

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Анализ среднемесячных данных температуры Баренцева моря на поверхности и различных глубинах показал её существенный рост (в среднем на 0.2°C за 10 лет) за последние десятилетия.

На фоне этого роста обнаружены колебания температуры на периодах, близких к 3, 8 и 14 годам. Выдвинуто предположение о связи этих изменений с Эль-Ниньо – Глобальной атмосферной осцилляцией, Северо-Атлантическим колебанием и изменениями Северо-Атлантического течения соответственно.

Показано, что аномалии температуры затрагивают верхний 55-метровый слой Баренцева моря.

Анализ среднесуточных данных температуры поверхности Баренцева моря показал рост амплитуды, количества и продолжительности экстремальных температурных явлений с положительным знаком и их сокращение с отрицательным знаком за период спутниковых наблюдений.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-80065).

### 4.3. Закономерности и особенности ледовых условий Баренцева моря во второй половине XX – начале XXI века

**И.О. Думанская**

ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва

Потепление Арктики, особо активизировавшееся в начале XXI века, сопровождается значительным уменьшением площади ледяного покрова в арктических морях. В разделе показаны количественные изменения ледовых параметров Баренцева моря, а также факторов, влияющих на формирование ледяного покрова в последние годы. В XXI веке повторяемость мягких зим увеличилась на 17%, а суровых уменьшилась на 19%. Существенно увеличилась температура воздуха на ГМС Малые Кармакулы, температура воды на разрезе «Кольский меридиан», атмосферный и океанский потоки тепла, а также скорость течений на западной границе Баренцева моря. Продолжительность ледового периода сократилась в среднем на 2–3 недели, а скорость уменьшения ледовитости составляла 7.2% за 10 лет. Это наибольшая скорость по сравнению с другими арктическими морями. Показано, что изменчивость ледовитости Баренцева моря и других параметров природной среды региона носит циклический характер. Период цикла предположительно близок к 84 годам, что соответствует орбитальному периоду Урана. Минимум ледовитости после 1935–1945 гг. ожидается в период 2019–2029 гг.

**Ключевые слова:** ледовый покров, ледообразование, ледовитость, температурный режим.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(15)

**ВВЕДЕНИЕ**

Основными факторами, влияющими на ледовый покров в Баренцевом море, являются:

1. Воздействие теплых атлантических вод (АВ), приносимых ответвлениями течения Гольфстрим (в виде северной, центральной и южной ветвей Нордкапского течения), которое определяет тот факт, что Баренцево море, в отличие от всех других арктических морей, даже в суровые зимы полностью не покрывается льдом.

2. Изменчивость температурного режима региона.

3. Ветер, активность которого влияет на перемещение воды и, следовательно, на скорость выхолаживания поверхностного слоя, в зависимости от которой находятся сроки начала ледообразования. Преобладающая повторяемость в холодный период юго-западных и западных ветров в южной и западной частях моря способствует восточному по-

ложению кромки льда, кроме того, с этими ветрами связано появление заприпайных полыней (средней шириной 15–30 км) вдоль материкового побережья юго-восточной части Баренцева моря. С преобладающей повторяемостью в холодный период ветров восточной четверти в северных районах моря связано появление заприпайных полыней вдоль западного и юго-западного побережья архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ). Кроме того, под действием восточных ветров из центральной Арктики в районы, прилегающие к ЗФИ и Шпицбергену, могут поступать довольно мощные арктические льды и сохраняться в отдельные годы в виде остаточных в течение всего летнего периода [Гидрометеорология, 1990; Карелин, Карклин, 2015; Наблюдения..., 2009; Думанская, 2014].

Эти факторы в течение многих веков оказывают влияние на эволюцию ледяного покрова Баренцева

морья, определяя ее общие закономерности. Количественно изменения ледовых условий характеризуют такие параметры, как даты наступления ледовых фаз (появления морского льда, очищения моря ото льда); продолжительность ледового периода (в сутках); толщина льда (в см); ледовитость моря (отношение площади, занятой льдом любой сплоченности, к общей площади моря в процентах); сплоченность льда (отношение площади льда к площади морской поверхности в некоторой зоне в баллах – от 1 до 10, что соответствует изменчивости от 10 до 100%).

Ледовый режим Баренцева моря, как показывают исследования, претерпевал в течение последнего столетия существенные изменения. Потепление Арктики, особо активизировавшееся в начале XXI века, сопровождается значительным уменьшением площади ледяного покрова в арктических морях [Гудкович и др., 2008; Фролов и др., 2007, 2009]. Понижающиеся тренды площади, толщины, сплоченности льда наиболее велики в морях атлантического сектора Ар-

ктики. В качестве наиболее вероятного механизма потепления климата Арктики и связанного с ним сокращения арктических льдов, в частности, на акватории Баренцева моря, предполагается изменение атмосферной циркуляции с сильной адвекцией тепла в высокие широты и поступлением сюда атлантического тепла [Бузин, Гудкович, 2011; Семенов и др., 2015; Semenov, Latif, 2012].

В настоящем разделе выполнен анализ количественных изменений ледовых параметров Баренцева моря в XXI в., а также факторов, влияющих на формирование ледяного покрова.

#### **ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ**

В таблице 4.3.1 приведены ряды наблюдений за гидрометеорологическими и ледовыми характеристиками, использованными для исследования изменчивости ледовых условий Баренцева моря.

**Таблица 4.3.1.** Ряды данных о гидрометеорологических и ледовых условиях Баренцева моря

Пункт или район наблюдений	Характеристика	Период наблюдений	Число лет наблюдений
Баренцбург	Та	1913–2018	106
	Р	1962–2017	56
Белый Нос	ЛФ	1950–2015	66
	ТЛ	1941–2015	75
Бутрино	ЛФ	1924–2015	92
	ТЛ	1924–2015	92
Варандей (Шар)	ЛФ	1941–2015	75
	ТЛ	1965–2015	51
Индига	ЛФ	1924–2015	92
	ТЛ	1965–2015	51
Константиновский	ЛФ	1960–2015	56
	ТЛ	1965–2015	51
Малые Кармакулы	Та	1922–2018	97
	ЛФ	1950–2015	66
	ТЛ	1940–2015	76
Нарьян-Мар	Та	1928–2018	91
	Р	1962–2017	56
о. Хейса	ЛФ	1960–2015	56
	ТЛ	1958–2015	58
Северный Колгуев	ЛФ	1942–2015	74
Кольский меридиан	Тw	1951–2017	67
Юго-восточная часть	Л	1928–2018	91
Все море	Л	1928–2018	91

**Примечание.** Та – температура воздуха, Тw – температура воды, Р – давление, ЛФ – ледовые фазы, ТЛ – толщина припайного льда, Л – ледовитость.

Для характеристики изменчивости параметров поступающих в Баренцево море АВ использованы данные о температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» за 65-летний период. «Кольский меридиан» является стандартным океанографическим разрезом, расположенным вдоль меридиана 33°30' в. д. от побережья Кольского залива до 77° с. ш. Он состоит из 19 станций. Наиболее регулярные наблюдения производятся на южных 10 станциях (т. е. до 74° с. ш.), показанных на рисунке 4.3.1. Они располагаются в области распространения теплых вод системы Нордкапского течения (его южной и центральной ветвей) и опресненных вод Мурманского прибрежного течения.

Глубина на станциях изменяется от 150 м до 310 м, средняя глубина – 245 м. Обычно наиболее исследованный участок в пределах расположения 1–10 станций делит на три отрезка: с 1 по 3 станцию – пересекает прибрежную ветвь Мурманского течения, с 3 по 7 станцию – южную ветвь Нордкапского течения и с 8 по 10 станцию – центральную ветвь Нордкапского течения. Характерное распределение температуры и солености на этих станциях (по данным за 2008 г.) представлено на рисунке 4.3.2. Из него видно, что наибольшая часть АВ (с высокой температурой и соленостью) поступает через отрезок разреза, соответствующий положению 8–10 станций.

