

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ



**ОБЗОР
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В СЕВЕРНОЙ ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ
2021**

*Под редакцией
д-ра геогр. наук А.С. Макарова*

Санкт-Петербург
ААНИИ
2022

Настоящий обзор содержит описание особенностей развития метеорологических, ледовых и гидрологических процессов в Северной полярной области, Северном Ледовитом океане и его морях в 2021 г. Фактическая информация для составления обзора была получена по данным государственной наблюдательной сети, центров приема спутниковой информации Росгидромета, экспедиционных исследований, проводимых в рамках национальных программ, и наблюдений непосредственно на береговых станциях и НИС «Ледовая база Мыс Баранова».

Обзор продолжает серию ежегодных обзоров, описывающих развитие метеорологических, ледовых и гидрологических процессов в Северном Ледовитом океане.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
1. Метеорологические условия в Северной полярной области	6
1.1. Мониторинг крупномасштабных атмосферных процессов в полярном районе Северного полушария за период январь — декабрь 2021 г.	6
1.2. Мониторинг метеорологических параметров в Северной полярной области.....	15
2. Ледовые условия и процессы в Северном Ледовитом океане и его морях	23
2.1. Развитие ледовых условий в зимний период (январь — март)	24
2.2. Развитие ледовых условий в весенний период (апрель — июнь)	33
2.3. Развитие ледовых условий в летний период (июль — сентябрь).....	41
2.4. Развитие ледовых условий в осенний период (октябрь — декабрь)	50
2.5. Ледово-гидрологические процессы в устьевых областях рек	59
3. Гидрологические и гидрохимические условия в Северном Ледовитом океане и его морях	69
3.1. Термохалинные условия	69
3.2. Уровень арктических морей	74
3.3. Обзор распределения гидрохимических характеристик	79
3.4. Ветровое волнение	86
Заключение	92

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий обзор содержит описание особенностей развития метеорологических, ледовых и гидрологических процессов в Северном Ледовитом океане и его морях в 2021 г. Фактическая информация для составления обзора была получена по данным государственной наблюдательной сети, центров приема спутниковой информации Росгидромета, экспедиционных исследований, проводимых в рамках национальных программ, и наблюдений непосредственно на береговых станциях и НИС и научной обсерватории «Ледовая база Мыс Баранова».

Обзор продолжает серию ежегодных обзоров, описывающих развитие метеорологических, ледовых и гидрологических процессов в Северном Ледовитом океане.

Метеорологический раздел посвящен описанию особенностей развития крупномасштабных метеорологических процессов и изменчивости различных метеорологических элементов. В составлении раздела принимали участие специалисты лабораторий метеорологии (ответственный — зав. лабораторией канд. геогр. наук В.Ф. Радионов) и долгосрочных метеорологических прогнозов (ответственный — зав. лабораторией канд. геогр. наук В.В. Иванов).

Ледовый раздел посвящен описанию развития ледяного покрова и особенностям ледовых явлений в океане, арктических морях и устьевых областях основных арктических рек. Основой для такого анализа послужили данные постоянного спутникового мониторинга, экспедиционных наблюдений на судах и дрейфующих станциях и архивные климатические данные. В составлении раздела принимали участие специалисты отдела ледового режима и прогнозов (ответственные — зав. лабораторией канд. геогр. наук А.В. Юлин и зав. лабораторией канд. геогр. наук В.М. Смоляницкий).

Гидрологический раздел посвящен описанию гидрологических и гидрохимических условий в Северном Ледовитом океане и его морях. В составлении раздела принимали участие специалисты отдела океанологии (ответственный — зав. отделом канд. физ.-мат. наук К.В. Фильчук).

Общее руководство подготовкой обзора осуществлялось директором ААНИИ д-ром геогр. наук А.С. Макаровым.

Обзор предназначен для широкого круга специалистов, занимающихся изучением природной среды Арктики и осуществляющих хозяйственную деятельность в этом регионе.

В составлении обзора принимали участие ведущие специалисты ААНИИ:

В.В. Иванов, заведующий лабораторией (п. 1.1);

Г.А. Алексеенков, начальник отдела (п. 1.1);

Е.И. Александров, старший научный сотрудник (п. 1.2);

В.Р. Байбородова, ведущий инженер (п. 1.2);

А.В. Юлин, заведующий лабораторией (п. 2.1 — 2.4);

В.М. Смоляницкий, заведующий лабораторией (п. 2.1 — 2.4);

Е.А. Павлова, научный сотрудник (п. 2.1 — 2.4);

Д. М. Демчев, ведущий инженер (п. 2.1 — 2.4);
М.Ю. Кулаков, старший научный сотрудник (п. 2.1 — 2.4);
А.Б. Тимофеева, младший научный сотрудник (п. 2.1 — 2.4);
Т. В. Шевелева, ведущий инженер (п. 2.1 — 2.4);
Н.В. Беляева, начальник сектора (п. 2.5);
Н.В. Корельская, ведущий инженер (п. 2.5);
М.А. Ступичева, ведущий инженер (п. 2.5);
М.С. Махотин, заведующий лабораторией (п. 3.1);
Л.А. Тимохов, главный научный сотрудник (п. 3.1);
Н.В. Лебедев, старший научный сотрудник (п. 3.1);
А.Е. Новихин, заведующий лабораторией (п. 3.2);
И.М. Ашик, заместитель директора (п. 3.2);
В.А. Меркулов, научный сотрудник (п. 3.2);
В.И. Дымов, заведующий лабораторией (п. 3.4);
Н.П. Яковлева, научный сотрудник (п. 3.4).

1. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В СЕВЕРНОЙ ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ

1.1. МОНИТОРИНГ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛЯРНОМ РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ЗА ПЕРИОД ЯНВАРЬ — ДЕКАБРЬ 2021 г.

В настоящем разделе приводятся основные результаты мониторинга развития атмосферных процессов различного пространственно-временного масштаба и связанных с ними изменений метеорологических условий в полярном районе Северного полушария за период с января по декабрь 2021 г.

При анализе крупномасштабных процессов 2021 г. учитывались развитие и перестройка общей циркуляции атмосферы (ОЦА), местоположение центра планетарного циркумполярного вихря на изобарической поверхности 500 гПа, географическая ориентация планетарной фронтальной зоны, состояние длинных термобарических волн, развитие стационарных циклонов и антициклонов (центров действия атмосферы), траектории фронтальных циклонов и антициклонов. Оценка пространственно-временной изменчивости процессов проводилась средствами комплексного аэросиноптического анализа термобарических полей в толще тропосферы путем выделения квазиоднородных циркуляционных периодов с однонаправленным развитием крупномасштабных процессов.

Особенности развития атмосферных процессов в 2021 г. представлены в виде годовых и среднемесячных значений числа дней с основными формами и типами циркуляции по классификации Г.Я. Вангенгейма — А.А. Гирса, по данным лаборатории долгосрочных метеорологических прогнозов ААНИИ (табл. 1.1.1 и рис. 1.1.1, 1.1.2), карт среднегодовых полей геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа, приземных значений давления и температуры воздуха и их аномалий (рис. 1.1.3 — 1.1.8). Расчеты среднегодовых значений метеорологических показателей проводились по данным диагноза глобальной прогностической системы метеослужбы США (NOAA и NWS). Расчеты значений аномалий температуры воздуха проводились относительно норм за период с 1961 по 1990 г.

Для ретроспективного анализа климатических условий и периодов потепления и похолодания в полярном районе были использованы среднемесячные и среднегодовые значения аномалий температуры воздуха, рассчитанные в узлах регулярной сетки ($5 \times 10^\circ$) в зоне $70\text{—}85^\circ$ с.ш. вокруг всего Арктического региона.

Для анализа многолетней изменчивости годовых и средних месячных значений аномалий давления для центрального полярного района проводилась по данным осредненных аномалий давления, рассчитанных в узлах регулярной сетки ($5 \times 10^\circ$) в полярной зоне $80\text{—}85^\circ$ с.ш., т.е. в зоне наибольшего влияния арктического антициклона в полярном районе.

Таблица 1.1.1

Годовые значения числа дней с формами и типами циркуляции
и их отклонение от нормы в 2021 г.

Повторяемость	Индекс циркуляции атмосферы					
	Форма			Тип		
	W	C	E	З	М ₁	М ₂
Число дней	104	90	171	83	162	120
Аномалия	–23	–3	26	–45	59	–14

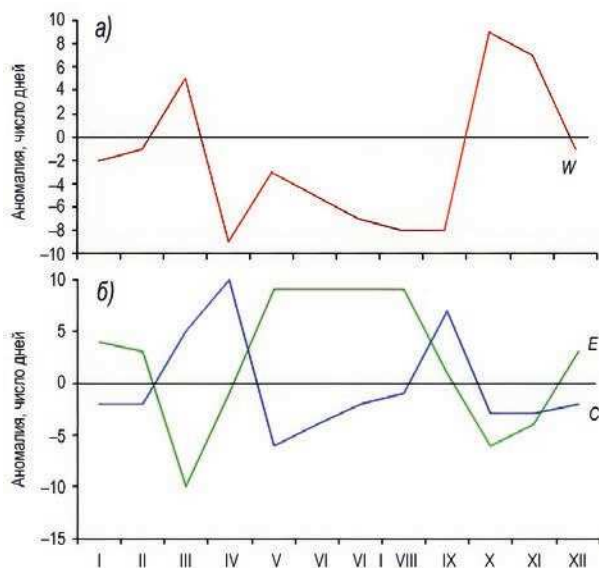


Рис. 1.1.1. Годовой ход среднемесячных значений аномалии числа дней с зональной (а) и меридиональными (б) формами циркуляции в атлантико-евразийском секторе в 2021 г. *W* — западная (зональная) форма, *C* — меридиональная форма, *E* — восточная (меридиональная) форма.

