

МНОГОЛЕТНИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ АНОМАЛИЙ ПО АКВАТОРИИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ В ТЕЧЕНИЕ 1930–2000 гг.

А.Г.ЕГОРОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Исследованы особенности сочетания знаков аномалии ледовитости между арктическими морями. Учет крупномасштабного распределения ледовых аномалий способствует углублению анализа многолетней изменчивости ледовых условий. Чередование периодов преобладания ледовой оппозитии и ледовой однородности позволяет прогнозировать очередное циклическое увеличение ледовитости в течение 2010–2030 гг.

1. Любой вид экономической деятельности в Арктике и арктических морях имеет естественное своеобразие, связанное с наличием ледяного покрова, который, как никакая другая природная среда, накладывает серьезные ограничения на затратность, эффективность и безопасность проведения морских работ. Как следствие, потенциально возможный рост деловой активности в Арктике и в арктических морях предъявляет повышенные требования к мониторингу, диагностике и прогнозу состояния ледяного покрова как основного природного элемента, лимитирующего экологическую безопасность и экономическую эффективность хозяйственной деятельности. При этом пространственные особенности в распределении морских льдов являются коренным свойством ледяного покрова, которые, собственно, и осложняют (или упрощают) проведение любых морских операций в арктических акваториях, а ледовое прогнозирование (прежде всего, долгосрочное) позволяет принимать ответственные и мотивированные управленческие решения. При исследовании многолетней изменчивости ледяного покрова обычно используют обобщенные количественные показатели, такие, как ледовитость, и меньше внимания уделяют пространственным особенностям распределения наблюдаемых аномалий. Цель настоящего сообщения заключается в том, чтобы показать эвристический потенциал использования такого показателя, как сочетание аномалий между западными и восточными арктическими морями России, для расширения и углубления представлений о многолетней изменчивости морской криосферы [3].

Наиболее важной особенностью многолетней изменчивости гидрометеорологических условий высоких и умеренных широт в XX и начале XXI века является чередование длительных периодов потепления и похолодания, расширения и сокращения площади ледяного покрова [5]. Относительно будущего состояния природной системы наиболее распространенной является точка зрения об антропогенной обусловленности климата и однонаправленной тенденции его изменения в течение XXI столетия. Считается, что наблюдающееся в течение последних 40–50 лет потепление большей частью обусловлено повышением концентрации парниковых газов [9]. Следствием является вывод о том, что в Арктике повышение температуры воздуха к 2100 г. составит от 4 °С до 7 °С, вдвое уменьшится площадь арктических льдов [8]. Основная предпосылка антропогенных сценариев заключается в том, что

наблюдающаяся тенденция изменений от 1960–1970 гг. к 1990–2000 гг. принимается за единственно возможный вариант трансформаций и автоматически продлевается на весь XXI век. Как представляется, основной недостаток такого подхода заключается в том, что он учитывает только линейный тренд природных изменений за последние десятилетия [2] и не принимает во внимание, что эти изменения могут являться составной частью более сложных, продолжительных и противоположно направленных природных колебаний [1, 5].

2. Для анализа особенностей формирования пространственных неоднородностей ледяного покрова на всем суммарном протяжении сибирского шельфа (5 арктических морей: юго-западная часть Карского моря, северо-восточная часть Карского моря, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море) использован метод, позволяющий свести все многообразие ледовых условий к нескольким характерным классам на основе учета внутренних связей между арктическими акваториями. Каждый класс характеризуется количественными, пространственными, структурными, генетическими, циркуляционными особенностями и может быть использован при диагнозе и прогнозе ледовых условий.

Для анализа многолетних особенностей пространственного распределения ледовых аномалий исследованы внутренние связи между ледовыми условиями арктических акваторий [6]. Установлено, что наиболее важные статистические связи между ледовыми аномалиями арктических морей характеризуются несколькими особенностями:

- а) независимостью формирования ледовых условий арктических морей;
- б) оппозиционным фоном ледовых условий между северо-восточной частью Карского моря, с одной стороны, и Восточно-Сибирским с Чукотским морями – с другой;
- в) наибольшей сопряженностью моря Лаптевых с формированием крупной аномалии на суммарной акватории сибирского шельфа.