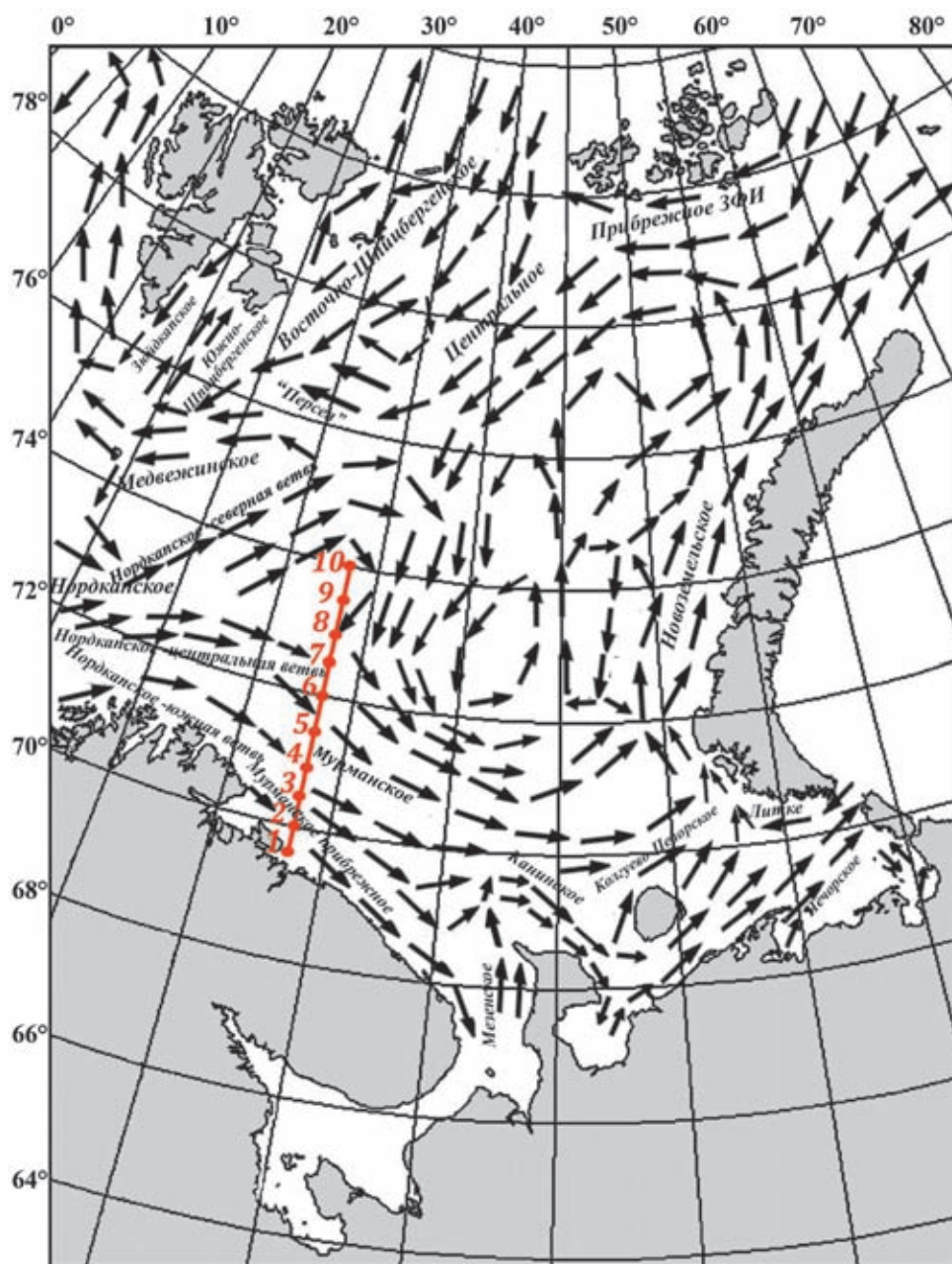


Рис. 4.3.1. Разрез «Кольский меридиан» и поверхностные течения в Баренцевом море



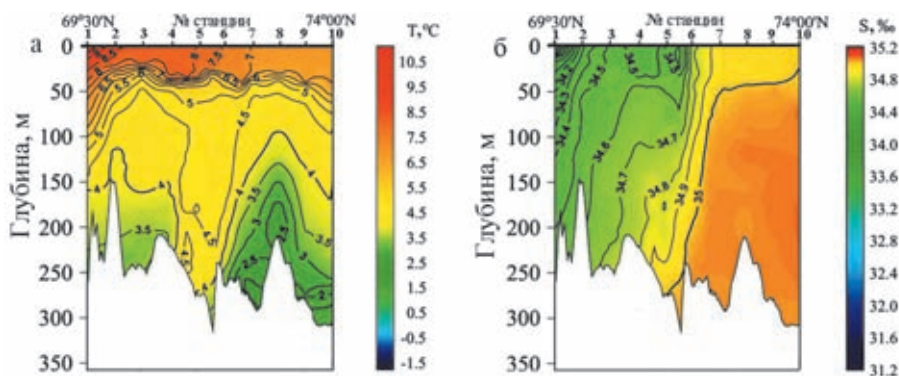


Рис. 4.3.2. Распределение температуры (а) и солёности (б) на участке с 1 по 10 станцию разреза «Кольский меридиан» [Matishov и др., 2009]

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Ледообразование по данным наблюдений на морских гидрометеорологических станциях (ГМС) в соответствии с табл. 4.3.1 на акватории моря начинается обычно в конце сентября – начале октября с северных районов моря. В районе о. Хейса (ЗФИ) первое ледообразование происходит в среднем 27 сентября, а устойчивое – 4 октября. В других районах моря, отличающихся более высоким прогревом воды в поверхностном слое и активным влиянием АВ, молодой лед образуется позже.

Во второй половине октября ледообразование в северной и юго-восточной частях моря активизируется. Первое появление льда вдоль материкового побережья юго-восточной части моря наблюдается в среднем 20–25 октября, а устойчивое – 1–5 ноября. В ноябре кромка льдов продвигается на юг и на запад. Юго-западная часть Баренцева моря остается практически свободной ото льда. Здесь льды образуются

только в вершинах заливов, в устьях рек в виде берегового припая, который часто взламывается и выносится в море.

Устойчивый припай ежегодно устанавливается в вершинах бухт и фьордов на Шпицбергене, в проливах Земли Франца-Иосифа, в бухтах на Новой Земле, у побережья островов Белый, Виктория, Колгуев, а также в заливах южного побережья (Чешская, Печорская, Хайпудырская губы и др.). Вдоль открытого побережья Новой Земли и материка от пролива Югорский Шар до м. Канин Нос ширина припая, как правило, не превышает нескольких сотен метров.

Своего максимального развития по площади и по толщине ледовый покров Баренцева моря достигает в марте–апреле, затем вплоть до сентября кромка льда отступает на север и на восток [Гидрометеорология..., 1990; Думанская, 2014].

Ледовитость моря имеет большую межгодовую изменчивость. На рис. 4.3.3 и 4.3.4 видно, что площадь, занятая льдом, в момент максимального разви-

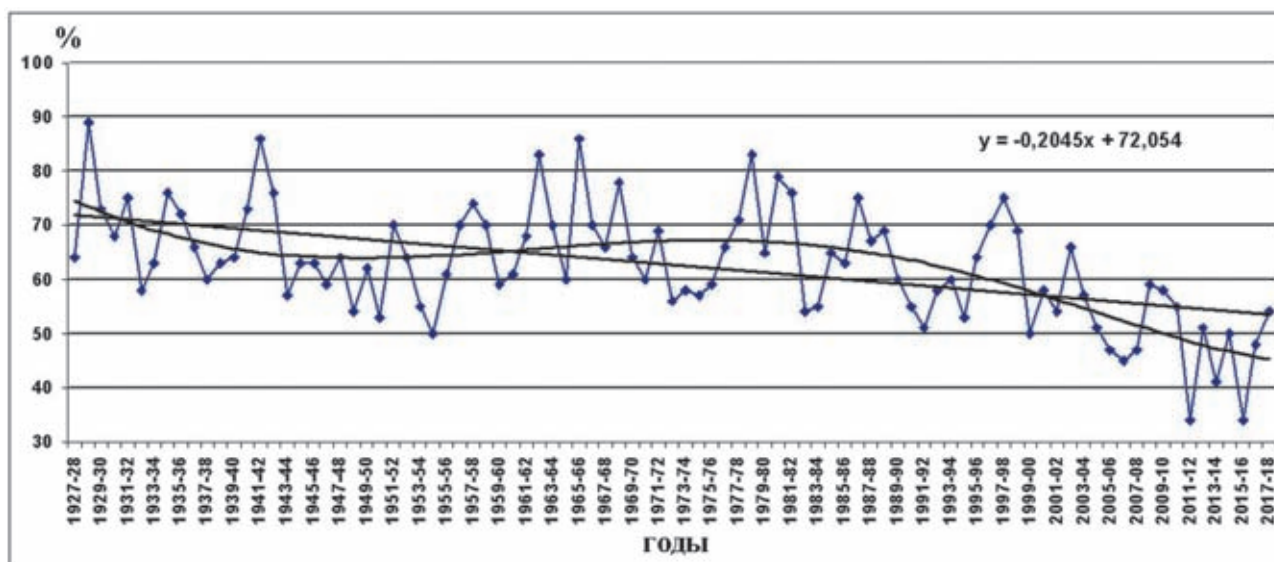


Рис. 4.3.3. Ледовитость Баренцева моря в момент максимального развития ледяного покрова (февраль–апрель).

Прямая линия – линейный тренд уменьшения ледовитости за весь период наблюдений. Плавная сглаживающая – полиномиальная аппроксимация ледовитости

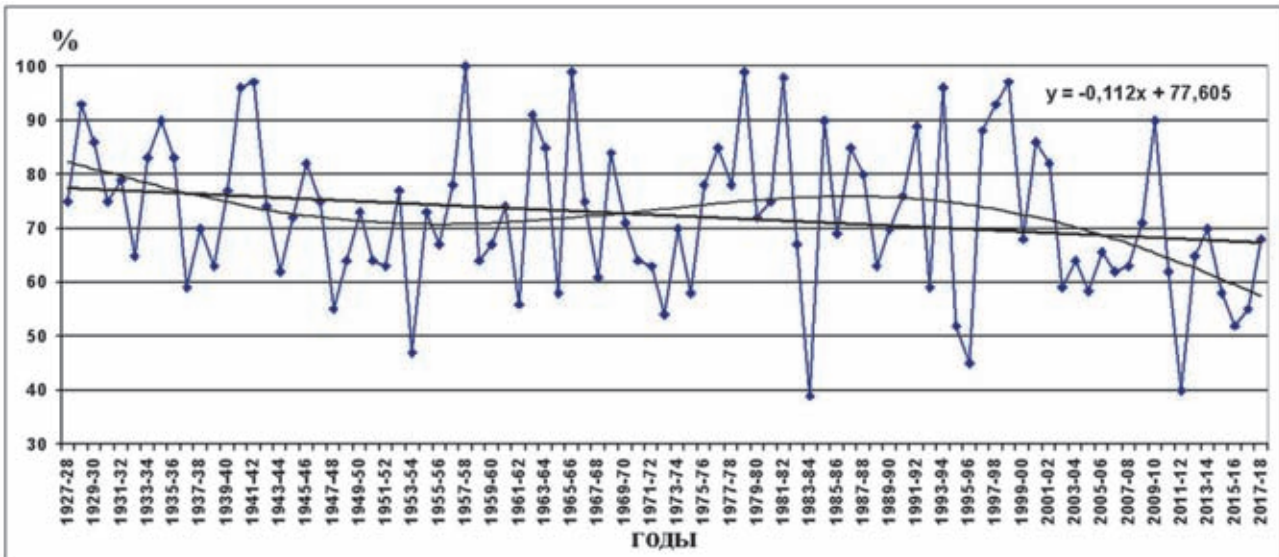


Рис. 4.3.4. Ледовитость юго-восточной части Баренцева моря в момент максимального развития ледяного покрова (февраль–апрель).