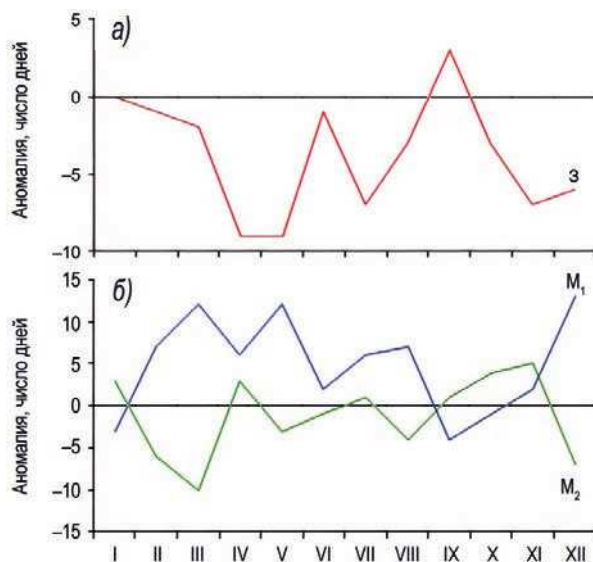


Рис. 1.1.2. Годовой ход среднемесячных аномалий числа дней с зональной (а) и меридиональными (б) формами циркуляции в тихоокеано-американском секторе в 2021 г. *З* — зональная форма, *M₁* — первая меридиональная форма, *M₂* — вторая меридиональная форма.

В первом секторе Северного полушария в 2021 г. преобладали атмосферные процессы восточной формы циркуляции. Число дней с данной формой составило 171, что выше нормы на 26 дней. Во втором секторе Северного полушария в 2021 г., как и в предшествующем году, наиболее велика была повторяемость меридиональных процессов типа *M₁*, которая превысила норму на 59 дней.

Значимой особенностью развития атмосферных процессов в 2021 г. была перестройка в направленности крупномасштабных процессов в атлантико-евразийском секторе Северного полушария от западной (W) к восточной (E) форме циркуляции.

Средние за 2021 г. значения геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа и его аномалии относительно нормы представлены на рис. 1.1.3 и 1.1.4.

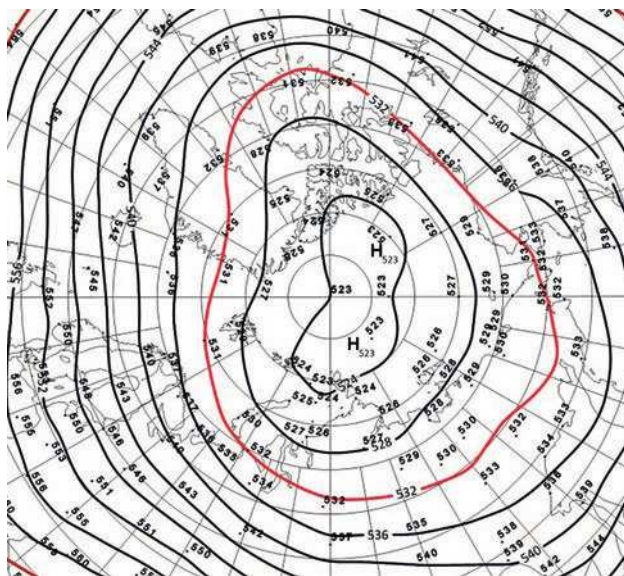


Рис. 1.1.3. Поле среднего геопотенциала (дам) изобарической поверхности 500 гПа за период январь — декабрь 2021 г.

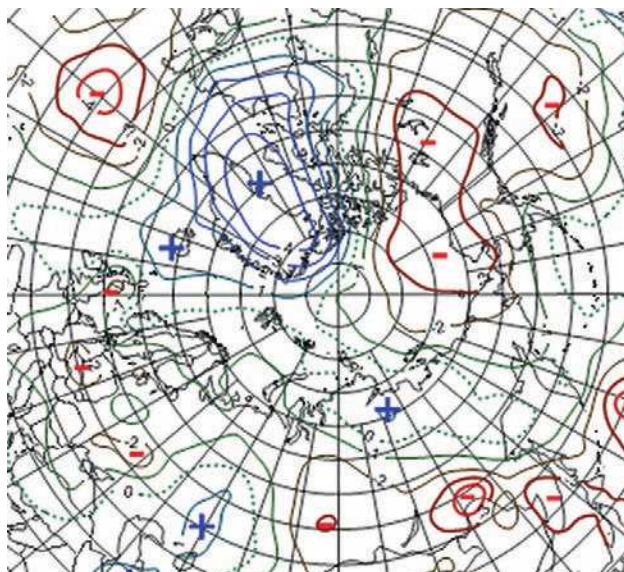


Рис. 1.1.4. Поле средней аномалии геопотенциала (дам) изобарической поверхности 500 гПа за период январь — декабрь 2021 г. по данным диагноза глобальной прогностической системы метеослужб США (NOAA и NWS).

В первом (атлантико-евразийском) секторе полушария по среднегодовым данным в средней тропосфере на изобарической поверхности 500 гПа высотный гребень, блокирующий генеральный западный перенос воздушных масс в толще тропосферы, чаще всего располагался над Азиатским континентом (восточная форма циркуляции *E*). Ось гребня была ориентирована на полярный район, где он часто взаимодействовал с высотным гребнем арктического антициклона. В зонах влияния высотных блокирующих гребней над полярным районом сформировались наиболее крупные положительные аномалии геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа (см. рис. 1.1.4). Вследствие такого характера макропроцессов в большинстве месяцев 2021 г. высотная фронтальная зона (ВФЗ) в атлантико-евразийском секторе Северного полушария в 2021 г. располагалась чаще южнее своего многолетнего положения. В результате смещение циклонов в системах исландского минимума в полярный район происходило по большей части по более низкоширотным по сравнению с нормой траекториям.

При высокой повторяемости низкоширотных траекторий циклонов в системе исландского минимума отмечалось усиление антициклонической деятельности в западном секторе полярного района и преобладание положительных аномалий давления (рис. 1.1.5 и 1.1.6).

Во втором (тихоокеано-американском) секторе полушария высотный блокирующий гребень располагался преимущественно над восточной частью акватории Тихого океана (меридиональная циркуляция типа M_1), под которым в приземном поле преобладал антициклональный режим циркуляции воздушных масс.

В этом секторе Северного полушария в большинстве месяцев циклоны в системах алеутского минимума смещались по ВФЗ через Аляску на район Канады. При такой направленности крупномасштабных атмосферных процессов в восточном секторе полярного района в тыловой части проходящих циклонов преобладал антициклонический режим циркуляции (рис. 1.1.5 и 1.1.6).

Отмеченные особенности крупномасштабных атмосферных процессов в 2021 г. способствовали преобладанию теплых воздушных масс и формированию в

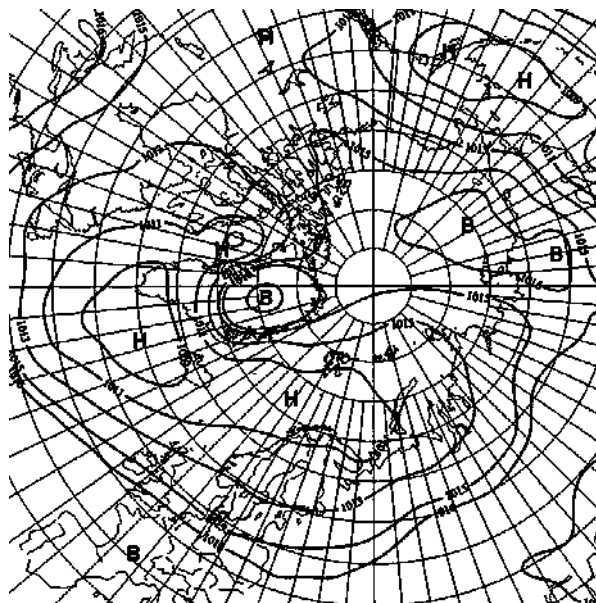


Рис. 1.1.5. Поле среднего приземного давления (гПа) за период январь — декабрь 2021 г.

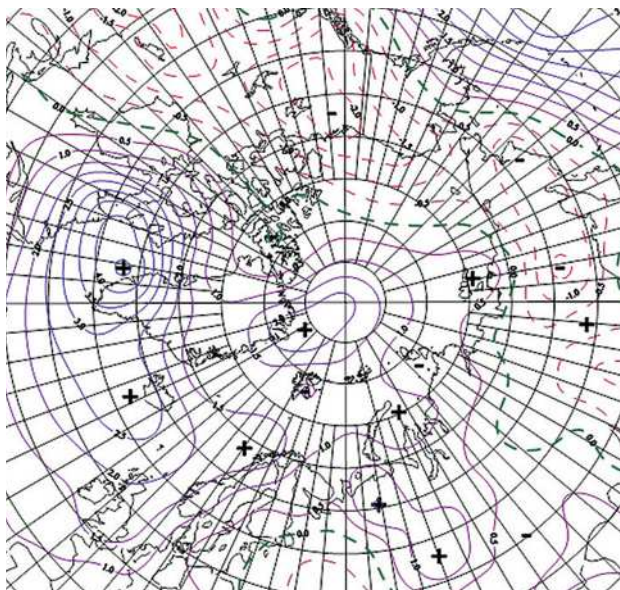


Рис. 1.1.6. Поле средней аномалии приземного давления (гПа) за период январь — декабрь 2021 г. полярном районе в среднем за год фона с положительными аномалиями температуры воздуха. Наиболее крупные среднегодовые положительные аномалии температуры воздуха (до 3—4 °С) отмечались в западном секторе. Этот сектор внес наибольший вклад в формирование высокого температурного фона полярного района в 2021 г. (рис. 1.1.7). При этом фон температуры воздуха в среднем по полярному району в 2021 г. по сравнению с предшествующим 2020 г. понизился на 1,1 °С (рис. 1.1.8).