Для учета крупномасштабных особенностей формирования ледяного покрова на акватории сибирского шельфа кажется естественным сократить количество единиц деления суммарной акватории, по возможности опираясь на естественное географическое деление сибирского шельфа и установленные особенности связи между арктическими морями. Представляется целесообразным и закономерно оправданным деление акватории на три фрагмента с естественными граничными разделителями в виде крупных архипелагов – Северной Земли и Новосибирских островов. В этом случае сибирский шельф состоит из трех фрагментов:

- а) западный фрагмент включает акваторию юго-западной и северо-восточной частей Карского моря;
- б) центральный фрагмент включает акваторию моря Лаптевых;
- в) восточный фрагмент включает акваторию Восточно-Сибирского и Чукотского морей.

Между западным и восточным фрагментами существует определенная оппозиционность в формировании ледовых условий, а в центральном наблюдается повышенная корреляция с суммарной ледовитостью всего сибирского шельфа. Все это обеспечивает связность фрагментов в пространственно единое целое.

3. В зависимости от сочетаний знака сезонной аномалии ледовитости и площади сплоченных льдов в трех арктических акваториях все многообразие ледовых условий сибирского шельфа можно свести в 8 классов с характерными особенностями пространственной изменчивости (табл. 1). Классы можно разделить на три группы: постоянство знака аномалии, чередование знака аномалии, ледовая оппозиция.

При постоянстве знака аномалии (2 класса общей повторяемостью 37 %) на всем пространстве акватории наблюдаются или однородно тяжелые, или однородно легкие ледовые условия, как следствие, формируются экстремальные ледовые

Таблица 1

Тип сочетания	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское и Чукотское моря
Однородность	+ –	+ –	+ –
Чередование	+ –	– +	+ –
Оппозиция (граница НСО)	+ –	+ –	– +
Оппозиция (граница СЗ)	+ –	– +	– +

условия на всем сибирском шельфе; при этом в море Лаптевых фиксируется наибольший размах колебаний.

При чередовании знака аномалии (2 класса общей повторяемостью 18 %) море Лаптевых отличается от остальных морей противоположностью знака ледовой аномалии, а в морях к западу от Северной Земли и к востоку от Новосибирских островов наблюдается аномалия одинакового знака.

При ледовой оппозиции (4 класса общей повторяемостью 46 %) в западных и восточных морях наблюдаются аномалии противоположного знака, а море Лаптевых является промежуточной, буферной зоной с равновероятным знаком аномалии; при этом наибольшие аномалии отмечаются на крайних флангах шельфа. Отдельно укажем, что граница оппозиции неустойчива и смещается по пространству от Северной Земли до Новосибирских островов.

В результате такой классификации каждый календарный год может быть отнесен к определенному ледовому классу, в зависимости от особенностей комбинации ледовых аномалий по пространству арктических морей. При этом каждый класс характеризуется уникальным пространственным распределением ледовых аномалий по акватории сибирского шельфа (табл. 2).

Таблица 2

Класс	P, %	ЮЗ	СВ	МЛ	ВС	ЧМ	Σ AM
(+ + +) – (– – –)	34	1,40	1,57	1,93	1,14	0,81	2,43
(+ + –) – (– – +)	31	0,94	2,41	0,75	–1,38	–1,81	0,44
(– + +) – (+ – –)	20	1,54	–1,13	2,03	2,47	0,90	2,01
(+ – +) – (– + –)	15	–0,37	1,63	–1,28	0,96	1,68	0,94

4. Анализ показал, что формирование ледовых классов характеризуется двумя основными особенностями. Во-первых, каждому классу свойствен свой, индивидуальный генетический сценарий формирования, охватывающий суммарную акваторию арктических морей. Во-вторых, этот генетический сценарий имеет региональные проявления в каждой из отдельных арктических акваторий:

а) постоянство знака ледовой аномалии наблюдается при активизации атмосферной циркуляции на некоторой трансарктической барической оси, которая расположена по диагонали Арктического бассейна от Новой Земли до устья реки Макензи и вызывает крупномасштабный перенос с юга на север и с севера на юг на всем протяжении сибирского шельфа; класс формируется, прежде всего, за счет аномалий сроков начала таяния в мае–июне; наибольшие ледовые аномалии наблюдаются в море Лаптевых и определяются дополнительным воздействием синхронных воздушных переносов в июле–августе, что не характерно для остальных арктических морей;