Прямая линия – линейный тренд уменьшения ледовитости за весь период наблюдений. Плавная сглаживающая – полиномиальная аппроксимация ледовитости

тия ледяного покрова в Баренцевом море (за период наблюдений 1928–2018 гг.) изменялась от 34 до 89% в море в целом и от 39 до 100% в его юго-восточной части. Средняя ледовитость всего моря на момент максимального развития ледяного покрова составляет 65%, а его юго-восточной части – 72%.

Для всего моря наибольшая ледовитость наблюдалась в 1929 г. (89%), наименьшая – в 2016 г. (34%). Для юго-восточной части моря наибольшая ледовитость наблюдалась в 1958 и 1979 гг. (100 %), наименьшая – в 1984 и 2012 гг. (39 и 40% соответственно). В суровые зимы 1929, 1942 и 1966 гг. ледовитость Баренцева моря в марте–апреле была близка к 90%. В особенно теплые зимы наибольшая ледовитость даже не превышала 35–40%.

Ледовые условия в середине марта мягкой зимы 2008 г. и суровой зимы 1979 г. изображены на рис. 4.3.5. В умеренные зимы в апреле (в момент максимального развития) кромка льда в Баренцевом море проходит вдоль западных берегов Шпицбергена на расстоянии 20–50 км. Далее она спускается и, постепенно отклоняясь к юго-востоку, достигает 75° с. ш., затем круто поворачивает на юго-запад и подходит к берегу Кольского полуострова в районе м. Святой Нос. Положение кромки льда в аномально суровые зимы можно видеть на рис. 4.3.5, б.

Сплоченность льда у кромки уменьшается главным образом за счет таяния более тонких льдов под действием теплых вод атлантического происхождения. Ледяной покров в открытом море, за исключением прикромочных и прибрежных областей, имеет большую сплоченность (8–10 баллов) в течение всей

зимы, однако у южного и западного побережий архипелага Земля Франца-Иосифа, вдоль берегов архипелага Новая Земля, у островов Колгуев и Вайгач, а также вдоль материкового побережья юго-восточной части моря часто образуются полыньи, положение которых тесно связано с режимом преобладающих ветров.

Толщина припайного льда на момент максимального развития ледяного покрова в апреле в районе Земли Франца-Иосифа составляет в среднем 95–105 см (максимальная – 150–160 см), у побережья Новой Земли – 105–115 см (максимальная – 160–170 см), в проливе Югорский Шар – 115–125 см (максимальная – 185–195 см), в районе Варандея – 105–115 см (максимальная – 145–155 см), у побережья о. Колгуева – 70–80 см (максимальная – 105–110 см), в устье Индиги – 80–90 см (максимальная – 105–115 см) [Думанская, 2014].

Толщина дрейфующих льдов в конце зимы в прикромочной зоне обычно не превышает 30 см. Здесь преобладает битый лед. В юго-восточной части Баренцева моря в зимний период дрейфующий лед достигает толщины 70–80 см. Наибольших толщин (120–140 см) к концу зимы дрейфующий лед достигает в северной части Баренцева моря. Здесь преобладают обширные поля и их обломки.

Дрейфующий лед в течение зимы подвергается сжатиям и торошению. Зоны льда повышенной торосистости представляют большую опасность, как для судов, так и для гидротехнических сооружений. Льды со значительной торосистостью, выносимые из Белого и Карского морей, с наибольшей повторя-



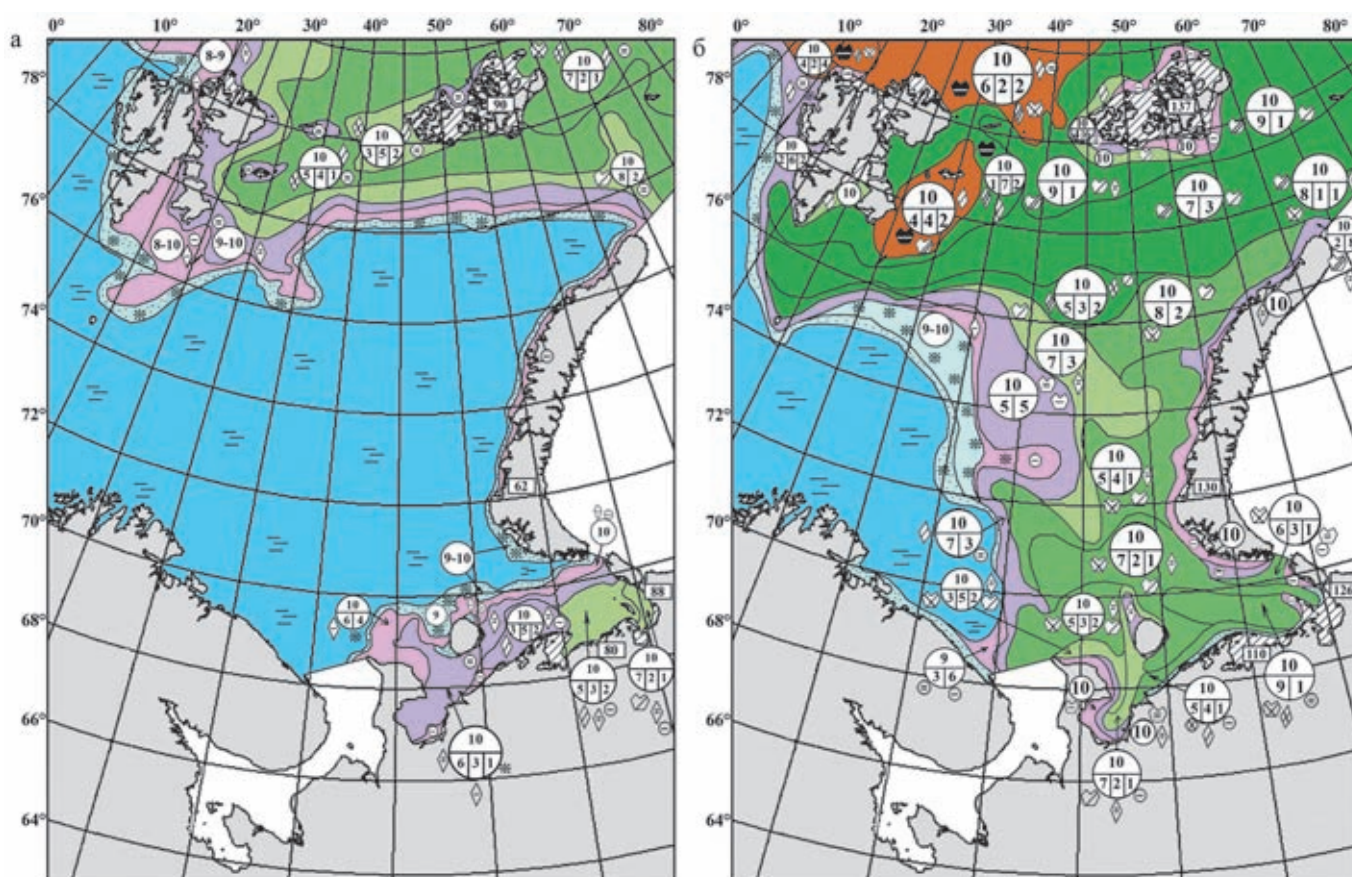


Рис. 4.3.5. Ледовые условия в середине марта мягкой зимы 2008 года (а) и суровой зимы 1979 года (б) [Думанская, 2014].  
Условные обозначения ледовых характеристик на картах соответствуют «Номенклатуре морских льдов» [Номенклатура..., 1974]

емостью могут встречаться на восточных подходах к п-ову Канин (к западу от о. Колгуева в локальном районе языка беломорского льда) и на западных подходах к проливу Карские Ворота, а также в самом проливе [Ледяные образования..., 2006].

Очищение моря ото льда начинается в мае, а в середине июня средняя кромка льда располагается севернее 76° с. ш. в центральном районе и вплотную подходит к берегам Новой Земли на востоке моря.

Освобождение моря ото льда вдоль побережья юго-восточной части моря происходит в среднем 10–30 июня. К середине июля западные берега архипелага Новая Земля обычно полностью освобождаются ото льдов (рис. 4.3.6, а). Для июля–августа характерно интенсивное смещение кромки льда к северу. На северо-западе моря наиболее быстрое отступление кромки на север наблюдается в районе северной ветви Нордкапского течения.

В августе–сентябре anomalно теплых лет море полностью очищается ото льда, а в anomalно холодные годы лед в эти месяцы сохраняется на 30–35% его площади, располагаясь преимущественно в северных районах. В отдельные годы море может полностью очищаться ото льда.

### ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЛЕДОВЫЙ ПОКРОВ В НАЧАЛЕ ХХІ ВЕКА

Воздействие теплых атлантических вод (АВ) наиболее активно проявляется в зоне влияния Нордкапского течения, средняя скорость воды в котором достигает 10–25 см/с. На разрезе «Кольский меридиан» область распространения основной массы АВ располагается в районе параллели 74° с. ш. [Калавиччи, Башмачников, 2018; Matishov et al., 2009], где глубины достигают 300 м. Теплые атлантические воды наблюдаются во всей водной толще. Это хорошо видно на рис. 4.3.2.

Летом на температуру и соленость верхнего 50-метрового слоя оказывают влияние сезонный прогрев воды и таяние льда. В связи с этим верхний распресненный слой по своим характеристикам значительно отличается от слоя 50–200 м, характеристики которого наиболее верно отражают состояние потока АВ.

В таблице 4.3.2 приведены средние ежемесячные значения температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» за 1951–2015 гг. Средняя продолжительность ледового периода в судоходной юго-восточной части моря составляет по данным различных ГМС 225–245 дней.