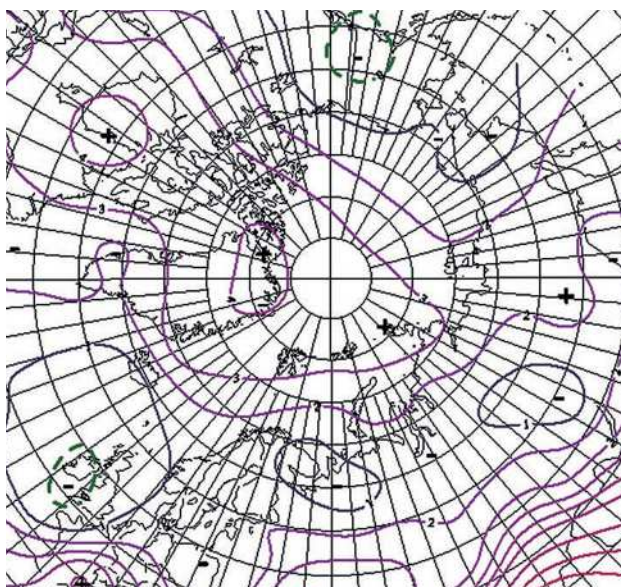


Рис. 1.1.7. Поле средней аномалии приземной температуры воздуха (°С) за период январь — декабрь 2021 г.

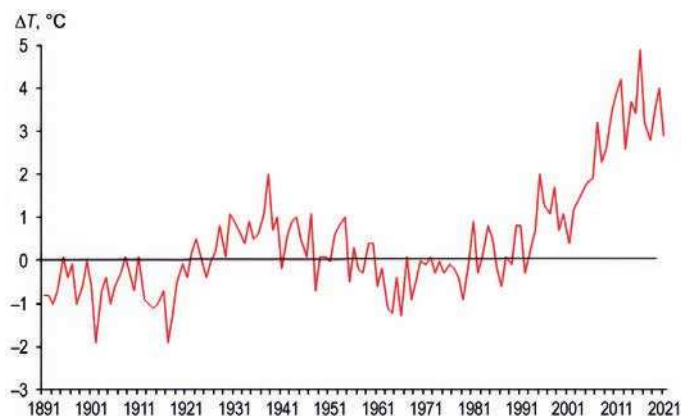


Рис. 1.1.8. Средние годовые значения аномалии температуры воздуха (°C) в широтном поясе 70—85° с.ш. (1891—2021 гг.).

Анализ развития процессов показал, что в течение 2021 г. от месяца к месяцу отмечались частые изменения направленности развития крупномасштабных атмосферных процессов (см. рис. 1.1.1 и 1.1.2).

Внутри года выделен ряд стадий с однонаправленным развитием процессов, каждая из которых характеризуется разновидностью форм и типов циркуляции атмосферы в атлантико-евразийском и тихоокеано-американском секторах Северного полушария.

Схема развития и перестройки крупномасштабных атмосферных процессов в Северном полушарии с января по декабрь 2021 г. по среднемесячным данным выглядит следующим образом:

Январь E_{M_2} → Февраль E_{M_1} → Март $(W+C)_{M_1}$ →
 Апрель $C_{M_1+M_2}$ → Май E_{M_1} → Июнь E_{M_1} →
 Июль E_{M_1} → Август E_{M_1} → Сентябрь $(C+E)_{3+M_2}$ →
 Октябрь W_{M_2} → Ноябрь W_{M_2} → Декабрь E_{M_1}

На рис. 1.1.9 представлены изменения средних месячных значений аномалии давления в центральном полярном районе Арктики в январе — декабре 2021 г.

Перестройка в направленности крупномасштабных атмосферных процессов от западной к восточной форме циркуляции атмосферы отразилась на изменении показателей аномалий давления и температуры воздуха в Арктике.

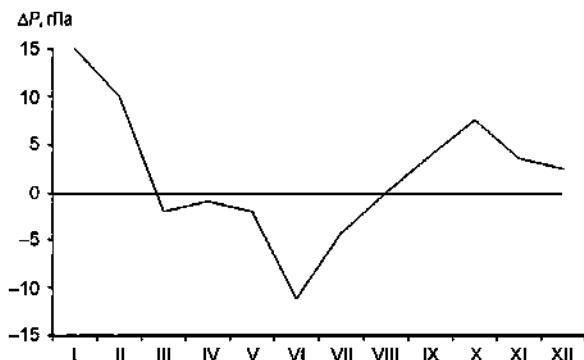


Рис. 1.1.9. Среднемесячные значения аномалии давления в январе — декабре 2021 г. в Центральном полярном районе Арктики.

В период с января по июнь 2021 г. отмечалась устойчивая от месяца к месяцу тенденция к понижению фона атмосферного давления. С января по март наблюдалось преобладание крупных положительных аномалий атмосферного давления, которые с марта по июнь перешли к отрицательным значениям аномалий. В последующий период фон атмосферного давления имел тенденцию к повышению до положительных аномалий.

Под влиянием арктического антициклона наиболее крупные значения с положительными аномалиями (10—16 гПа) имели место в январе и феврале 2021 г. Наиболее активная циклоническая деятельность в полярном районе наблюдалась в июне. В этот период под влиянием глубоких циклонов в системе исландского минимума фон атмосферного давления понизился до крупных отрицательных аномалий давления (–10 ... –12 гПа) (рис. 1.1.9).

В среднем в 2021 г. по сравнению с предшествующим 2020 г. фон атмосферного давления повысился на 4,7 гПа: от отрицательной аномалии –2,9 гПа в 2020 г. до положительной аномалии +1,8 гПа в 2021 г. Как уже отмечалось, смена знака аномалии давления на противоположный в 2021 г. во многом была обусловлена усилением арктического антициклона и уменьшением в сравнении с 2020 г. повторяемости высокоширотных траекторий циклонов.

Внутригодовые изменения среднемесячных значений аномалии температуры воздуха в Арктике в январе — декабре 2021 г. представлены на рис. 1.1.10.

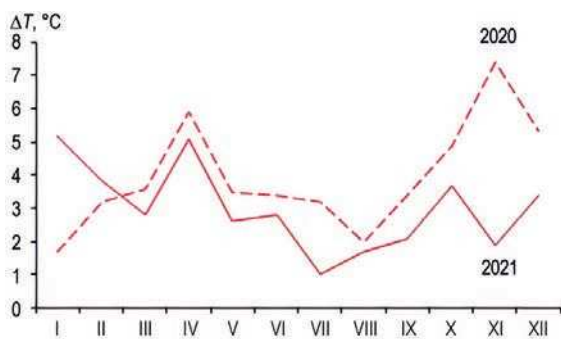


Рис. 1.1.10. Годовой ход среднемесячных значений аномалии температуры воздуха (°C) в широтном поясе 70—85° с.ш. в 2021 г.

Изменения среднегодовых значений аномалии температуры воздуха в 2021 г. для акваторий арктических морей Евразии в сравнении со значениями за 2020 г. приводятся на рис. 1.1.11.

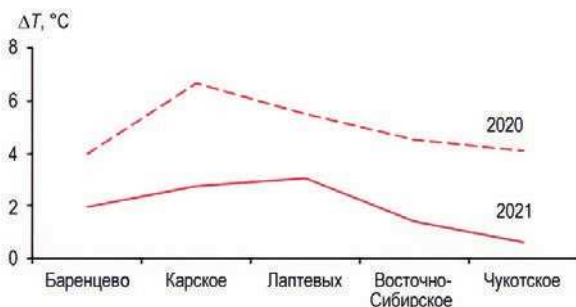


Рис. 1.1.11. Средние годовые значения аномалии температуры воздуха (°C) на акватории арктических морей Евразии в 2020 и 2021 гг.

На акватории всех российских арктических морей в 2021 г. также преобладали положительные аномалии температуры воздуха. Наиболее высокие аномалии температуры воздуха отмечались на акватории морей Лаптевых и Карском, а наиболее низкие — на акватории морей Чукотского и Восточно-Сибирского. По сравнению с 2020 г. в среднем по акватории всех морей аномалии температуры воздуха понизились на 2,9 °С: от 4,9 °С в 2020 г. до 2,0 °С в 2021 г. На трассе СМП в 2021 г. наиболее значительное понижение температурного фона было отмечено на акватории Чукотского моря — на 3,5 °С, т. е. до значений, близких к норме.

Тенденции изменения температуры воздуха в течение 2021 г. в целом согласуются с перестройкой крупномасштабных атмосферных процессов и сменой направленности воздушных потоков. Наибольшие значения положительных аномалий температуры в полярном районе отмечались в холодные месяцы года под влиянием адвекции теплых воздушных масс с акваторий Северной Атлантики и Тихого океана.