б) чередование знака ледовой аномалии формируется тогда, когда сибирский шельф находится в пограничной зоне между морским антициклоном и континентальным циклоном, а море Лаптевых является «коридором», по которому происходит

атмосферный массообмен; класс формируется двумя противоположными тенденциями: в западных и восточных морях – за счет аномалий сроков начала таяния в мае–июне, а в море Лаптевых – за счет воздушных переносов, прежде всего, в июле–августе;

в) формирование ледовой оппозиции в арктических морях связано со стационарированием на меридиане моря Лаптевых атмосферного вихря, на западной и восточной перифериях которого формируются противоположные по направлению воздушные переносы; класс ледовой оппозиции с границей вблизи Новосибирских островов формируется, прежде всего, за счет пространственного варианта распределения льдов, который образуется обычно в июне; наибольший вклад тепловых и динамических предикторов мая–июня наблюдается в Восточно-Сибирском и Чукотском морях; класс ледовой оппозиции с границей вблизи Северной Земли формируется, прежде всего, за счет воздушных переносов июля–августа, т.е. уже после начала таяния льдов; наибольшее воздействие динамических факторов наблюдается в Карском море.

5. Если учесть наиболее крупномасштабные пространственные особенности, то все разнообразие в распределении ледовых аномалий можно свести в два главных сезонных типа: к типу ледовой оппозиции и к типу ледовой однородности (рис. 1). Под ледовой оппозицией понимается такое развитие ледовых условий, когда в западных акваториях (к западу от Северной Земли) и в восточных акваториях (к востоку от Новосибирских островов) наблюдаются аномалии противоположного знака (мало льда на западе – много льда на востоке и наоборот); при этом граница оппозиции непостоянна в пространстве и дрейфует, тяготея то к Северной Земле, то к Новосибирским островам. Напротив, под ледовой однородностью понимается такое развитие ледовых условий, когда во всех арктических акваториях наблюдается аномалия одинакового знака (много льда во всех морях или мало льда во всех мо-

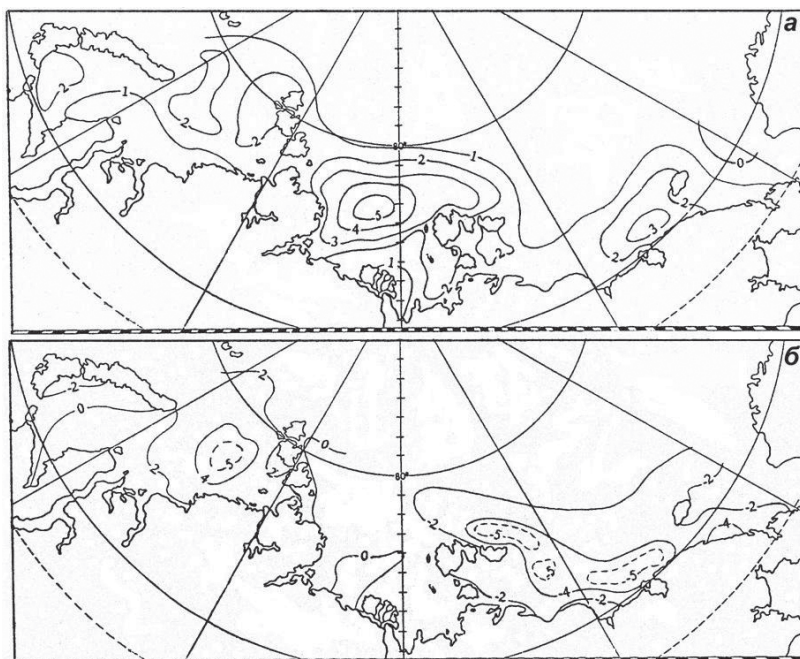


Рис. 1. Аномалии сплоченности ледяного покрова (баллы) при формировании ледовой однородности (а) и ледовой оппозиции (б) в арктических морях России

рях); в этот же класс может быть отнесен и случай чередования аномалий, и тогда наиболее важным критерием однородности является совпадение знака ледовой аномалии в западных и восточных арктических акваториях.