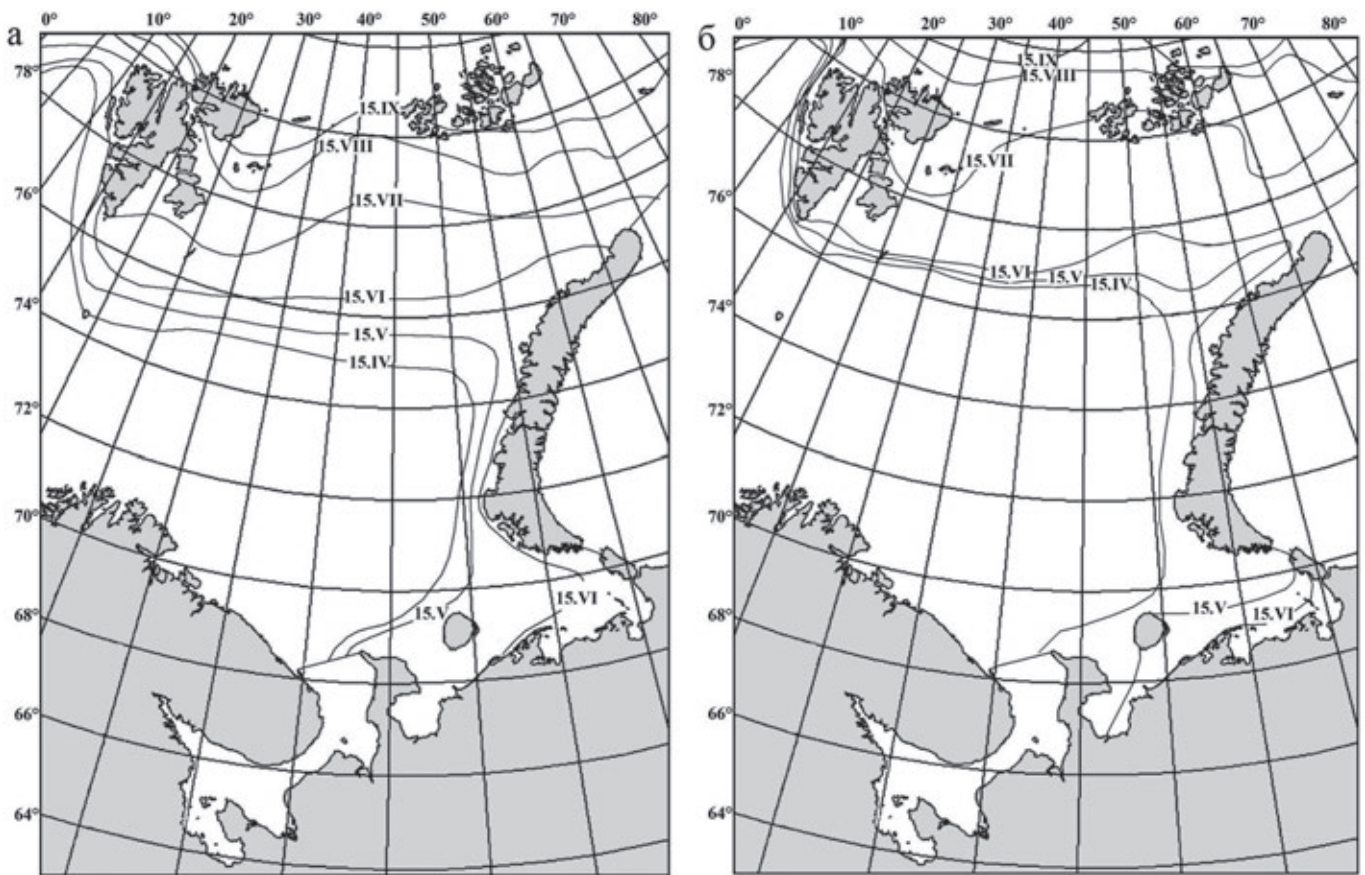


Рис. 4.3.6. Изохронны среднего многолетнего очищения моря ото льда в XX в. (а) и в XXI в. (б)

Таблица 4.3.2. Средние ежемесячные значения температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» за 1951–2015 гг.

№ станции	Слой	Месяцы												Год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1–3	0–50	3.87	3.09	2.58	2.46	3.13	4.56	6.52	8.01	8.07	7.00	5.78	4.75	4.98
	50–200	3.94	3.16	2.66	2.46	2.69	3.06	3.58	4.34	5.27	5.84	5.54	4.75	3.93
	0–200	3.91	3.14	2.64	2.46	2.81	3.50	4.43	5.41	6.08	6.18	5.59	4.75	4.24
3–7	0–50	3.98	3.50	3.21	3.09	3.49	4.55	6.29	7.47	7.36	6.24	5.23	4.52	4.90
	50–200	4.01	3.59	3.28	3.11	3.22	3.45	3.67	3.93	4.30	4.64	4.71	4.41	4.01
	150–200	3.95	3.60	3.31	3.09	3.06	3.19	3.33	3.44	3.61	3.87	4.14	4.18	3.56
	0–200	4.01	3.57	3.27	3.11	3.28	3.72	4.32	4.81	5.06	5.04	4.84	4.44	4.01
8–10	0–50	3.19	2.89	2.62	2.51	2.92	3.86	5.35	6.39	6.23	5.17	4.26	3.69	4.08
	50–200	3.10	2.72	2.48	2.30	2.50	2.86	3.16	3.46	3.88	4.07	3.89	3.50	3.13
	150–200	2.93	2.57	2.33	2.13	2.19	2.43	2.67	2.88	3.20	3.41	3.49	3.28	2.78
	0–200	3.12	2.75	2.52	2.35	2.60	3.11	3.71	4.19	4.47	4.34	3.98	3.55	3.36

Анализ таблицы 4.3.2 показывает, что за последние 65 лет в период с января по май наиболее теплые воды поступали в Баренцево море на участке 3–7 станции, а с июня по декабрь – на участке 1–3 станции. На

рис. 4.3.7 отражена межгодовая изменчивость средних годовых значений температуры воды в центральной ветви Нордкапского течения на станциях 8–10 разреза «Кольский меридиан» в слое 50–200 м.



За 65-летний период температура выросла в среднем (по тренду) от 3.5 до 4.4°C (на 0.9°C). Скорость роста составила 0.14°C за 10 лет. В XXI веке температура выросла в среднем (по тренду) от 4.2°C до 4.8°C. Скорость роста увеличилась почти в 4 раза, составив 0.4°C за 10 лет.

В работе [Калавиччи, Башмачников, 2018] на основе использования массивов натуральных и спутниковых данных за 25-летний период (1993–2014 гг.) и модельных расчетов выявлены тенденции в изменчивости годовых атмосферных и океанических потоков, приходящих на западную границу Баренцева моря. Оказалось, что средние значения океанического потока тепла выше, чем атмосферного (в среднем

в 5 раз). Максимальные значения наблюдаются в холодный период года (январь–апрель), минимальные – в теплый период (июнь–август). Изменчивость величин потоков океанического и атмосферного тепла имеет устойчивый повышающийся тренд в течение всего рассматриваемого периода наблюдений. Это определяется ростом величин элементов, участвующих в формировании потоков: температуры воздуха и интенсивности западно-восточного переноса, температуры воды и скорости течений в соответствии с рисунком 4.3.8.

Изменчивость температурного режима региона. Повторяемость мягких, умеренных и суровых зим, выявленных на основе анализа температуры воздуха,

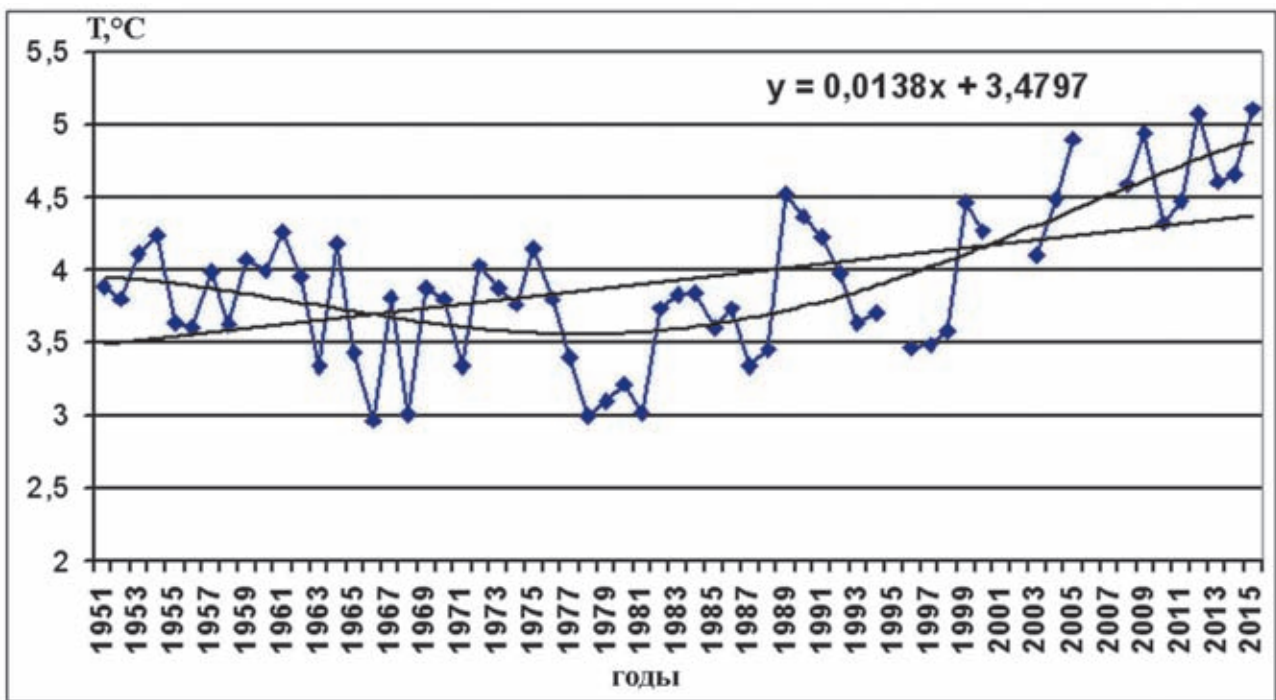


Рис. 4.3.7. Средняя годовая температура воды в центральной ветви Нордкапского течения на станциях 8–10 разреза «Кольский меридиан» в слое 50–200 м.