Анализ структурных особенностей циркуляции атмосферы внутри каждого месяца в 2021 г. проводился по естественным стадиям однонаправленного развития процессов по 26 разновидностям элементарных синоптических процессов (ЭСП) атлантико-евразийского сектора Северного полушария.

Анализ показал, что для каждого месяца характерна большая повторяемость перестройки процессов. Переходы от одного ЭСП к другому сопровождались сменой знака барических полей и направления преобладающих воздушных потоков в полярном районе Арктики, что было обусловлено крупномасштабной перестройкой разновидностей атмосферных процессов в двух секторах Северного полушария. Разновидности основных форм циркуляции в атлантико-евразийском секторе полушария с типами циркуляции в тихоокеано-американском секторе для каждого ЭСП с января по декабрь 2021 г. представлены в табл. 1.1.2.

Таблица 1.1.2

Каталог макросиноптических процессов по классификации Вангенгейма — Гирса с января по декабрь 2021 г. с внутримесячной детализацией атмосферных процессов по элементарным синоптическим процессам

Январь			Февраль			Март		
ЭСП	А—Е	Т—А	ЭСП	А—Е	Т—А	ЭСП	А—Е	Т—А
1—6	W	M ₂	1—3	W	M ₁	1—8	C	M ₁
7—10	C	M ₂	4—11	E	M ₂	9—11	E	3
11—14	E	3	12—15	C	M ₂	12—14	W	3
15—17	E	M ₁	16—18	E	M ₁	15—19	C	M ₁
18—21	W	3	19—23	E	3	20—24	W	M ₂
22—31	E	M ₂	24—28	W	M ₁	25—27	W	M ₁
						28—31	W	M ₁
Итого	W 10 (–2) C 4 (–2) E 17 (4)	3 8 (0) M ₁ 3 (–3) M ₂ 20 (3)	Итого	W 8 (–1) C 4 (–2) E 16 (3)	3 5 (–1) M ₁ 11 (7) M ₂ 12 (–6)	Итого	W 15 (5) C 13 (5) E 3 (–10)	3 8 (–2) M ₁ 18 (12) M ₂ 5 (–10)
Апрель			Май			Июнь		
ЭСП	А—Е	Т—А	ЭСП	А—Е	Т—А	ЭСП	А—Е	Т—А
1—8	C	M ₁	1—2	C	3	1—11	E	M ₁
9—13	E	M ₂	3—8	W	M ₂	12—16	W	M ₂
14—20	E	M ₂	9—11	E	M ₁	17—21	E	M ₁
21—26	C	M ₁	12—18	E	M ₁	22—23	E	M ₁
27—30	C	M ₂	19—22	E	M ₁	24—30	C	3
			23—27	E	M ₁			
			28—29	C	M ₁			
			30—31	E	M ₂			

Окончание табл. 1.1.2

Итого	W 0 (–9) C 18 (10) E 12 (–1)	3 0 (–9) M ₁ 14 (6) M ₂ 16 (3)	Итого	W 6 (–3) C 4 (–6) E 1 (9)	3 2 (–9) M ₁ 21 (12) M ₂ 8 (–3)	Итого	W 5 (–5) C 7 (–4) E 18 (9)	3 7 (–1) M ₁ 18 (2) M ₂ 5 (–1)
Июль			Август			Сентябрь		
ЭСП	A—E	T—A	ЭСП	A—E	T—A	ЭСП	A—E	T—A
1—2	C	M ₁	1—5	E	M ₁	1—5	C	M ₁
3—7	E	M ₁	6—10	E	M ₁	6—8	E	3
8—15	E	M ₁	11—13	E	3	9—13	W	3
16—17	E	M ₁	14—17	E	3	14—19	C	3
18—24	C	M ₁	18—21	W	3	20—23	C	M ₂
25—28	E	M ₂	22—24	C	M ₁	24—26	E	M ₂
29—31	W	3	25—28	E	M ₁	27—30	E	3
			29—31	C	M ₁			
Итого	W 3 (–7) C 9 (–2) E 19 (9)	3 3 (–7) M ₁ 24 (6) M ₂ 4 (1)	Итого	W 4 (–8) C 6 (–1) E 21 (9)	3 11 (–3) M ₁ 20 (7) M ₂ 0 (–4)	Итого	W 5 (–8) C 15 (7) E 10 (1)	3 18 (3) M ₁ 5 (–4) M ₂ 7 (1)
Октябрь			Ноябрь			Декабрь		
ЭСП	A—E	T—A	ЭСП	A—E	T—A	ЭСП	A—E	T—A
1—2	E	3	1—2	E	M ₂	1—4	E	3
3—6	E	3	3—5	W	M ₂	5—11	E	M ₂
7—10	W	M ₁	6—12	W	3	12—15	W	M ₂
11—17	W	3	13—15	E	M ₂	16—19	E	M ₁
18—19	C	M ₂	16—20	W	M ₁	20—22	C	M ₁
20—22	W	M ₂	21—23	C	M ₂	23—24	W	M ₁
23—24	C	M ₂	24—26	W	M ₁	25—28	E	M ₁
25—31	W	M ₂	27—30	E	M ₂	29—31	W	M ₁
Итого	W 21 (9) C 4 (–3) E 6 (–6)	3 13 (–3) M ₁ 4 (–1) M ₂ 14 (4)	Итого	W 18 (7) C 3 (–3) E 9 (–4)	3 4 (–7) M ₁ 8 (2) M ₂ 18 (5)	Итого	W 9 (–1) C 3 (–2) E 19 (3)	3 4 (–6) M ₁ 16 (13) M ₂ 11 (–7)

Примечания: 1. ЭСП — элементарный синоптический процесс; A—E — атлантико-европейский сектор полушария; T—A — тихоокеано-американский сектор полушария. 2. В скобках приведены значения среднемесячной аномалии повторяемости (число дней) форм (W, C, E) и типов (3, M₁, M₂) атмосферной циркуляции.

1.2. МОНИТОРИНГ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЕВЕРНОЙ ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ

В настоящем разделе приводятся оценки изменения температуры воздуха по районам Северной полярной области (СПО) и акватории арктических морей (рис. 1.2.1). Исходными данными послужили результаты наблюдений 250 стационарных метеорологических станций.

Ввиду обстоятельств непреодолимой силы данный раздел приведён до конца третьего квартала 2021 г. и в дальнейшем освещаться не будет, пока не будет найдена возможность продолжать данные исследования.

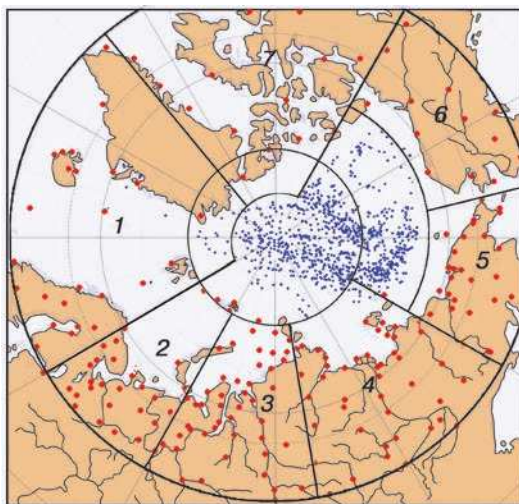


Рис. 1.2.1. Сеть метеорологических станций (красные точки), дрейфующих станций и буев (синие точки) и границы рассматриваемых районов в СПО.

1 — Атлантический, 2 — Североевропейский, 3 — Западно-Сибирский, 4 — Восточно-Сибирский, 5 — Чукотский, 6 — Аляскинский, 7 — Канадский.

Температура воздуха

Основным методом получения пространственно-осредненных по территории Северной полярной области и территориям климатических районов аномалий температуры воздуха является метод оптимального осреднения. Оценки аномалий получены относительно рекомендованного ВМО стандартного периода 1961—1990 гг. В качестве сезонов рассматривались зима (декабрь — февраль), весна (март — май), лето (июнь — август) и осень (сентябрь — ноябрь). За год принимался период с декабря предыдущего года по ноябрь рассматриваемого. Оценка аномалий средних сезонных и среднегодовой температуры воздуха за 2021 г. по отдельным широтным зонам (60—85, 60—70 и 70—85° с.ш.) представлена в табл. 1.2.1.

В целом по широтной зоне 60—85° с.ш. аномалия температуры воздуха составила 1,6 °C и прошедшая зима стала двенадцатой по рангу теплых лет за период с 1936 г. Самая теплая зима отмечалась в 2018 г. с аномалией температуры 4,5 °C. В широтной зоне 70—85° с.ш. аномалия температуры составила 3,6 °C, а в широтной зоне 60—70° с.ш. равнялась 0,0 °C. Прошедший сезон в этих широтных зонах стал соответственно четвертым и двадцать шестым теплым сезоном по рангу теплых лет с 1936 г.

Таблица 1.2.1

**Аномалии (отклонения от нормы за 1961—1990 гг.)
температуры воздуха ΔT на территории СПО
и отдельных широтных зон в среднем за год и за сезоны 2021 г.**

ф° с.ш.	Зима		Весна		Лето	
	ΔT , °C	R	ΔT , °C	R	ΔT , °C	R
70—85	3,6	4	2,7	9	1,2	7
60—70	0,0	26	1,8	11	1,5	4
60—85	1,6	12	2,3	8	1,4	5

Примечание. R — ранг текущих значений в ряду убывающих температур за 1936—2021 гг.

