

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА АЗОВСКОГО МОРЯ

А.Е. Букатов, Е.А. Моисеева

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

На основе данных о характеристиках ледовых явлений за период 1893-1994 гг. проведено исследование изменчивости ледового режима Азовского моря. Рассмотрены статистические связи характеристик ледового режима с индексами Северо-Атлантического и Восточно-Атлантического колебаний.

Введение. Исследование изменчивости ледового режима Азовского моря имеет большое значение для планирования и наиболее рациональной организации хозяйственной деятельности. Ледовые условия определяют навигацию в холодный период года. Смещение сроков ледовых явлений оказывает влияние на биологические циклы в экосистемах, что отражается в свою очередь на рыбопродуктивности. Кроме того, лед накапливает загрязняющие вещества, способствует их миграции и перераспределению. Поэтому сбор всей доступной информации о характеристиках ледового режима и исследование факторов влияющих на его изменчивость необходимы для прогнозирования ледовых условий и являются актуальной задачей. К вопросам исследования ледового режима Азовского моря обращались многие авторы [1-5]. В [3] рассматриваются основные характеристики ледовых процессов и тенденции их многолетней изменчивости. Результаты исследования современного состояния ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе на базе спутниковой информации за последние 15 лет представлены в работе [4].

Особое значение в последнее время приобрел вывод о том, что климатические условия на Земле меняются достаточно быстро как в глобальном масштабе, так и на уровне отдельных регионов. Поэтому представляет интерес исследование взаимосвязи многолетней изменчивости ледовых условий Азовского моря с различными факторами, определяющими изменение климата в современный период. Динамика атмосфер-

ной циркуляции является одним из естественных факторов колебания климата. В работе [6] рассмотрена взаимосвязь между формами атмосферной циркуляции по Вангенгейму-Гирсу и повторяемостью суровых и мягких зим на Азовском море за 1886-2005 гг. К индикаторам климатической изменчивости, отражающим крупномасштабные процессы в системе океан-атмосфера для большинства стран Европы, относят климатические индексы Северо-Атлантического (NAO) [7-10] и Восточно-Атлантического (EA) колебаний [9]. В работе [10] отмечено, что статистически значимые величины коэффициентов корреляции между изменениями среднемесячных значений индекса NAO и колебаниями температуры воздуха в районе Азовского моря положительны. Таким образом, увеличение значений индекса NAO соответствует повышению температуры в регионе. В свою очередь температура воздуха является определяющим фактором интенсивности ледовых процессов региона.

Целью настоящей работы является исследование изменчивости ледового режима Азовского моря и анализ статистических связей характеристик ледового режима с климатическими индексами NAO и EA.

Материалы и методика. Для исследования использованы материалы натурных данных о характеристиках основных элементов ледового режима, полученных на береговых станциях Азовского моря за 1893-1994 гг. Схема расположения станций представлена на рисунке 1, периоды наблюдений для выбранных станций указаны в таблице 1.

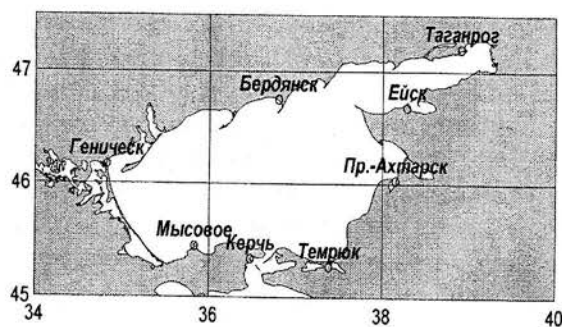


Рисунок 1 – Схема расположения станций

На основе полученных данных описаны основные закономерности ледового режима моря. Рассмотрены среднесезонные сроки наступления основных ледовых явлений

(фиксируемых ледовых событий, отражающих этапы (стадии) ледовых процессов). Рассчитаны среднесуточные характеристики ледового режима: продолжительность ледового сезона (период, начиная с даты первого ледообразования и кончая днем, предшествующим дате окончательного очищения [11]), число очищений за зиму и максимальная толщина припайного льда. Проведен анализ многолетней изменчивости ледовых условий моря. Найдены линейные тренды временных рядов сроков первого ледообразования, окончательного очищения моря ото льда и продолжительности ледового сезона. Для определения статистической значимости трендов рассчитаны коэффициенты детерминации (R), определяющие вклад тренда в общую дисперсию ряда. Оценка тренда считается значимой, если $R \geq t / \sqrt{n - 2 + t^2}$, где n – длина ряда, t – параметр Стьюдента [12].