Прямая линия – линейный тренд уменьшения ледовитости за весь период наблюдений. Плавная сглаживающая – полиномиальная аппроксимация температуры



Рис. 4.3.8. Потоки тепла и скорость течения на западной границе Баренцева моря [Калавиччи, Башмачников, 2018]



как показывают исследования [Думанская, 2014], в целом соответствует повторяемости легких, средних и тяжелых условий в Баренцевом море. Для юго-восточной части Баренцева моря по 73-летнему ряду наблюдений на ГМС Нарьян-Мар в XX в. (с сезона 1927–1928 гг. по сезон 1999–2000 гг.) рассчитаны интервалы критериев суровости зим по суммам градусодней мороза (в °C):

мягкая зима	<2030;
умеренная зима	2030–2790;
суровая зима	>2790.

За 73-летний период наблюдений за температурой воздуха в XX в. на юго-востоке моря было выявлено 16% мягких, 65% умеренных и 19% суровых зим.

Их повторяемость для первых 18 лет XXI в. составляет 33% мягких, 67% умеренных и 0% суровых зим. По сравнению с XX в. повторяемость мягких зим увеличилась на 17%, умеренных зим увеличилась на 2%, суровых зим уменьшилась на 19 %.

Анализ изменчивости температурного режима в Баренцевом море, выполненный в работе [Думанская, 2017], показал, что по данным наблюдений на ГМС Баренцева моря в течение 70 лет (с 1945 по 2015 г.) происходило постоянное уменьшение сезонных накопленных за холодный период сумм градусодней мороза (СГДМ). Средняя скорость этого уменьшения на севере моря по данным ГМС Баренцбург составила 9.3°C в год, а на юге моря по данным ГМС Нарьян-Мар – 4.5°C в год. Причем в последний 30-летний период эта скорость была значительно (примерно в 4 раза) выше: 38.7°C в год в Баренцбурге и 15.0°C в год в Нарьян-Маре. Этот факт демонстрирует нелинейность изменчивости температуры воздуха в Баренцевом море и продолжение роста интенсивности потепления в этом районе Земли в настоящее время.

В работах [Гудкович, Карклин и др., 2008; Гудкович, Карклин и др., 2009] предложена гипотеза, объясняющая наблюдаемые климатические изменения эволюцией циркумполярного вихря (который существенно расширился к концу XX в.), вызванной колебаниями солнечной активности, выраженной количеством солнечных пятен. Связь данных актинометрических наблюдений с пятнообразовательной активностью Солнца установлена в работах [Абдусаматов, 2009; Hoyt, Schatten, 1993; Soon, 2005]. К концу XX в. северный циркумполярный вихрь, расширившись, распространил влияние на умеренные широты, через которые пролегли преобладающие траектории циклонов. Это, по мнению авторов работы [Бузин, Гудкович, 2011], создало условия для интенсивной адвекции тепла, влаги и ослабления господствующих здесь сезонных антициклонов. В результате зимой

значительно возросла температура воздуха над континентами и несколько понизилась – над северными областями Атлантического океана и над Баренцевым морем.

Однако исследования, проведенные после написания упомянутых статей, не подтвердили предположение о надвигающемся похолодании климата в баренцевоморском регионе.

Рост температуры тропосферы над Баренцевым морем в течение осенне-зимнего периода может быть связан не только с изменением глобальной атмосферной циркуляции, но и со значительным сокращением площади морских льдов.

Ветер северных направлений способствует повышению сплоченности морского льда вследствие его экспорта из внутренних районов Арктики и усиленному притоку холодных арктических вод из района между Шпицбергом и арх. Земля Франца-Иосифа. При восточных ветрах усиливается вынос холодных вод из Карского моря, с которыми севернее Новой Земли и через новоземельские проливы может поступать лед. Поэтому количество льда в Баренцевом море возрастает. Однако если в начале периода (1978–2016 гг.), анализируемого в работе [Михайлова, Юровский, 2017], ветры северных и южных направлений чередовались друг с другом в северном и восточном районах Баренцева моря, то, начиная с 2005 г., в этих районах устойчиво преобладают ветры южных и западных направлений.

Корреляционный анализ показал, что приземная температура воздуха и зональная составляющая скорости ветра являются основными факторами, регулирующими сплоченность морского льда на юго-востоке и северо-западе Баренцева моря. Коэффициент корреляции между сплоченностью морского льда и зональной составляющей скорости ветра (направленной с запада на восток) равен  $R = -0.61$ . При западном ветре возрастает скорость теплых течений и увеличиваются потоки тепла в юго-западную часть Баренцева моря, что способствует формированию отрицательных аномалий сплоченности, увеличению температур воздуха и поверхностного слоя моря, замедлению процессов льдообразования.

На ветровой режим влияет и миграция арктического фронта (АФ), пересекающего Баренцево море с запада на восток-юго-восток. Даже небольшое смещение арктического атмосферного фронта способно влиять на изменение площади и границы ледяного покрова Баренцева моря [Золотокрылин и др., 2014; Михайлов и др., 2015]. Положение АФ характеризуется минимумом поля приземного давления, максимальной повторяемостью центров циклонов и максимальными величинами горизонтальных гради-

ентов приземной температуры. По этим признакам авторы работы [Титкова и др., 2014] устанавливали положение АФ в промежутки времени 1981–2010 гг. и связывали изменчивость положения АФ со сплоченностью морского льда.

Период с 1981 по 2010 гг. был разбит на два интервала по 15 лет: 1981–1995 гг. (I период) и 1996–2010 гг. (II период). Во II периоде произошло углубление барической ложбины на 3 гПа в западной и центральной областях, что сопровождало усиление интенсивности циклонической деятельности в этом районе. При этом с 1981 по 2010 гг. прослеживались разнонаправленные тенденции изменения циклонической активности в западном (20–40° в. д.) и восточном (40–60° в. д.) секторах Баренцева моря. Наблюдался рост количества циклонов (на 25% за 30 лет по линейному тренду) над свободной ото льда поверхностью в западной части Баренцева моря и уменьшение количества циклонов на 10% в восточной части. Усиление интенсивности циркуляции над свободной ото льда поверхностью Баренцева моря при увеличе-

нии повторяемости западных составляющих ветра влечет за собой усиление Нордкапского течения, что приводит к притоку тёплых АВ и понижению ледовитости в западной части Баренцева моря.

На рис. 4.3.9 показано положение арктического фронта за два анализируемых отрезка времени и положение линии максимального градиента температуры на АТ 1000 гПа в период 1981–2010 гг. на фоне изменения сплоченности льда Баренцева моря во II периоде относительно I периода. В период II по сравнению с периодом I наблюдалась тенденция смещения зоны наиболее частой повторяемости циклонов на арктическом фронте к северу на 2° широты (около 200 км). При этом в южной части Баренцева моря вместе с потеплением произошло изменение ветрового режима, что выразилось в увеличении повторяемости ветров западной четверти относительно повторяемости ветров восточной четверти.

Смещение к северу наиболее часто повторяющихся траекторий центров циклонов сопровождалось уменьшением ледовитости Баренцева моря в

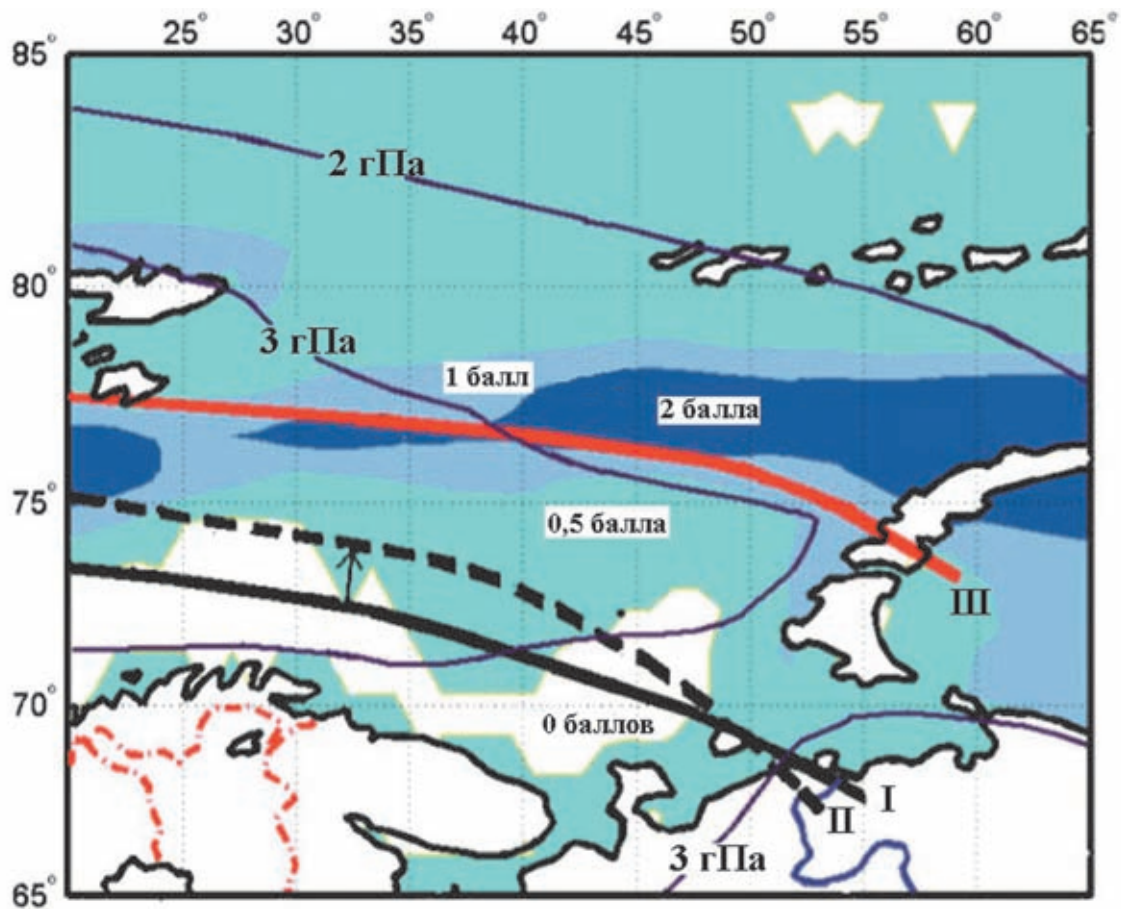


Рис. 4.3.9. Уменьшение сплоченности льда в Баренцевом море в зимние сезоны II периода относительно I периода (цвет, баллы); уменьшение поля приземного давления для тех же периодов (изолинии, гПа); линии максимального числа центров циклонов для I периода (I) и для II периода (II); линия максимального градиента температуры на АТ 1000 гПа в период 1981–2010 гг. (III) [Титкова и др., 2014]