Таблица 1.2.2

**Аномалии (отклонение от нормы за 1961—1990 гг.)
температуры воздуха ΔT для отдельных районов СПО в среднем за сезоны**

Район	Зима		Весна		Лето	
	ΔT , °C	R	ΔT , °C	R	ΔT , °C	R
Атлантический	2,5	9	1,7	7	1,7	2
Североевропейский	0,6	34	2,8	8	1,8	4
Западно-Сибирский	0,3	36	3,4	12	1,2	11
Восточно-Сибирский	0,2	25	2,5	13	2,9	1
Чукотский	1,2	19	2,1	16	1,1	10
Аляскинский	2,4	14	1,4	17	0,4	14
Канадский	4,2	3	2,0	11	0,9	10

Примечание. R — ранг текущих значений в ряду убывающих температур за 1936—2021 гг.

В весеннем сезоне 2021 г. аномалия температуры воздуха СПО составила 2,3 °C. Весна 2021 г. по рангу теплых лет стала восьмой теплой весной за период с 1936 г. Аномалия температуры в широтной зоне 70—85° с.ш. оказалась равной 2,7 °C, а в зоне 60—70° с.ш. составила 1,8 °C. Прошедший сезон в этих широтных зонах стал соответственно девятым и одиннадцатым теплым сезоном по рангу теплых лет с 1936 г.

Лето 2021 г. по рангу теплых лет оказалось пятым теплым летом за период с 1936 г. Аномалия температуры для широтной зоны 70—85° с.ш. составила 1,2 °C, а для широтной зоны 60—70° с.ш. оказалась равной 1,5 °C. Прошедший летний сезон этих широтных зон оказался соответственно седьмым и четвертым по рангу теплых лет за период с 1936 г.

Пространственное распределение аномалий средней сезонной температуры воздуха на территории СПО приведено на рис. 1.2.2. Значения аномалий, пространственно осредненных в целом по рассматриваемым районам, представлены в табл. 1.2.2, а для районов арктических морей и территории суши севернее 70° с.ш. — в табл. 1.2.3.

С января по март наблюдались крупные положительные аномалии температуры воздуха в атлантико-американском секторе СПО. Значения пространственно-осредненных по территориям районов аномалий составили: в Атлантическом — 2,5 °C, Канадском — 4,2 °C и в Аляскинском — 2,4 °C. Для Канадского района прошедшая зима оказалась третьей по рангу теплых лет с 1936 г. В евразийском секторе аномалия составила от 0,2 до 1,2 °C. Аномалия температуры воздуха в весенний период

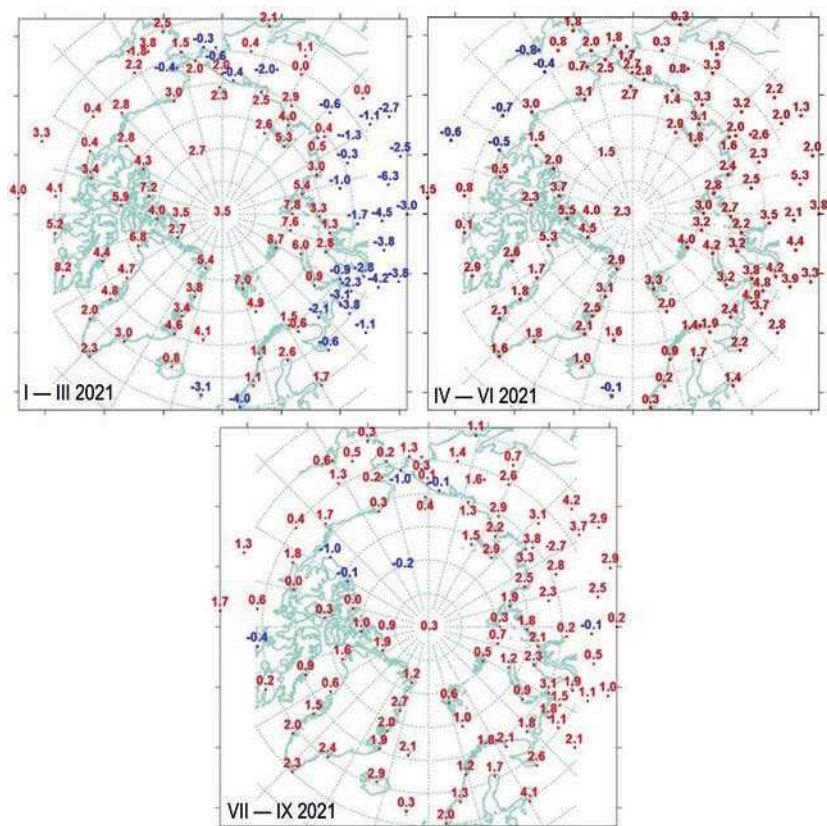


Рис. 1.2.2. Аномалии среднегодового и средних сезонных значений температуры воздуха (°C) на станциях СПО.

Таблица 1.2.3

Аномалии (отклонение от нормы за 1961—1990 гг.) температуры воздуха ΔT в 2021 г. для районов севернее 70° с.ш. в среднем за сезоны

Море, часть климатического района	Зима		Весна		Лето	
	ΔT , °C	R	ΔT , °C	R	ΔT , °C	R
Гренландское и Норвежское моря (северная часть)	4,7	5	2,5	4	1,6	6
Баренцево море	2,8	22	2,6	10	1,2	9
Карское море	4,0	19	3,2	16	1,6	7
Море Лаптевых	3,6	6	2,3	13	2,6	2
Восточно-Сибирское море	2,7	7	2,7	12	1,4	8
Чукотское море	2,1	17	2,6	15	−0,2	24
Море Бофорта	3,2	10	2,4	13	0,2	17
Северная часть Канадского района	5,0	1	3,3	4	0,9	20

Примечание. R — ранг текущих значений в ряду убывающих температур за 1936—2021 гг.

2021 г. в Североевропейском, Западно-Сибирском и Восточно-Сибирском районах составила 2,8; 3,4 и 2,5 °С соответственно. Прошедший сезон в Североевропейском Западно-Сибирском и Восточно-Сибирском районах стал соответственно восьмым, двенадцатым и тринадцатым теплым сезоном по рангу теплых лет с 1936 г.

В летний период можно выделить аномалию температуры в Восточно-Сибирском районе, которая составила 2,9 °С. По рангу теплых лет это наибольшее значение с 1936 г.

В летний период 2021 г. на метеорологических станциях в районах арктических морей и на территории суши севернее 70° с.ш. отмечались преимущественно положительные аномалии температуры воздуха (см. рис. 1.2.2).

Крупные положительные аномалии наблюдались в северной части Канадского района, в северной части Гренландского и Норвежского морей. Пространственно осредненная аномалия в северной части Канадского района составила 5,0 °С. Здесь зимний сезон 2020/21 г. оказался наиболее теплым за весь период наблюдений. В районе северной части Гренландского и Норвежского морей аномалия составила 4,7 °С и прошедшая зима стала третьей по рангу теплых лет с 1936 г. (см. табл. 1.2.3).

В весенний период в районах арктических морей наблюдались только положительные аномалии температуры. Наиболее высокие значения положительных аномалий обнаруживались в районе Карского моря и в северной части Канадского района. В северной части Канадского района прошедший весенний сезон стал четвертым теплым сезоном по рангу теплых лет (табл. 1.2.3).

В летний период аномалия температуры в Восточно-Сибирском районе составила 2,9 °С. По рангу теплых лет это наибольшее значение с 1936 г.

Атмосферные осадки

Оценка многолетних изменений количества осадков в СПО проводится по тем же климатическим районам, что и для температуры воздуха. За холодный сезон принимается период с октября по май, а за теплый — с июня по сентябрь.

В табл. 1.2.4 представлены относительные аномалии сумм осадков за холодный период 2020/21 г. для СПО и для отдельных климатических районов.

Таблица 1.2.4

Относительные аномалии (в процентах от нормы за 1961—1990 гг.) суммы осадков за холодный сезон 2020/21 г.

Климатический район, широтная зона	Относительная аномалия	Максимум	Минимум
Атлантический	78,2	123,2 (2015)	75,2 (1968)
Североевропейский	119,2	137,5 (2020)	68,5 (1980)
Западно-Сибирский	110,3	132,0 (2020)	72,4 (1946)
Восточно-Сибирский	102,1	125,2 (1988)	78,4 (1967)
Чукотский	96,5	139,6 (1954)	60,2 (1982)
Аляскинский	105,0	164,4 (1951)	54,1 (1968)
Канадский	78,3	123,5 (2005)	75,0 (1977)
60—70° с.ш.	96,1	115 (2015)	88 (1968)
70—85° с.ш.	104,2	127 (1989)	84 (1998)
60—85° с.ш.	95,0	117 (1954)	90 (1980)

В табл.1.2.4 представлены относительные аномалии (в процентах от нормы за 1961—1990 гг.) количества осадков за холодный сезон 2020/21 г. для отдельных широтных зон и климатических районов. В целом в СПО количество осадков было ниже нормы (на 5,0 %). Такое количество осадков, выпавших в холодном периоде 2020/21 г. в СПО, оказалось тридцать третьим значением в ряду убывающих значений с 1936 г. К югу от 70° с.ш. осадков в зимнем сезоне выпало также ниже нормы на 3,9 %, а к северу — на 4,2 % выше нормы. Это соответственно двадцать девятое и восемнадцатое значения в ряду убывающих значений с 1936 г.