Таблица 1 – Периоды наблюдений

Станция	Период
Таганрог	1893–1994 гг.
Геничеськ (лиман)	1893–1994 гг.
Ейск (залив)	1916–1994 гг.
Пр.-Ахтарск	1916–1994 гг.
Темрюк (глухой канал)	1922–1994 гг.
Бердянск	1923–1994 гг.
Керчь	1924–1994 гг.
Мысовое	1926–1994 гг.

В работе также использованы среднесуточные данные [13] по температуре воздуха на станции Геничеськ за период 1884–2005 гг. и массив среднемесячных данных по температуре на прибрежных станциях моря за 1924–1994 гг. [13]. В среднесуточные данные введены поправки, устраняющие неоднородность ряда вследствие различия сроков наблюдений в сутки в разные годы, в соответствии с рекомендациями, приведенными в [14]. Среднемесячные данные также содержат поправки устраняющие неоднородность рядов. Процедуры контроля их качества описаны в работе [15]. Для исследования статистических связей между характеристиками ледового режима на различных станциях и динамикой атмосферной циркуляции использован архив индексов NAO (NCAR) [16], EA (NCAR/CPC) [17]. Известно, что ледовый режим Азов-

ского моря хорошо согласуется с суммами градусодней мороза в регионе (суммами среднесуточных отрицательных температур воздуха). Суммы температур в умеренные зимы составляют 200–400°C, в мягкие зимы $\leq 200^\circ\text{C}$, в суровые $\geq 400^\circ\text{C}$ [3–5]. По этому критерию выполнена типизация зим за 1884–2005 гг. на суровые, умеренные и мягкие на основе данных для Геничеська. Рассчитана повторяемость данных типов зим в регионе для различных периодов.

На основе корреляционного анализа выявлены статистические связи изменений ледовых условий с колебаниями температуры воздуха в регионе и климатическими индексами NAO, EA. Также проведен взаимный спектральный анализ колебаний индекса NAO и ледовых характеристик (максимальной толщины припайного льда и продолжительности ледового сезона). С целью достижения стационарности рассматриваемых рядов перед анализом удалены их средние составляющие и линейные тренды [12]. Чтобы убрать случайный шум в периодограмме, проведено сглаживание данных окном Хемминга [18] (ширина окна скользящего среднего принята равной 5).

Анализ результатов. Повторяемость умеренных зим в районе Азовского моря за период 1884–2005 гг. составила 43%, мягких – 36%, суровых – 21%. Современное повышение температуры воздуха в исследуемом регионе, наиболее выраженное зимой и в первой половине весны [10], проявилось в изменении суровости зим. Количество мягких зим заметно возросло, суровых зим стало значительно меньше. За период 1975–2005 гг. повторяемость умеренных зим составила 42%, мягких – 48%, суровых – 10%. Непостоянство ледовых условий в зависимости от суровости зим является основной особенностью ледового режима Азовского моря.

Лед на Азовском море образуется ежегодно. Ледостав продолжается в течение 2–5,5 месяцев. В таблице 2 приведены среднесуточные даты наступления ледовых явлений для береговых станций моря. Ледообразование в Азовском море по среднесуточным данным начинается в Таганрогском заливе в конце ноября. На северо-востоке моря диапазон дат появления начальных форм льда колеблется от середины октября до середины января в зависимости от степени суровости зим. На-

чальные виды льда в прибрежных пунктах на западе и востоке Азовского моря в среднем за многолетний период появляются в декабре. Многолетний диапазон дат первого ледообразования в этих районах составляет 3,5 месяца. Самое раннее первое ледообразование отмечается в начале ноября, самое позднее – в середине февраля. В южных районах моря лед появляется значительно позже, что объясняется непосредственной близостью Черного моря, из которого в пролив проникают относительно теплые черноморские воды. Появление начальных видов льда в среднем отмечается в первой половине января. Самое раннее появление начальных видов льда в южной части моря возможно в конце ноября, самое позднее отмечается в начале марта. В отдельные мягкие и умеренные зимы на станциях, расположенных в южной части Азовского моря, явления ледообразования не наблюдаются.