западных и центральных районах на 1 балл за те же периоды (рис. 4.3.9). Зона максимального уменьшения сплоченности льда (на 2 балла) прослеживается в районе 77° с. ш.

### ОСОБЕННОСТИ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Даты ледовых фаз и продолжительность ледового периода в XXI веке существенно изменились: даты ледообразования, по сравнению с многолетними средними значениями, сдвинулись в сторону более поздних сроков на 4–11 дней, а даты очищения моря ото льда – в сторону более ранних сроков в среднем на 5–13 дней.

Полное очищение моря в летний период в XX в. на несколько декад наблюдалось в 7% случаев, а в XXI в. – в 39% случаев (увеличение – 32%). Наибольший сдвиг к северу кромки льда в XXI в. (рис. 4.1.6, б) наблюдается в апреле и сентябре (почти на 2° широты, т. е. около 200 км). Продолжительность ледового периода сократилась в среднем на 2–3 недели и составила для судоходной юго-восточной части моря 205–230 дней [Думанская, 2014].

Ледовитость Баренцева моря в момент максимального развития льда за 91-летний период наблюдений уменьшилась в среднем в соответствии с линейным трендом (рис. 4.3.3) с 72 до 54%. Скорость уменьшения ледовитости составила 2.0% за 10 лет. В XXI в. (в соответствии с более крутым 18-летним линейным трендом) скорость уменьшения ледовитости составляла 7.2% за 10 лет (средняя ледовитость уменьшилась с 58 до 45%). И это наибольшая скорость по сравнению с другими арктическими морями [Screen, Simmonds, 2010; Kern et al., 2010; Cavalieri, Parkinson, 2015].

Ледовитость юго-восточной части Баренцева моря в момент максимального развития льда за 91-летний период наблюдений уменьшилась в среднем в соответствии с линейным трендом (рис. 4.3.4) с 78 до 68%. Скорость уменьшения ледовитости составила 1.1% за 10 лет. В XXI в. скорость уменьшения ледовитости юго-восточной части моря составляла 8.3% за 10 лет (средняя ледовитость уменьшилась с 73 до 58%).

Средняя ледовитость Баренцева моря в месяц наибольшего развития ледяного покрова в начале XXI в. составила 50% (т. е. на 15% меньше, чем для полного ряда наблюдений), а юго-восточной части – 66% (т. е. на 6% меньше, чем для полного ряда наблюдения).

Сплоченность льда в Баренцевом море, как показано в работах [Бузин, Гудкович, 2011; Фролов и др., 2007], наиболее интенсивно уменьшается вдоль 77° с. ш. на востоке Баренцева моря. Коэффициент корреляции между сплоченностью льда и *температу-*

*рой воздуха в северо-восточном районе моря* составил  $R = -0.94$ , между сплоченностью льда и *температурой воздуха на юго-востоке моря* –  $R = -0.92$ .

Средняя толщина припайного льда (наибольшая за ледовый сезон) в Баренцевом море за первые годы XXI в. уменьшилась по данным разных ГМС на 1–11 см [Думанская, 2014].

### О ЦИКЛИЧНОСТИ В ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

В статье [Бузин, Гудкович, 2011], довольно часто цитируемой при описании ледового режима Баренцева моря на рубеже XX и XXI вв., рассмотрена изменчивость среднегодовых значений ледовитости моря за период 1928–2007 гг., выявлен цикл, близкий к 60 годам, который представлен одним из основных ярко выраженных циклов, наблюдающихся в изменчивости ледовитостей всех арктических морей [Фролов и др., 2007; Фролов и др., 2009]. Авторы статьи придерживаются концепции, согласно которой климат Земли в масштабе десятков и сотен лет циклически изменяется в основном под воздействием естественных причин. Сравнительный анализ двух эпох потепления в Арктике (с кульминациями в периоды 1930–1950 гг. и 1987–2007 гг.), по мнению авторов, показал, что:

- в первую и во вторую эпохи потепления имело место уменьшение ледовитости в кульминационные 20-летия по сравнению с предшествующими им 20 годами;

- во вторую эпоху потепления, относящуюся к 1987–2007 гг., температура воздуха по сравнению с первой эпохой понизилась на большей части Северного Ледовитого океана (СЛО), в том числе в Баренцевом море, о чем свидетельствовал отрицательный линейный тренд температуры воздуха в районе ГМС Малые Кармакулы (рис. 4.3.10, а);

- градиент давления на створе Нарьян-Мар – Баренцбург, который проходит перпендикулярно преимущественному направлению перемещения циклонов из района Исландского минимума, имел понижающийся тренд; а поскольку уменьшение градиента давления на этом створе служит показателем уменьшения повторяемости западных (зональных) воздушных переносов (рост повторяемости юго-западных ветров в 1920-х гг. послужил В.Ю. Визе признаком начала эпохи потепления Арктики [Визе, 1923]), понижающийся тренд разности давления указывает на происходящее похолодание климата в регионе Баренцева моря;

- предвестником похолодания климата в Баренцевом море является и понижение температуры воздуха на разрезе «Кольский меридиан» (рис. 4.3.10, в);



– увеличение повторяемости восточных ветров привело к увеличению площади заприпайных полыней в районах ЗФИ и Новой Земли и сказалось на повышении температуры воздуха весной, что вместе с сокращением количества твердых осадков и толщины снега в восточных и северных районах моря [Александров и др., 2010; Брызгин и др., 2010], тем не менее, привело к смещению начала таяния в сторону более ранних сроков, уменьшению альбедо и понижению ледовитости моря в летний период.

Предположение о наступающем похолодании после 2007 г., также как и представления о 60-летнем цикле, изложенные в статье [Бузин, Гудкович, 2011], весьма уязвимы. Ошибочные выводы порождает использование коротких рядов наблюдений за параметрами арктической природной среды. К сожалению, длинные ряды для Арктики пока не накоплены. Кроме того, как показывают исследования, наступление времени максимальной интенсивности западно-восточного переноса не

совпадает со временем минимальной ледовитости Баренцева моря.

В работах [Думанская, 2014; 2015] было сделано предположение о том, что в пределах обширных территорий изменчивость природных явлений подвержена влиянию единых циклов (являющихся, вероятно, результатом внешнего гравитационного воздействия). Периоды циклов были определены по ряду приземной температуры воздуха в Санкт-Петербурге, для которого имелось наибольшее в России число наблюдений. Разложению на гармоники (синусоиды) подвергался 200-летний ряд отклонений СГДМ от генерального тренда. При этом генеральный тренд также описывался синусоидой, наиболее соответствующей полиномиальному тренду второго порядка. Всего была 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