В табл. 1.2.5 приведены оценки изменения суммы осадков за холодный сезон за весь период наблюдений (с 1936 по 2021 г.) и за последнее 30-летие по южным (60—70° с.ш.) и северным (70—5° с.ш.) частям климатических районов и для районов в целом. На рис. 1.2.3 представлены временные ряды сумм осадков холодного сезона для районов арктических морей и территорий севернее 70° с.ш.

Таблица 1.2.5

**Коэффициенты линейного тренда суммы осадков
за холодный сезон за весь период наблюдений и за последнее 30-летие**

Район, широтная зона	1936—2021 гг.			1992—2021 гг.		
	Вх	Δ %	D	Вх	Δ %	D
Южная часть Гренландского и Норвежского морей	2,06	2,8	5,1	-24,95	-11,7	17,7
Скандинавия и север ЕЧР	14,50	45,6	71,5	-0,52	-0,6	1,2
Западная Сибирь	9,56	38,8	64,5	8,39	11,9	22,9
Восточная Сибирь	2,53	15,7	40,2	0,63	1,4	3,9
Чукотка	0,45	2,0	3,2	3,47	5,5	10,3
Аляскинский (южная часть)	4,29	24,7	28,7	16,31	32,8	38,2
Канадский (южная часть)	-0,82	-6,5	11,7	-9,51	-26,1	47,8
60—70° с.ш.	4,83	16,9	46,8	-0,13	-0,2	0,5
Северная часть Гренландского и Норвежского морей	11,84	43,2	59,3	27,91	35,5	50,6
Баренцево море	7,22	27,4	61,9	10,44	13,8	38,4
Карское море	0,42	2,7	5,3	1,42	3,2	6,8
Море Лаптевых	-2,93	-20,7	39,9	1,83	4,5	11,3
Восточно-Сибирское море	-7,62	-52,3	61,1	-6,68	-16,0	34,9
Чукотское море	-9,12	-44,8	56,2	8,54	14,6	58,3
Море Бофорта	-0,83	-7,3	8,9	-14,19	-44,0	59,0
Канадский (северная часть)	0,30	4,3	5,4	4,11	20,5	16,3
70—85° с.ш.	1,92	11,9	37,7	-2,48	-5,4	10,1
Атлантический	5,07	6,8	17,8	-10,42	-4,9	10,4
Североевропейский	11,57	36,4	76,9	6,04	6,6	23,7
Западно-Сибирский	5,71	23,2	61,3	5,42	7,7	23,6
Восточно-Сибирский	0,43	2,7	8,9	1,03	2,2	7,9
Чукотский	-2,74	-12,4	23,4	1,81	2,8	8,1
Аляскинский	2,14	12,3	18,6	4,97	10,0	16,0
Канадский	-0,39	-3,1	7,2	-8,47	-23,3	48,3
60—85° с.ш.	3,17	11,1	45,2	0,16	0,2	0,9

Примечание. Вх — значение линейного тренда (мм/10 лет); Δ — изменение суммы осадков в процентах от среднего сезонного значения за 1961—1990 гг.; D — вклад (%) тренда в полную дисперсию. Жирным шрифтом выделены статистически значимые на 5 %-м уровне тренды.

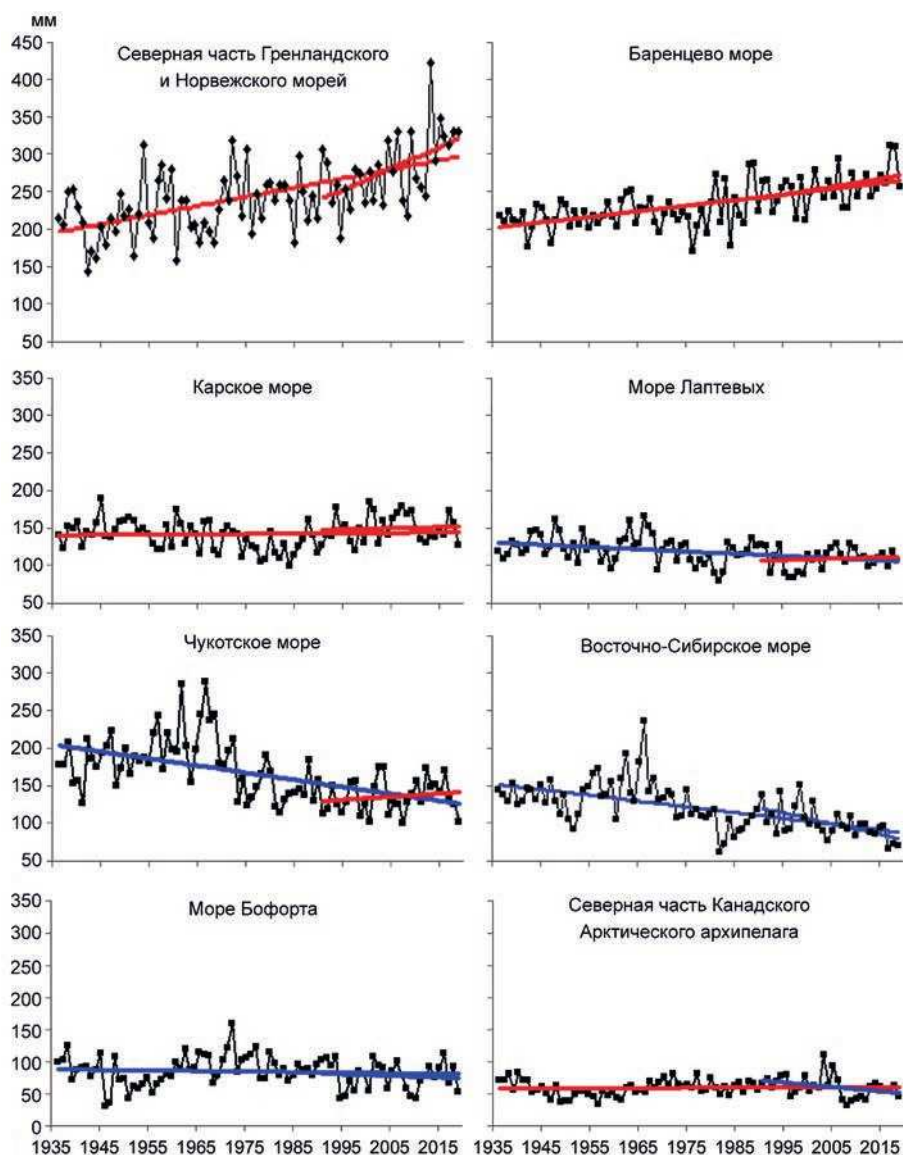


Рис. 1.2.3. Временные ряды сумм осадков (мм) холодного сезона над акваториями морей и Канадским Арктическим архипелагом.

В межгодовых изменениях количества осадков за холодный сезон в период 1936—2021 гг. сохраняется тенденция статистически значимого его увеличения. В широтной зоне к югу от 70° с.ш. количество осадков увеличилось на 17 % (по отношению к норме за 1961—1990 гг.), к северу — на 12 %, а в целом по региону — на 11 %. За этот период количество осадков более всего возросло в Североевропейском (на 36 %) и Западно-Сибирском (на 23 %) районах главным образом за счет увеличения сумм осадков в южной части этих районов на 46 и 39 % соответственно. В Чукотском районе зимние осадки продолжают уменьшаться (на 12 %).

**Коэффициенты линейного тренда сумм осадков теплого сезона
за весь период и за последнее 30-летие**

Район, широтная зона	1936—2021 гг.			1992—2021 гг.		
	Вх	Δ %	D	Вх	Δ %	D
Южная часть Гренландского и Норвежского морей	-0,69	-1,6	5,7	5,12	4,1	14,0
Скандинавия и север ЕЧР	2,82	9,9	24,1	7,58	9,2	19,0
Западная Сибирь	-0,86	-3,0	7,3	4,22	5,1	10,9
Восточная Сибирь	-0,80	-3,9	11,3	-9,26	-15,9	42,8
Чукотка	-0,39	-2,1	3,9	-0,83	-1,5	3,1
Аляскинский (южная часть)	-0,69	-3,0	4,5	6,91	10,6	19,1
Канадский (южная часть)	1,80	10,5	26,7	-2,84	-5,8	12,6
60—70° с.ш.	0,21	0,8	4,4	1,56	2,1	11,3
Северная часть Гренландского и Норвежского морей	1,52	10,6	14,8	10,46	25,5	36,1
Баренцево море	-0,45	-2,5	4,4	4,12	8,0	21,1
Карское море	-0,52	-3,6	5,9	9,71	23,5	33,2
Море Лаптевых	-3,37	-22,9	35,7	-4,31	-10,2	21,0
Восточно-Сибирское море	-5,90	-43,4	51,4	-9,93	-25,5	41,8
Чукотское море	-4,63	-30,7	33,9	-7,31	-16,9	22,1
Море Бофорта	1,01	9,8	13,3	-0,19	-0,6	1,0
Канадский (северная часть)	0,59	7,7	11,0	-2,20	-10,0	12,9
70—85° с.ш.	-0,73	-5,5	17,9	2,50	6,6	30,0
Атлантический	-0,12	-0,4	1,4	6,88	7,2	28,1
Североевропейский	1,30	5,3	15,3	6,26	8,9	22,3
Западно-Сибирский	-0,90	-4,0	11,7	6,55	10,1	24,8
Восточно-Сибирский	-1,56	-8,6	24,8	-7,34	-14,1	39,8
Чукотский	-2,15	-12,4	25,4	-3,55	-7,1	15,8
Аляскинский	-1,95	-9,6	15,3	-6,00	-10,3	21,8
Канадский	1,25	9,2	26,7	-2,67	-6,8	17,1
60—85° с.ш.	-0,57	-2,7	16,5	0,07	0,1	0,7

Примечание. Вх — значение линейного тренда (мм/10 лет); Δ — изменение суммы осадков в процентах от среднего сезонного значения за 1961—1990 гг.; D — вклад (%) тренда в полную дисперсию. Жирным шрифтом выделены статистически значимые на 5 %-ом уровне тренды.