Окончательное очищение моря ото льда в среднем происходит в марте. Очищение моря начинается с юго-восточных районов. Затем очищается южная и юго-западная часть, куда под влиянием господствующих северо-восточных ветров выносятся льды из других районов моря. В мягкие зимы

окончательное очищение в этих районах возможно во второй половине января. В суровые зимы очищение происходит в конце апреля – начале мая. Последней ото льда освобождается вершина Таганрогского залива, которая характеризуется более суровыми климатическими условиями. Здесь в мягкие зимы очищение наблюдается в конце февраля. Самое позднее очищение залива ото льда по среднемноголетним данным происходит в конце апреля.

Среднемноголетняя продолжительность ледового сезона, максимальная толщина льда, а также среднее число очищений за зиму представлены в таблице 3. Продолжительность ледового сезона зависит от района моря. В вершине Таганрогского залива средняя продолжительность ледового периода составляет 122 дня. В южных районах моря – 61 день. Наибольшей толщины ледяной покров в среднем достигает в первой половине февраля. В Таганрогском заливе образуется наиболее мощный практически пресный лед, его среднемноголетняя максимальная толщина составляет 42 см. В южной части моря средняя максимальная толщина льда – 21–26 см. Следует отметить, что в суровые зимы толщина льда может достигать 80 см в Таганрогском заливе

Таблица 2 – Среднемноголетние даты наступления ледовых явлений на Азовском море

Станция Ледовые явления	Таганрог	Бердянск	Геничск	Ейск	Пр.-Ахтарск	Керчь	Темрюк	Мысовое
	Средние даты							
Первое ледообразование	26.11	17.12	10.12	11.12	04.12	07.01	28.12	11.01
Первое образование заберега или припая	11.12	30.12	13.12	16.12	21.12	10.01	31.12	13.01
Начало устойчивого ледообразования	10.12	26.12	27.12	26.12	23.12	12.01	02.01	15.01
Первое полное замерзание	18.12	05.01	06.01	24.12	27.12	17.01	06.01	23.01
Начало образования устойчивого припая	22.12	03.01	01.01	01.01	28.12	20.01	31.12	19.01
Окончательное замерзание	28.12	16.01	05.01	06.01	04.01	29.01	10.01	08.02
Начало взлома/первая подвижка припая	–	–	13.03	03.03	03.03	–	–	–
Окончательное разрушение припая	18.03	08.03	13.03	14.03	07.03	25.02	28.02	04.03
Окончательное очищение ото льда	28.03	18.03	26.03	20.03	16.03	09.03	04.03	24.03

Таблица 3 – Среднемноголетние характеристики ледового режима Азовского моря

Станция Характеристика	Таганрог	Бердянск	Геничск	Ейск	Пр.-Ахтарск	Керчь	Темрюк	Мысовое
	Среднее число, величина							
Число очищений за зиму	2	4	3	4	4	6	3	3
Продолжительность ледового сезона, дни	122	91	106	100	101	61	67	72
Максимальная толщина льда, см	42	30	29	37	27	21	26	24

и 44 см в южных районах моря (Керчь).

Так как глубина моря невелика, то и теплосодержание незначительно. Поэтому неустойчивость ледового режима, основными чертами которого являются неоднократные вскрытия и замерзания, а также непостоянство фаз ледовых явлений, в основном обусловлена сменой погодных условий. В ледовый сезон возможно неоднократное появление и исчезновение льда. Число очищений за зиму в среднем составляет от 2 раз на северо-востоке до 6 на юге.

Анализ изменчивости ледовых условий района за 1924–1994 гг. показал, что прослеживается слабая тенденция к более позднему появлению начальных форм льда, в основном, в южных районах моря. Сдвиг сроков максимально для станции Керчь, тренд достигает 13 дней за 70 лет. В Геническе, Таганроге и Ейске наблюдается противоположная тенденция, ледообразование смещается на более ранние сроки. Однако изменения в датах первого ледообразования не велики, и для всех станций оценки трендов не являются статистически значимыми. Окончательное очищение моря ото льда по большинству пунктов стало отмечаться раньше. Значимый тренд сроков окончательного очищения составил $-15 \div -18$ дней за 70 лет (с максимумом по абсолютной величине для станции Ейск). Таким образом, за многолетний период продолжительность ледового сезона в Азовском море

сократилась (за исключением района Геническа). Значимый тренд составил $-19 \div -28$ дней за 70 лет. Сокращение продолжительности ледового сезона наиболее заметно в районах Керчи, Бердянска и Ейска. Межгодовая изменчивость сроков окончательного очищения моря и продолжительности ледового сезона для станции Таганрог представлена на рисунке 2а, 2б.