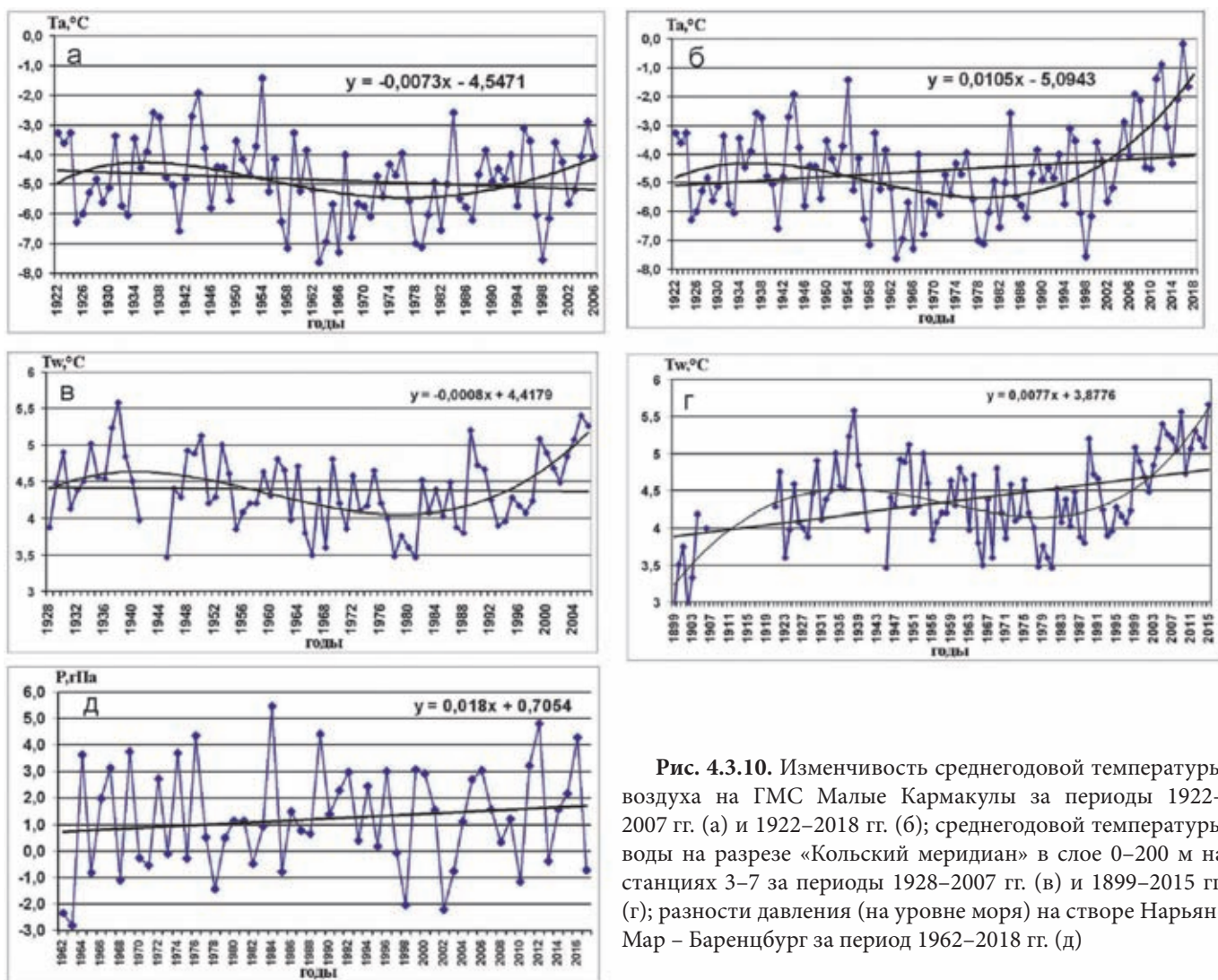


Рис. 4.3.10. Изменчивость среднегодовой температуры воздуха на ГМС Малые Кармакулы за периоды 1922–2007 г. (а) и 1922–2018 г. (б); среднегодовой температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» в слое 0–200 м на станциях 3–7 за периоды 1928–2007 г. (в) и 1899–2015 г. (г); разности давления (на уровне моря) на створе Нарьян-Мар – Баренцбург за период 1962–2018 г. (д)

с циклами солнечной активности. Кроме того, была доказана согласованность изменчивости сумм градусной мороза в Санкт-Петербурге аппроксимированной генеральной гармоникой с периодом 1008.80 года с палеоклиматическими представлениями.

Одной из наиболее сильных гармоник, коэффициенты корреляции между значениями которой и параметрами различных природных процессов значимы, является синусоида с периодом 84.07 года (который оказался близким к орбитальному периоду Урана, равному 84.02 года). По всей вероятности именно эта гармоника (а не 60-летняя), накладывающаяся на длиннопериодную тысячелетнюю гармонику, описывает основные изменения ледовитости Баренцева моря. На рис. 4.3.3 видно, что ледовитость после 2007 г. продолжала уверенно уменьшаться, и, если наши предположения правильны, то кульминацию потепления после 1930–1940 гг. следует ожидать в 2019–2029 гг. (а не в 1987–2007 гг.), после чего может начаться 40-летнее относительное похолодание, тем не менее, наложенное на продолжающийся длиннопериодный тренд потепления климата, следовательно, мало вероятно, что будут наблюдаться столь же суровые зимы, как в 1960–1980-е годы. Увеличение ряда наблюдений (после 2007 года) не подтвердило также факты уменьшения температуры воздуха на

ГМЦ Малые Кармакулы (рис. 4.3.10, б), уменьшения температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» (рис. 4.3.10, г) и уменьшения разности давления на створе Нарьян-Мар – Баренцбург (рис. 4.3.10, д).

В целом для евро-атлантического сектора, включающего акваторию Баренцева моря, наиболее объективно можно проследить изменчивость западно-восточного переноса, используя данные о повторяемости формы W-циркуляции (по классификации Г.Я. Вангенгейма и А.А. Гирса [Вангенгейм, 1952; Гирс, 1974]), для которой характерно частое прохождение атлантических циклонов, большая разность давлений между Азорским максимумом и Исландским минимумом, преобладание западно-восточного переноса. Последние годы над европейской частью России преобладает форма циркуляции W. На рисунке 4.3.11 показана многолетняя изменчивость повторяемости этой формы циркуляции (в днях) для холодного периода года (ноябрь–апрель). Полиномиальный тренд этой характеристики демонстрирует близость периода цикла к 84 годам.

Процессы в Баренцевом море, располагающемся на северо-восточной периферии евро-атлантического сектора, отстают по степени роста (или падения) интенсивности от глобального роста интенсивности западно-восточного переноса в этом секторе

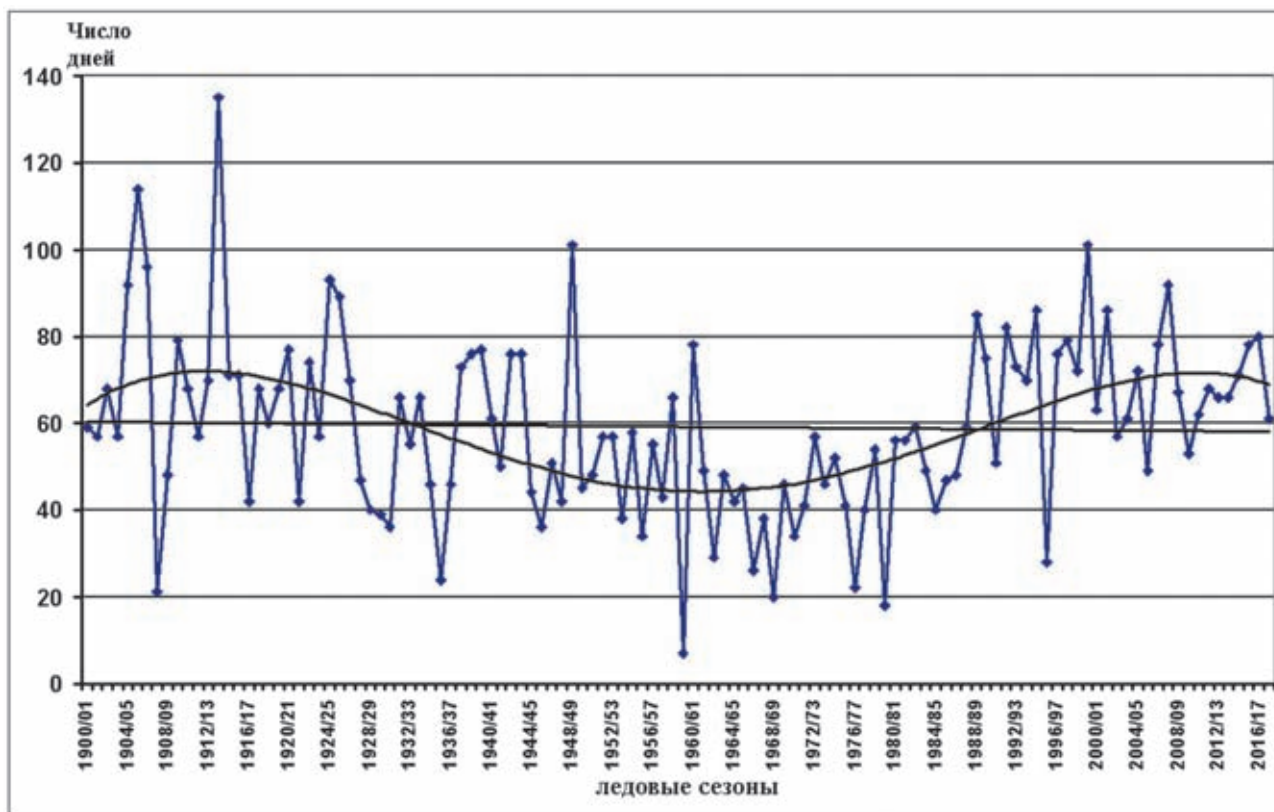


Рис. 4.3.11. Многолетняя изменчивость повторяемости формы атмосферной циркуляции W (в днях) для холодного периода года (ноябрь–апрель)

(табл. 4.3.3). Так, минимальная разность давления между Нарьян-Маром и Баренцбурггом наблюдается через 9 лет после достижения максимума повторяемости атмосферной циркуляции формы W в евро-атлантическом секторе, максимум температуры воздуха в районе Малых Кармакул запаздывает на 17 лет, а максимум температуры воды на разрезе «Кольский меридиан», так же как и минимум ледовитости Баренцева моря, наблюдаются лишь через

20–22 года, т. е. в то время, когда повторяемость атмосферной циркуляции формы W в евро-атлантическом секторе, а также разница давлений между Нарьян-Маром и Баренцбурггом уже находятся в стадии падения. Таким образом, проходит немало лет, прежде чем температура атлантической водной массы и ледовитость Баренцева моря максимально откликаются на смену атмосферных макроциркуляционных процессов.

**Таблица 4.3.3.** Кульминационные десятилетия для изменчивости различных параметров природной среды в баренцевоморском регионе и их запаздывание относительно максимума интенсивности западно-восточного переноса ( $\max_{3-В}$ )

Параметр	Аномалия	Период (годы)	Аномалия	Период (годы)	Аномалия	Период (годы)	Запаздывание относительно $\max_{3-В}$ (годы)
Повторяемость формы атмосферной циркуляции W	max	1913–1923	min	1955–1965	max	1997–2007	0
Разница давлений между Нарьян-Маром и Баренцбурггом	max	н.д.	min	1964–1974	max	2006–2016	9
Средняя годовая температура воздуха в Малых Кармакулах	max	1930–1940	min	1972–1982	max	2014–2024	17
Средняя годовая температура воды на разрезе «Кольский меридиан»	max	1933–1943	min	1975–1985	max (ождается)	2017–2027	20
Ледовитость Баренцева моря	min	1935–1945	max	1977–1987	min (ождается)	2019–2029	22

#### ЛЕДОВЫЕ УСЛОВИЯ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ В ЗИМНИЙ СЕЗОН 2018–2019 гг.

В ледовый сезон 2018–2019 гг. в Баренцевом море наблюдалась типичная для начала XXI века мягкая зима. Сумма градусодней мороза в Нарьян-Маре составила всего лишь 1755°C. Осенью 2018 г. ледообразование, как в районе ЗФИ, так и у материкового побережья юго-восточной части моря началось в первой декаде ноября, что для ЗФИ – более чем на месяц позже нормы, а для материкового побережья – на 10–15 дней позже нормы.