6. Имеющийся ряд наблюдений (1932–2007 г.) может быть разделен на несколько многолетних интервалов так, чтобы в течение каждого из них отмечалась бы одна, преобладающая комбинация знаков ледовых аномалий между арктическими морями. Такой исследовательский подход позволяет развить научные представления об особенностях ледовой изменчивости в Арктике. Анализ показывает, что многолетние изменения пространственного распределения ледовых аномалий в арктических морях сводятся к суперпозиции нескольких природных ритмов различной продолжительности с характерным обострением аномалий в оппозиционных или однородных акваториях:

а) перемещение области наибольшей природной изменчивости с запада на восток арктических морей (два периода продолжительностью около 40 лет каждый);

б) чередование длительных периодов пониженной и повышенной суммарной ледовитости арктических морей (три периода продолжительностью 20–30 лет каждый);

в) многолетнее преобладание характерных комбинаций в распределении ледовых аномалий по пространству арктических морей в виде двух наиболее типовых сочетаний – ледовой оппозиции и ледовой однородности (четыре периода продолжительностью около двух десятилетий каждый).

7. Наиболее масштабная тенденция многолетних вариаций заключается в смещении зоны наибольшей изменчивости ледовых условий с западных арктических морей в 1940–1960 гг. (западное колебание) на восточные арктические моря в 1970–1990 гг. (восточное колебание). Зональный дрейф области наибольшей изменчивости с запада на восток арктических акваторий и переход от одной климатической эпохи к другой вблизи границы 1960–1970 гг. маркируется в пространстве и времени меридионально ориентированной Северной Землей (табл. 3).

Таблица 3

Явление	Период, гг.	ЮЗКМ	СВКМ	МЛ	ВСМ	ЧМ	ΣAM
Западное ледовое колебание	1932–57	–0,28	–0,67	0,04	0,03	0,19	–0,26
	1958–74	0,58	0,42	–0,05	–0,04	–0,32	0,17
	(1958–74) – (1932–57)	0,86	1,09	–0,09	–0,07	–0,51	0,43
Восточное ледовое колебание	1975–88	0,11	0,15	0,06	0,52	0,34	0,44
	1989–07	–0,36	0,12	–0,22	–0,50	–0,32	–0,41
	(1989–07) – (1975–88)	–0,47	–0,03	–0,28	–1,02	–0,66	–0,85

8. Каждое из ледовых колебаний состоит из двух стадий, чередующихся по знаку ледовых аномалий. Сначала легкие условия (1930–1950 гг.) сменились тяжелыми (1960-е гг.) при западном колебании, которое трансформировалось в восточное колебание при тяжелых условиях (1970–1980 гг.) и сменивших их легких (1990–2000 гг.). Независимо от локализации и фона 20–30-летней изменчивости наблюдались периоды устойчивого сохранения знака ледовой аномалии для суммарной акватории сибирского шельфа преобладающей продолжительностью 5–6 лет; наибольшие аномалии формировались в аномально однородных акваториях – в море Лаптевых и юго-западной части Карского моря.

9. Наблюдаются длительные периоды преобладания оппозиционного и однородного сочетания ледовых аномалий между западными и восточными арктическими морями, а также многолетние оппозиционно-однородные ледовые преобразования, которые заключаются в том, что длительный период преобладания

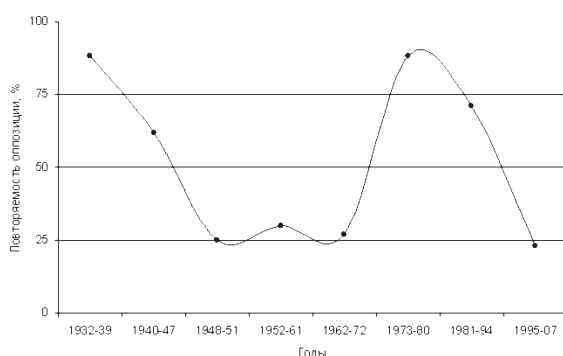


Рис. 2. Повторяемость (%) ледовой оппозиции между западными и восточными арктическими морями в течение длительных временных интервалов

ледовой оппозиции сменяется во времени длительным периодом преобладания ледовой однородности и наоборот (рис. 2). За последние три четверти века наблюдается следующая преемственная цепочка ледовых преобразований: преобладание ледовой оппозиции (1930–1940 гг.) → преобладание ледовой однородности (1950–1960 гг.) → преобладание ледовой оппозиции (1970–1980 гг.) → преобладание ледовой однородности (1990–2000 гг.).