В последнем 30-летнем периоде в осадках холодного сезона в целом по СПО отсутствует значимый линейный тренд. Можно лишь указать на разнонаправленные статистически значимые тренды в отдельных частях районов. Увеличение осадков происходит в южной части Аляскинского района, в акватории северной части Гренландского и Норвежского морей, а также в районе Баренцева моря. Уменьшение осадков наблюдается в южной части Канадского района и района моря Бофорта.

В табл. 1.2.6 приведены оценки изменения сумм осадков теплого сезона за весь период (с 1936 по 2021 г.) по северным (70—85° с.ш.) и южным (60—70° с.ш.) частям климатических районов и для районов в целом. На рис. 1.2.4 представлены временные ряды сумм осадков теплого сезона для районов арктических морей и территорий севернее 70° с.ш.

В межгодовых изменениях осадков теплого сезона за период 1936—2021 гг. сохраняется тенденция к уменьшению количества жидких осадков в целом по региону (на 2,7 % от нормы за 1961—1990 гг.) и к северу от 70° с.ш. (на 5,5 % от нормы).

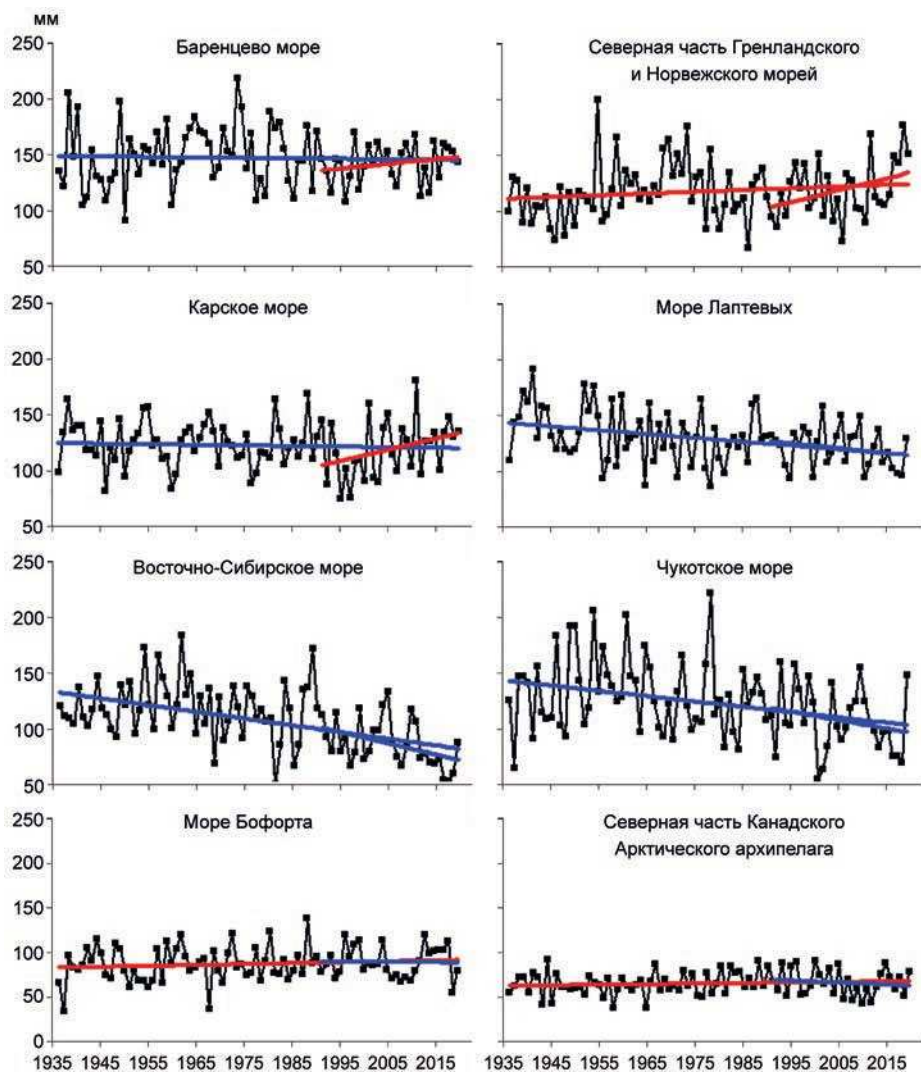


Рис. 1.2.4. Временные ряды сумм осадков (мм) холодного сезона над акваториями морей и Канадским Арктическим архипелагом.

Статистически значимый (на 5-%-ном уровне значимости) тренд осадков теплого сезона обнаруживается только в Канадском районе (1,25 мм за 10 лет).

В арктических морях за весь период наблюдений, за исключением северной части Гренландского и Норвежского морей, а также моря Бофорта, преобладает тенденция к уменьшению количества осадков. Более всего уменьшилось количество выпавших осадков в морях евразийского сектора. Уменьшение сумм осадков составило здесь от 3 % (Баренцево море) до 43 % (Восточно-Сибирское море) нормы.

В последнем 30-летнем периоде в отдельных широтных зонах появилась тенденция к увеличению количества жидких осадков главным образом за счет их увеличения в Североевропейском и Западно-Сибирском районах. Однако значения линейных трендов в этих районах статистически незначимы.

2. ЛЕДОВЫЕ УСЛОВИЯ И ПРОЦЕССЫ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ И ЕГО МОРЯХ

Оценки развития ледовых условий в Северном Ледовитом океане (СЛО) и его морях в 2021 г. получены по данным государственной наблюдательской сети, центров приема спутниковой информации Росгидромета, по данным экспедиционных исследований, проводимых в ААНИИ, на исследовательской базе «Мыс Баранова» и при осуществлении ряда международных проектов.

Оценка квантилей распределения общей сплоченности 5 и 50 % (медиана) выполнена на основе совмещенного месячного массива ледовых карт проекта ВМО «Глобальный банк цифровых данных по морскому льду» за 1945—2004 гг. (включает данные ААНИИ за 1945—1992 гг., Балтийских ледовых служб за 1960—1979 гг., Национального ледового центра США за 1972—2004 гг., Канадской ледовой службы за 1968—1998 гг. и Японского метеорологического агентства за 1970—2006 гг.). Расчет среднемесячных значений общей сплоченности для 2020 г. выполнен на основе массива ежедневных распределений оценки общей сплоченности по алгоритму NASATEAM из архива Национального центра данных США по снегу и льду.

Со всей доступной исходной информацией можно ознакомиться на сайте ААНИИ по ссылке <https://www.aari.ru/data/climate>.

Для иллюстрации ледовых условий в годовом цикле представлены совмещенные региональные карты ААНИИ, Канадской ледовой службы (КЛС) и Национального ледового центра США (НЛЦ). Совмещение карт выполнено путем перекрытия слоев: карты ААНИИ верхний слой, карты КЛС средний слой, карты НЛЦ нижний слой. В результате карты ААНИИ характеризуют ледовые условия морей от Гренландского до Чукотского, а также Берингова, Охотского и Балтийского, карты КЛС — морей Бофорта, Баффина, Лабрадор, Девисова пролива и проливов Канадского Арктического архипелага, а карты НЛЦ — Арктического бассейна, моря Линкольна, южной части Гренландского моря (при этом полный охват карт НЛЦ — вся акватория СЛО и субполярные моря).

Для цветовой окраски карт использован стандарт ВМО (WMO/Std. 1215) для зимнего (по возрасту) и летнего (по общей сплоченности) периодов. В зонах стыковки карт ААНИИ и КЛС, НЛЦ наблюдается определенная несогласованность границ и характеристик ледовых зон вследствие ряда различий в ледовых информационных системах ААНИИ и КЛС, НЛЦ. Однако данная несогласованность несущественна для целей интерпретации ледовых условий в рамках настоящего обзора. Исходная информация доступна на сервере МЦД МЛ по адресам <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004> (карты ААНИИ), <http://wdc.aari.ru/datasets/d0031> (карты КЛС), <http://wdc.aari.ru/datasets/d0032> (карты НЛЦ).

Для расчета аномалий ледовых параметров, включающих в себя оценки состояния припайного льда (толщина и взлом припая) и основные фазы весенних и осенних ледовых явлений (сроки очищения, сроки ледообразования), использовались нормы, рассчитанные для каждой полярной станции с момента начала наблюдений на этой станции по 2021 г. (длина рядов для расчета средних многолетних значений в среднем составляет 55—60 лет).

Для расчета аномалий площади льда в СЛО и его морях, аномалий интенсивности сокращения и нарастания льда в различные периоды года используются нормы,

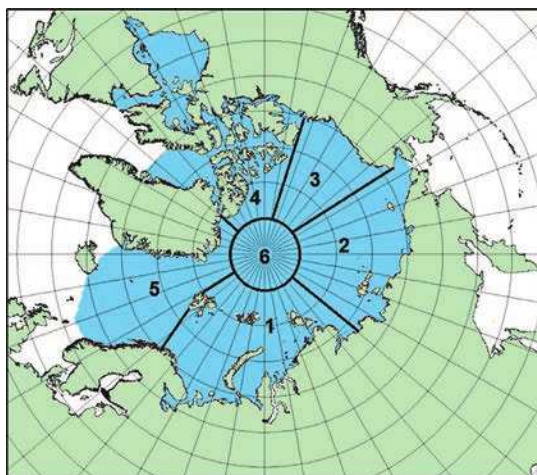


Рис. 2.В.1. Квазиоднородные районы Северного Ледовитого океана.