По результатам корреляционного анализа можно заключить, что внутривековые изменения индексов NAO и EA (рис. 2в, 2г) в холодный период года согласуются с динамикой ледового режима Азовского моря. Коэффициенты корреляции между индексами NAO, EA за декабрь–март и датами окончательного очищения моря ото льда для всех станций отрицательны (табл.4). За период 1924–1994 гг. наибольший коэффициент корреляции с индексами NAO получен для станции Геническ ($r=-0,36$, $p=99\%$). Коэффициент корреляции с индексами EA максимален для Приморско-Ахтарска ($r=-0,47$, $p=99\%$).

Связи между продолжительностью ледового сезона, максимальной толщиной припайного льда и рассматриваемыми индексами также отрицательные, и наиболее заметные для станций северо-восточного побережья моря. Коэффициент корреляции между продолжительностью ледового сезона и индексами NAO максимальный для Таганрога ($r=-0,33$, $p=99\%$). Корреляционная

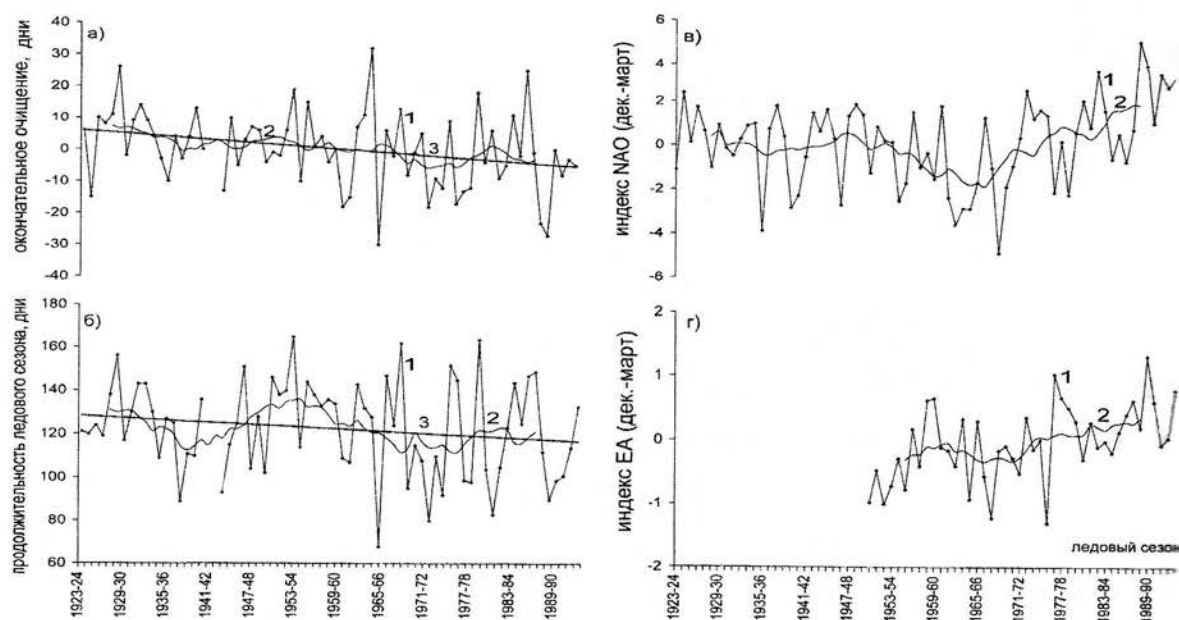


Рисунок 2 – Межгодовая изменчивость продолжительности ледового сезона, сроков окончательного очищения моря ото льда для станции Таганрог, и индексов NAO, EA за холодный период года (1), 11-летнее скользящее среднее (2), линейный тренд (3)

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции характеристик ледового режима с индексами NAO, EA и температурой воздуха за декабрь–март

