Я.* Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // Труды ААНИИ. 1952. Т. 34. С. 3-14.
4. *Водный баланс* и колебания уровня Каспийского моря, моделирование и прогноз. М.: Триада лтд, 2016. 379 с.
5. *Географический атлас.* М.: Главное управление геодезии и картографии при СМ СССР, 1982. 238 с.
6. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Том 6. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 360 с.
7. *Гидрометеорологические условия* шельфовой зоны морей СССР. Том 2. Каспийское море. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 268 с.
8. *Гирс А.А.* Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 487 с.
9. *Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г. и др.* Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 348 с.
10. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей европейской части России. М.: ИГ-СОЦИН, 2014. 508 с.
11. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий в Баренцевом море, Финском заливе и в северной части Каспийского моря, основанный на использовании статистического моделирования // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2015. Информационный сборник № 42. С. 111-128.

## References

1. *Abuzyarov Z.K., Dumanskaya I.O., Nesterov E.S.* Operativnoe okeanograficheskoe obsluzhivanie. Obninsk: IG-SOCIN publ., 2009, 286 p. [in Russ.].
2. *Abuzyarov Z.K., Kudryavaya K.I., Seryakov E.I., Skriptunova L.I.* *Morskie prognozy* [Marine Forecasting]. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1988, 20 p. [in Russ.].
3. *Vangengeim G.Ya.* Osnovy makrocirkulyacionnogo metoda dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov dlya Arktiki. *Trudy AANII*, 1952, vol. 34, pp. 3-14. [in Russ.].
4. *Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea.* Modeling and prediction. Moscow: Triada ltd publ., 2016, 379 p. [in Russ.].
5. *Geograficheskii atlas* [Geographical Atlas]. Moscow: Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri SM SSSR, 1982, 238 p. [in Russ.].
6. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR.* Vol. 6. Kaspiyskoe more. Part. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 1992, 360 p. [in Russ.].
7. *Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoy zony morey SSSR.* Vol. 2. Kaspiyskoe more. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1986, 268 p. [in Russ.].



8. Girs A.A. *Makrocirkulyacionnyi metod dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov*. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1974, 487 p. [in Russ.].

9. Gudkovich Z.M., Kirillov A.A., Kovalev E.G. *et al.* *Osnovy metodiki dolgosrochnykh ledovykh prognozov dlya arkticheskikh morey*. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1972, 348 p. [in Russ.].

10. Dumanskaya I.O. *Ledovye usloviya morey evropeyskoy chasti Rossii*. [Ice conditions of the seas of the European part of Russia]. Moscow: IG-SOCIN, 2014, 508 p. [in Russ.].

11. Dumanskaya I.O. *Metod dolgosrochnogo prognoza ledovykh usloviy v Barentevom more, Finskom zalive i v severnoy chasti Kaspiyskogo morya, osnovanny na ispol'zovanii statisticheskogo modelirovaniya. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. 2015, Informacionnyy sbornik No. 42, pp.111-128. [in Russ.].

*Поступила в редакцию 15.08.2018 г.*

*Received by the editor 15.08.2018.*