В момент максимального развития ледяного покрова ледовитость всего моря составляла 56%, что на 9% меньше нормы, а ледовитость его юго-восточной части – 57%, что на 15% меньше нормы. При этом толщина припайного льда по данным станций была на 5–15 см меньше нормы.

На рисунке 4.3.12 отображена ледовая обстановка в Баренцевом море в середине марта 2019 г. Освобождение юго-восточной части моря ото льда в

2019 г. произошло в ранние сроки – на 10–15 дней раньше нормы. Таким образом, продолжительность ледового периода на трассе Белое море – Карские Ворота была примерно на месяц меньше нормы, соответствующей умеренной зиме.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ количественных изменений ледовых параметров Баренцева моря, а также факторов, влияющих на формирование ледяного покрова, показал, что в XXI веке:

1. Повторяемость мягких зим увеличилась на 17%, повторяемость суровых зим уменьшилась на 19%.
2. Продолжалось постоянное уменьшение сезонных (накопленных за холодный период) сумм градусодней мороза (СГДМ), причем скорость этого уменьшения существенно возросла.
3. Над всей акваторией моря преобладали ветры западных и южных направлений.
4. Над западной частью моря наблюдался рост ко-



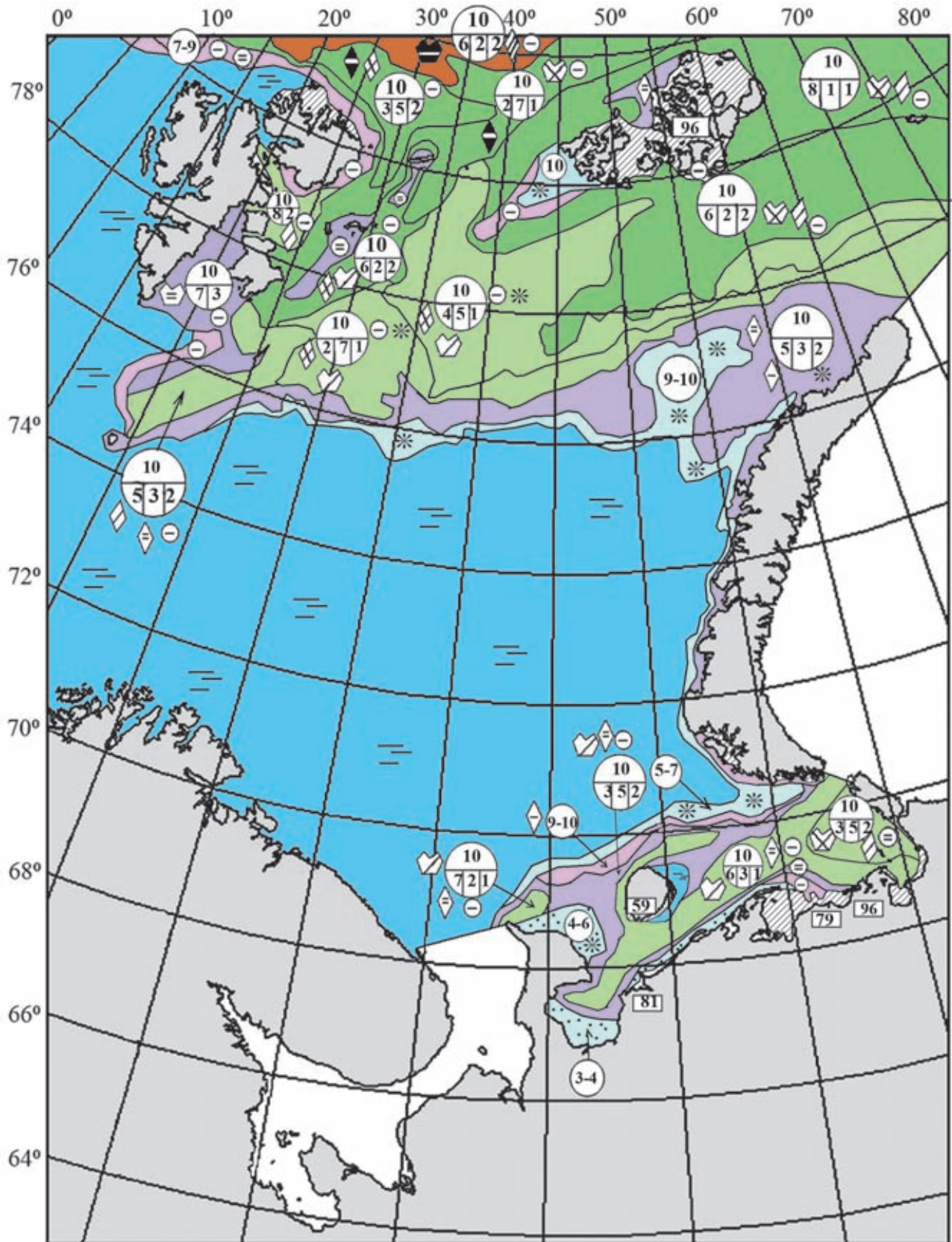


Рис. 4.3.12. Ледовая обстановка в Баренцевом море в середине марта 2019 г.

личества циклонов (на 25%), при этом арктический фронт, а также траектории большей части циклонов, сместились к северу на 2° широты (около 200 км).

5. Существенно увеличилась температура воздуха на ГМС Малые Кармакулы, температура воды на разрезе «Кольский меридиан», атмосферный и океанский потоки тепла, а также скорость течений на западной границе Баренцева моря.

6. На всей акватории произошло уменьшение средней сплоченности льда на 0.5–2.0 балла, причем наибольшее изменение зафиксировано в районе параллели 77° с. ш. (на 2 балла).

7. Даты ледообразования сдвинулись в сторону более поздних сроков на 4–11 дней, а даты очище-

ния моря ото льда – в сторону более ранних сроков в среднем на 5–13 дней. Продолжительность ледового периода сократилась в среднем на 2–3 недели.

8. Скорость уменьшения ледовитости составляла 7.2% за 10 лет (средняя ледовитость уменьшилась с 58 до 45%); это наибольшая скорость по сравнению с другими арктическими морями.

9. Толщина припайного льда по данным ГМС юго-восточной части моря уменьшилась на 1–11 см.

10. Изменчивость ледовитости носит циклический характер, предположительно, период цикла близок к 84 годам, что соответствует орбитальному периоду Урана, минимум ледовитости после 1935–1945 гг. следует ожидать в период 2019–2029 гг.

#### 4.4. Спутниковая альтиметрия Баренцева моря

С.А. Лебедев<sup>1,2</sup>, А.Г. Костяной<sup>3</sup>, С.К. Попов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Геофизический центр РАН, Москва

<sup>2</sup> Майкопский государственный технологический университет, Майкоп

<sup>3</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

<sup>4</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва

Данные спутниковой альтиметрии используются для исследования изменчивости уровня моря и отступления кромки льда в Баренцевом море в 1992–2018 гг. В этом исследовании использовались данные со спутников ERS-1/2, ENVISAT, SARAL/AltiKa и Sentinel-3A/3B. В этот период наблюдалась тенденция к повышению уровня моря со скоростью около 2.31 мм/год, что привело к общему повышению уровня в Баренцевом море примерно на 6 см. Линейные тренды изменения уровня моря колебались от 1.84 мм/год в июле до 4.29 мм/год в сентябре. Средняя скорость отступления кромки льда вдоль треков в северо-восточном направлении составляет 10.9 км/год за тот же период. Было обнаружено, что скорость смещения кромки льда имеет тенденцию к увеличению на 0.30 км/год на градус по долготе в восточном направлении. Таким образом, отступление кромки льда вдоль «восточных» треков происходит быстрее, чем вдоль «западных», что, вероятно, объясняется изменением динамики вод в Баренцевом море.

**Ключевые слова:** Баренцево море, спутниковая альтиметрия, положение кромки льда, уровень моря.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(16)

#### ВВЕДЕНИЕ

Около 90% всей площади арктического шельфа России, составляющего 5.2–6.2 млн км<sup>2</sup>, приходится на перспективные нефтегазоносные области. В том числе 2 млн км<sup>2</sup> – в Западной Арктике на шельфе Баренцева и Карского морей (включая Обскую и Тазовскую губы), где потенциальные ресурсы углеводородного сырья составляют 50–60 млрд м<sup>3</sup> [Zonn et al., 2017]. Даже при низкой геологической и геофизической изученности на шельфе Баренцева моря открыто 11 месторождений, в том числе 4 нефтяных (Приразломное, Долгинское, Варандейское, Медыньское), 3 газовых (Мурманское, Лудловское, Северо-Кильдинское), 3 газоконденсатных (Штокмановское,

Поморское, Ледовое) и одно нефтегазоконденсатное (Северо-Гуляевское). Одно только Штокмановское месторождение – крупнейшее в мире, содержит около 4000 млрд м<sup>3</sup> газа [Чупров, 2008].

Сегодня освоение Арктики требует новых подходов, обеспечивающих рациональное недропользование и охрану природы на основе современной науки и технологий [Мастепанов, 2014], и, прежде всего, использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Спутниковая альтиметрия в настоящее время является единственным методом ДЗЗ, который позволяет исследовать уровень режим как Мирового океана и внутренних морей, так и морей арктического шельфа Российской Федерации (в первую