	Таганрог	Бердянск	Геничеськ	Ейск	Пр.-Ахтарск	Керчь	Темрюк	Мысовое
Окончательное очищение ото льда								
NAO	-0,31	-0,32	-0,36	-0,17	-0,31	-0,30	-0,14	-0,31
EA	-0,44	-0,38	-0,24	-0,40	-0,47	-0,26	-0,30	-0,15
T_v	-0,67	-0,61	-0,53	-0,74	-0,56	-0,53	-0,59	-0,45
Продолжительность ледового сезона								
NAO	-0,33	-0,19	-0,19	-0,09	-0,24	-0,25	-0,10	-0,18
EA	-0,31	-0,18	-0,03	-0,19	-0,27	0,01	0,04	0,03
T_v	-0,51	-0,62	-0,51	-0,65	-0,54	-0,41	-0,48	-0,35
Максимальная толщина льда								
NAO	-0,21	-0,32	-0,30	-0,45	-0,14	-0,30	–	-0,17
EA	-0,22	-0,28	-0,23	-0,40	-0,03	-0,21	–	0,05
T_v	-0,54	-0,54	-0,40	-0,53	-0,49	0,00	–	-0,19

Примечание. Жирным шрифтом отмечены оценки значимые на 90% и выше уровне

оценка степени влияния индексов EA на продолжительность ледового сезона наибольшая также для станции Таганрог ($r=-0,31$, $p=99\%$). Наиболее тесные связи между максимальной толщиной льда и индексами NAO, EA отмечены для Ейска, коэффициенты корреляции равны -0,45 и -0,40 ($p=99\%$) соответственно. Таким образом, увеличение значений индексов NAO, EA в холодный период года соответствует более раннему очищению моря ото льда, сокращению ледового сезона и уменьшению максимальной толщины льда.

В то же время хорошо заметна согласованность колебаний температуры воздуха в регионе с динамикой ледовых условий (табл.4). За период 1924–1994 гг. корреляционные оценки значимы для всех станций, исключая коэффициенты корреляции между температурой воздуха и максимальной толщиной льда в южных районах моря. Наибольшие коэффициенты корреляции получены для станций северо-восточного побережья моря. Для Ейска коэффициент корреляции сроков окончательного очищения моря ото льда с колебаниями температуры воздуха составляет -0,74 ($p=99\%$).

Известно, что влияние NAO на климатические условия Европейского региона заметно усилилось в конце прошлого столетия [7]. Отмеченная закономерность прослеживается и во взаимосвязи внутривековой изменчивости NAO и динамики ледового режима Азовского моря. Это усиление вероятно связано как с положительным

трендом индексов NAO с начала 70-х годов. XX века [8], так и с интенсификацией в этот период глобального повышения температуры воздуха. На рисунке 3 представлена изменчивость коэффициентов корреляции сроков окончательного очищения моря ото льда и индексов NAO по скользящим 30-летним периодам с шагом сдвига 1 год. Для станций, расположенных в южной части Азовского моря связь наиболее тесная в 1946–1975 гг. Коэффициент корреляции для станции Мысовое составил -0,49 ($p=99\%$). Для остальных станций корреляционные оценки наибольшие для периода 1963–1992 гг. с максимумом по абсолютной величине коэффициента корреляции для Бердянска ($r=-0,47$, $p=99\%$). Аналогичные тенденции отмечены в изменчивости коэффициентов корреляции между колебаниями других характеристик ледового режима (продолжительности ледового сезона, максимальной толщины льда) и индекса NAO.

Спектральный анализ подтверждает наличие влияния изменчивости индекса NAO на ледовый режим Азовского моря. На рисунке 4 показаны спектральные характеристики колебаний индекса NAO и максимальной толщины припайного льда на станции Таганрог, полученные на основе данных за 1924–1994 гг. Погрешность расчета оценок спектральной плотности составляет 5% при максимальном временном сдвиге $\tau=21$ год. Из рисунка 4б видно, что основной вклад в общую дисперсию максимальной толщины льда вносят колебания

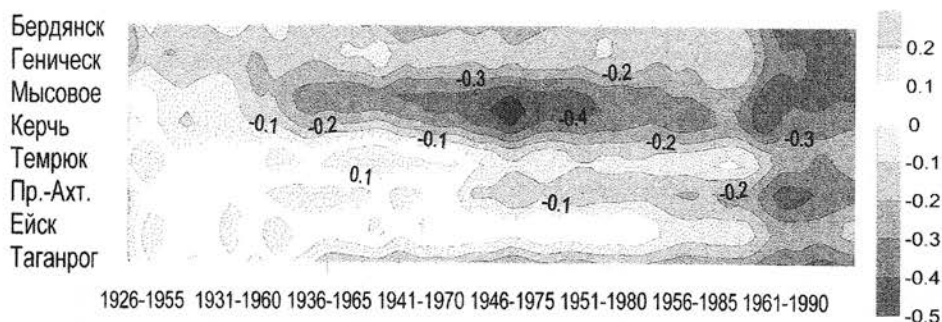


Рисунок 3 – Изменчивость коэффициентов корреляции сроков окончательного очищения моря и индекса NAO по скользящим 30-летним периодам с шагом сдвига 1 год