10. Длительный период преобладания как оппозиции, так и однородности также показывает существование характерного преобразования внутри периода, которое заключается: а) для оппозиции – в смещении границы оппозиции с запада на восток арктических морей и б) для однородности – в чередовании легких и тяжелых ледовых условий (табл. 4). Причем эти трансформации наблюдаются как для западного колебания, так и для восточного.

То есть уточненная цепочка ледовых преобразований выглядит так: оппозиция с границей на западе (1932–1939 гг.) → оппозиция с границей на востоке (1940–1947 гг.) → однородно легкие ледовые условия (1948–1961 гг.) → однородно тяжелые ледовые условия (1962–1972 гг.) → оппозиция с границей на западе (1973–1980 гг.) → оппозиция с границей на востоке (1981–1994 гг.) → однородно легкие ледовые условия (1995–1997 гг.) → однородно тяжелые ледовые условия (?). Нетрудно заметить, что это внутривековое оппозиционно-однородное преобразование состоит из двух структурно повторяющихся частей (табл. 5).

11. Внутри как западного ледового колебания (1930–1960 гг.), так и восточного ледового колебания (1970–2000 гг.) наблюдается одна и та же многолетняя

Таблица 4

Сочетание	1932–1939 гг.	1940–1947 гг.	1948–1951 гг.	1952–1961 гг.	1962–1972 гг.	1973–1980 гг.	1981–1994 гг.	1995–1997 гг.
+++----	0	1	1	6	7	1	1	9
--+--+--	1	2	2	1	1	0	3	1
++-+---	3	4	0	3	2	3	6	0
+-+--+--	4	1	1	0	1	4	4	3
ОДН/ОПП	1/7	3/5	3/1	7/3	8/3	1/7	4/10	10/3
Преобладает сочетание	+--	--+	-+-	---	+++	+--	+-	---
Длина периода, годы	8	8	4	10	11	8	14	13

Выделены наиболее часто повторяющиеся сочетания

Таблица 5

Пространственная изменчивость ледяного покрова							
Западное ледовое колебание				Восточное ледовое колебание			
Пониженная ледовитость		Повышенная ледовитость		Пониженная ледовитость		Повышенная ледовитость	
Ледовая оппозиция		Ледовая однородность		Ледовая оппозиция		Ледовая однородность	
Граница на западе	Граница на востоке	Легкие условия	Тяжелые условия	Граница на западе	Граница на востоке	Легкие условия	Тяжелые условия
1932–39 гг.	1940–47 гг.	1948–61 гг.	1962–72 гг.	1973–80 гг.	1981–94 гг.	1995–07 гг.	?

трансформация, при которой период преобладания оппозиции (с учетом миграции ее границы) преобразуется в период преобладания однородности (с учетом смены знака аномалии). Переход же от западного колебания к восточному колебанию на границе 1960–1970-х гг. сопровождался обратным преобразованием, т.е. от однородности к оппозиции.

12. Существование длительных периодов крупномасштабной изменчивости по пространству арктических морей и особенности их преобразований во времени позволяют делать самые общие выводы о возможном состоянии морской криосферы в ближайшем будущем (первая треть XXI в.). Как известно, в течение последней сотни лет наблюдаются две наиболее важные особенности в многолетней изменчивости ледовых условий: а) чередование периодов повышенной и пониженной ледовитости по типу «полувековой» волны, б) общий тренд уменьшения площади ледяного покрова в арктических морях (рис. 3). Средняя продолжительность пяти квазиоднородных периодов расширения и сокращения площади льдов составляет около 22 лет (естественный разброс от 18 до 28 лет). В течение последних двух десятилетий наблюдается очередной период пониженной ледовитости; видимо, вторая половина 2000-х гг. и первая половина 2010-х гг. являются временным интервалом, когда следует ожидать наибольшего развития процессов потепления и уменьшения ледовитости в арктических морях. После этого период сокращения площади ледяного покрова должен закончиться. При сохранении обнаруженных природных закономерностей текущий период легких условий должен трансформироваться в период тяжелых ледовых условий [7]. Следует ожидать, что очередной период расширения площади ледяного покрова будет характеризоваться следующими особенностями:

а) наиболее вероятно формирование таких пространственных ледовых условий, при которых во всех арктических морях наблюдается аномалия одинакового

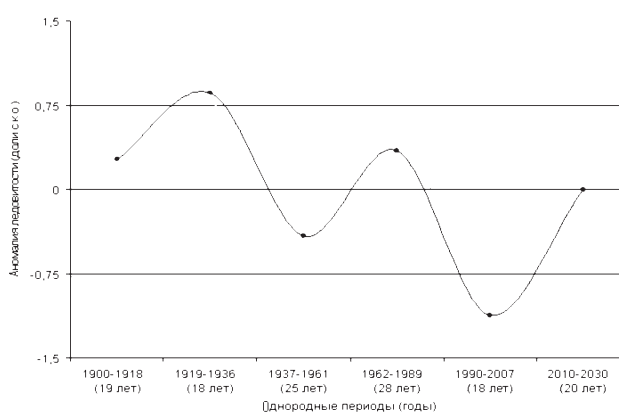


Рис. 3. Чередование многолетних периодов повышенной и пониженной ледовитости в арктических морях и прогностическая экспертиза на 2010–2030 гг.

знака, т.е. ледовая однородность (соответственно, повторяемость ледовой оппозиции предполагается пониженной);

б) наибольшие значения положительной аномалии ледовитости сначала будут отмечаться в восточных арктических морях, а затем — распространяться и на западные акватории, т.е. восточное колебание будет постепенно сменяться западным колебанием;

в) максимальное развитие очередного циклического похолодания следует ожидать в течение 2020-х гг.

Следует также учитывать, что прогнозируемое очередное расширение площади льдов будет характеризоваться не столь значительным увеличением ледовитости, как это наблюдалось в течение 1960-х гг. и, тем более, в течение 1920-х гг. Наиболее вероятно, что в течение всего XXI столетия сохранятся наиболее важные особенности количественных и пространственных закономерностей формирования ледовых условий в арктических морях: циклическое чередование многолетних периодов повышенной и пониженной ледовитости, западного и восточного ледового колебания, преобладания ледовой оппозиции и ледовой однородности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев Г.В.* Исследования изменений климата Арктики в XX столетии // Тр. ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 6–21.
2. *Егоров А.Г.* Солнечный цикл и многолетняя барическая волна в приземной атмосфере Арктики // Доклады Академии наук. 2003. Т. 393. № 3. С. 402–406.
3. *Егоров А.Г.* Солнечно обусловленные изменения приземного давления воздуха в Арктике и многолетние особенности распределения льдов в арктических морях России в летний период // Метеорология и гидрология. 2005. № 8. С. 14–24.
4. *Захаров В.Ф.* Морские льды в климатической системе. СПб: Гидрометеиздат, 1996. 213 с.
5. *Кондратьев К.Я.* Изменения глобального климата: нерешенные проблемы // Метеорология и гидрология. 2004. № 6. С. 118–127.
6. Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. Г.К.Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.
7. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 158 с.
8. ACIA, Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 2004. 140 p.
9. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, 2001. 944 p.

A.G. EGOROV

LONG-TERM FEATURES OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ICE ANOMALIES IN THE RUSSIAN ARCTIC SEAS DURING THE PERIOD 1930–2000

The peculiarities of the combination of the positive and negative ice cover extent anomalies in the Russian Arctic seas are studied. Analysis of the large-scale distribution of the ice anomalies stimulates the evolution of the long-term variability of the ice conditions. Interchange of ice opposition and ice uniformity periods allows forecasting the regular cyclic increase of the ice cover extent in the period of 2010–2030.