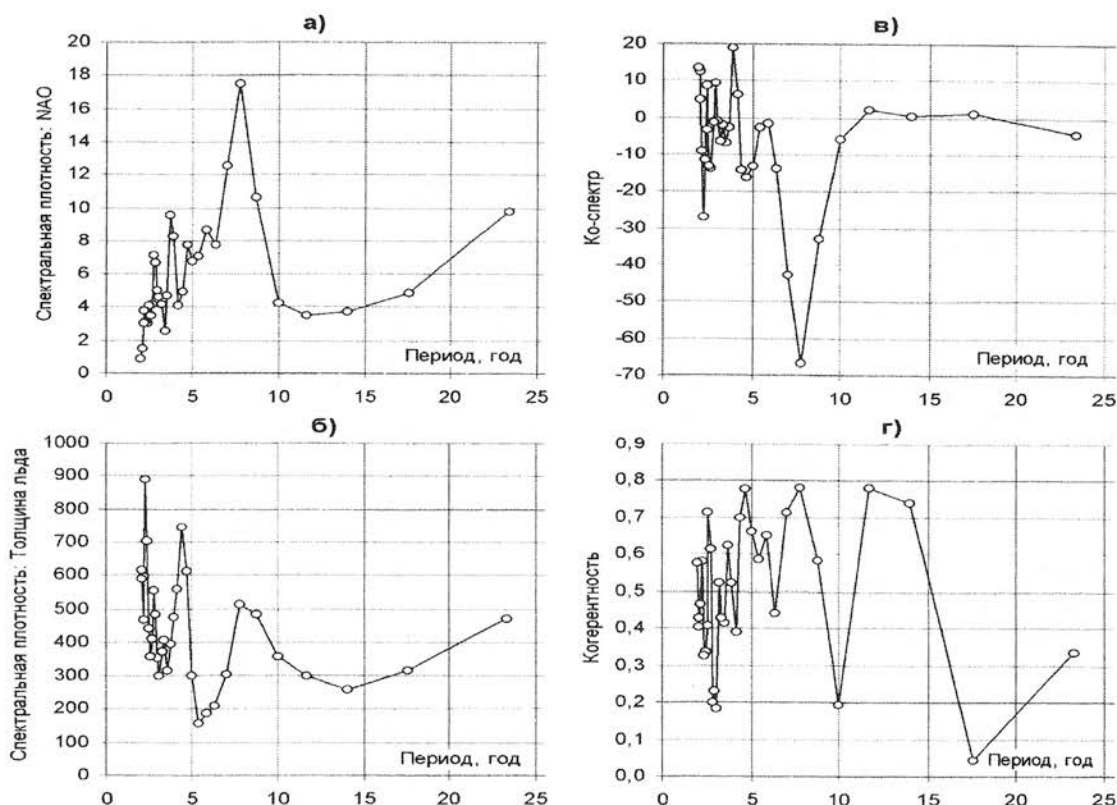


Рисунок 4 – Спектральные характеристики колебаний индекса NAO и максимальной толщины льда

с характерным периодом $2 \div 2.5$ года. Также в спектре толщины льда обнаружен пик спектральной плотности на периоде 7.8 лет. Известно, что приблизительно такой же период имеет место в вариациях индекса NAO в зимне-весенний период (рис. 4а) [19]. Взаимная связь между отдельными гармониками анализируемых рядов иллюстрируется ко-спектром (рис. 4в). Когерентность для периода 7.8 лет превышает 95 % уровень значимости (рис. 4г). Сдвиг фаз составляет 154° . В ко-спектре индекса NAO и продолжительности ледового сезона также прослеживается спектральный пик на рас-

сматриваемом периоде, и связь является значимой.

Заключение. По материалам натурных данных о характеристиках ледовых явлений за 1893–1994 гг., полученных на береговых станциях, проведено исследование изменчивости ледового режима Азовского моря. Рассмотрены статистические связи характеристик ледового режима моря с индексами Северо-Атлантического (NAO) и Восточно-Атлантического (ЕА) колебаний.

Современное повышение температуры воздуха в исследуемом регионе, наиболее выраженное зимой и в первой половине весны, проявилось в изменении суровости

зим. Количество мягких зим заметно возросло, суровых зим стало значительно меньше. Изменения в датах первого ледообразования не велики, и для всех станций оценки трендов не являются статистически значимыми. Полное окончательное очищение моря ото льда по большинству пунктов стало отмечаться раньше. Значимый тренд сроков окончательного очищения составил $-15 \div -18$ дней за 70 лет. Вместе с тем сократилась продолжительность ледового сезона. Значимый тренд составил $-19 \div -28$ дней за 70 лет. Сокращение продолжительности ледового сезона наиболее заметно в районах Керчи, Бердянска и Ейска.

Внутривековые изменения индексов NAO и EA в холодный период года согласуются с динамикой ледового режима Азовского моря. При этом соответствующие коэффициенты корреляции отрицательны: увеличение индексов NAO, EA в холодный период года соответствует более раннему очищению моря ото льда и сокращению ледового сезона. В то же время хорошо заметна согласованность колебаний температуры воздуха в регионе с изменчивостью ледовых условий. Корреляционные оценки отрицательны и значимы для всех станций. Спектральный анализ подтверждает наличие влияния изменчивости индексов NAO на ледовый режим моря. В спектре ледовых характеристик обнаруженный значимый пик на периоде 7.8 лет соответствует типичному периоду NAO. В 60–90 гг. XX века влияние NAO на динамику ледового режима региона усилилось.

Л и т е р а т у р а

1. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. – Л.: Гидрометеоиздат. 1962. – 270 с.
2. Справочник по гидрологическому режиму морей и устьев рек СССР // Киев. – Т.3, Азовское море, вып.1. Прибрежная зона моря. 1970. – С. 24–49.
3. Гоптарев Н.П., Таран Б.М. Ледовые условия. // В кн.: Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 5, Азовское море. С.–Пб.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 59–73.
4. Боровская Р.В., Ломакин П.Д., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О. Современное состояние ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе на базе спутниковой информации. Препринт. – Севастополь: МГИ НАНУ. 2008. – 42 с.
5. Фомичева Л.А. Льды в Азовском море // Труды ГОИН. 1986, вып. 168. – С. 3–10.
6. Думанская И.О., Федоренко А.В. Анализ связи ледовых характеристик неарктических морей европейской части России с макроциркуляционными атмосферными процессами. // Метеорология и гидрология. 2008. – № 12. – С. 82–95.
7. Зверяев И.И., Гулёв С.К. Сезонность и нестационарность изменчивости Европейского климата в двадцатом веке // Доклады Академии Наук. 2007. – т. 416, № 5. – С. 676–679.
8. Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation // Science. 1995. – Vol. 269. – P. 676–679.
9. Barnston, A. G., and R. E. Livezey. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. // Mon. Wea. Rev., 1987. – 115. – P. 1083–1126.
10. Букатов А.Е., Бабий М.В., Моисеева Е.А. Климатическая изменчивость температуры воздуха, количества осадков и режима облачности в районе Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАНУ. 2009. – вып.18. – С. 168–179.
11. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. – Л.: Гидрометеоиздат. 1984. – Вып.9. Часть 1. – 311 с.
12. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. – М.: Изд. МГУ. 1988. – 248 с.
13. <http://www.meteo.ru/>
14. Справочник по климату СССР. – Л.: Гидрометеоиздат. 1967. – Вып. 10. Часть II. – 607 с.
15. Peterson, T.C., R. Vose, R. Schmoyer, and V. Razuvaev. Global Historical Climatology Network (GHCN) quality control of monthly temperature data // International Journal of Climatology. 1998. – 18 (11). – P. 1169–1179.
16. <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html>
17. <http://www.cpc.noaa.gov/data/teledoc/>
18. Blackman R.B. and Tukey J.W. The measurement of power spectra from the point of view of communication engineering // Dover Publications. 1958. – 190 p.
19. Полонский А.Б., Семилетова Е.П. О статистических характеристиках североатлантического колебания // Морской гидрофизический журнал. – Севастополь. 2002. – №3. – С. 28–42.