1 — западный район российского сектора, 2 — восточный район российского сектора, 3 — аляскинский сектор, 4 — канадский сектор, 5 — гренландский сектор, 6 — приполюсный район.

рассчитанные за весь доступный период глобальных микроволновых наблюдений за морским льдом в Северном полушарии с 1978 по 2021 г. На рис. 2.В.1 показаны положение и границы квазиоднородных районов, по которым проводится описание развития ледовых условий.

2.1. РАЗВИТИЕ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД (ЯНВАРЬ — МАРТ)

Характерной чертой осеннего ледообразования 2020 г. является его позднее начало и медленное развитие в морях российского сектора Арктики в начале осеннего периода (сентябрь — октябрь) и значительное увеличение интенсивности развития ледяного покрова в период с ноября по декабрь.

В центральной части СЛО, гренландском и аляскинском секторах Арктики секторе и в проливах Канадского Арктического архипелага начальные льды начали отмечаться в начале сентября. В сентябре и начале октября начальные и молодые льды отмечались только в приграничной зоне остаточных льдов. Полоса молодых льдов расширялась очень медленно. В третьей декаде октября волна ледообразования подошла к северной границе российских арктических морей. Молодыми льдами были полностью покрыты отдельные районы СЛО — проливы Канадского Арктического архипелага и море Бофорта. Одновременно с развитием ледообразования в прикромочной зоне остаточных льдов ледообразование началось в прибрежных районах российских арктических морей — северо-западной части Карского, Лаптевых и восточной части Восточно-Сибирского. Остальные окраинные моря — Гренландское, Баренцево и Чукотское — оставались полностью свободными ото льда.

До конца октября в СЛО и его морях южнее массива старых льдов наблюдались исключительно молодые льды. Переход молодых льдов в возрастную градацию однолетних тонких льдов не наблюдался, что свидетельствует о медленном развитии осенних ледовых процессов в 2020 г. Количество молодых льдов, появившихся в СЛО и его морях с середины сентября по середину октября, составило около 1,8 млн км², что было очень близко к среднему многолетнему значению за длинный ряд наблюдений с 1979 по 2020 г. (норма 1,8 млн км²).

В ноябре интенсивность ледообразования и увеличение площади льда значительно возросли. Наблюдалось очень быстрое покрытие акватории всех арктических морей молодыми льдами. Количество молодых льдов, появившихся в СЛО с середины октября по середину ноября, составило 2,8 млн км², что на 27 % превысило среднее многолетнее значение (2,2 млн км²).

В декабре продолжилось распространение ледяного покрова и увеличение его толщины. Количество молодых льдов, появившихся в СЛО и его морях с середины ноября по середину декабря, составило около 1,5 млн км², что оказалось на 15 % больше среднего многолетнего значения (1,3 млн км²).

В конце декабря 2020 г. общая площадь льдов в СЛО приблизилась к своему среднему многолетнему значению и составляла, по оценкам, выполненным в ААНИИ, около 11,2 млн. км² при норме 11,6 млн. км², т. е. была на 3,3 % меньше средних многолетних значений.

Распределение ледяного покрова по сплоченности и по возрастным градациям за каждый месяц и поля среднемесячного дрейфа за период с января по март 2021 г. приведены рис. 2.1.1 — 2.1.9.

Позднее начало ледообразования в осенний период, но вместе с тем большая интенсивность его развития в ноябре — декабре 2020 г. привели к быстрому увеличению площади ледяного покрова, но медленному возрастанию его толщины. В январе все арктические моря были покрыты дрейфующими и припайными льдами

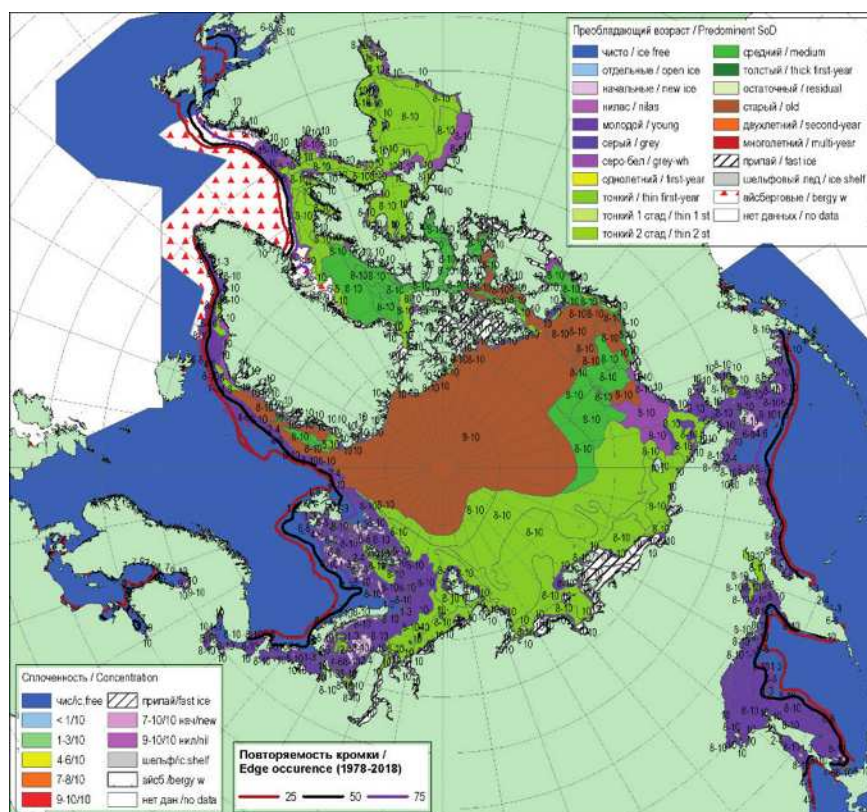


Рис. 2.1.1. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту льда за 14—19 января 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

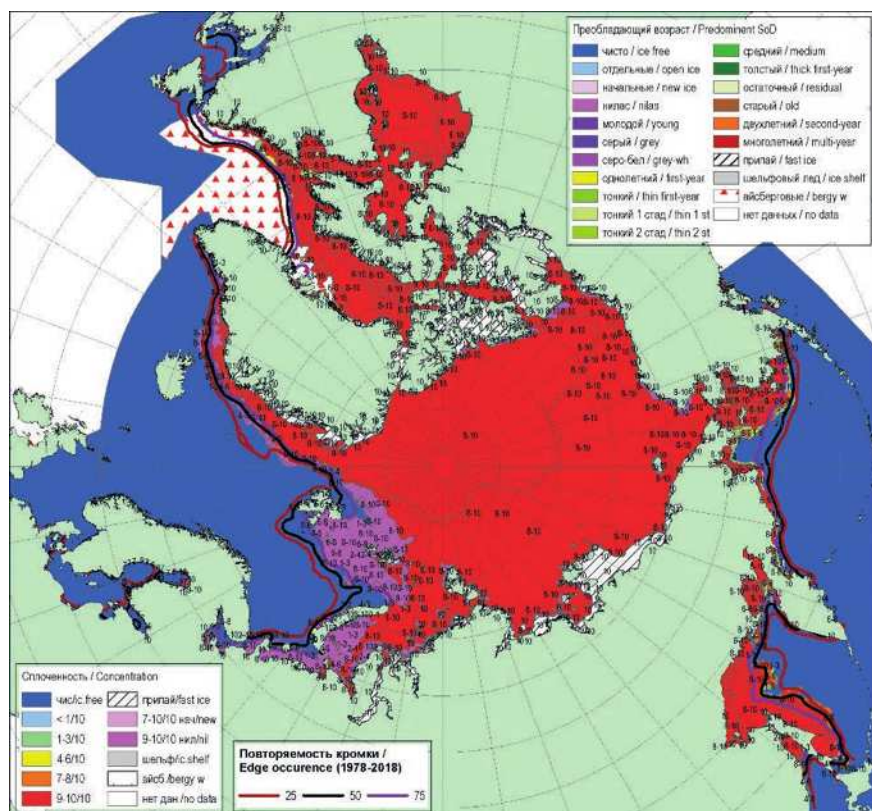


Рис. 2.1.2. Обзорная ледовая карта СЛЮ по сплоченности льда за 14—19 января 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

разного возрастного состава. В середине января в Баренцевом, юго-западной части Карского и в Чукотском море преобладали молодые льды. В остальных морях российской Арктики — северо-восточной части Карского моря, в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском — преобладали однолетние тонкие льды (диапазон толщины 30—70 см).

Появления однолетних средних льдов (диапазон толщины 70—120 см) не наблюдалось даже у границы старых льдов, к северу от широты 85° с.ш., что свидетельствует о низкой интенсивности нарастания ледяного покрова по толщине. Единственная обширная зона с преобладанием однолетних средних льдов появилась в северной части Чукотского моря и в центральной части моря Бофорта.

Основной массив старых льдов наблюдался в приполюсном районе, гренландском и канадском секторах Арктики и в восточной части моря Бофорта.

Становление припая вдоль арктического побережья всех арктических морей и их проливов происходило очень медленно. Припай установился только в районе Новосибирских островов, а также в проливах островов Канадского Арктического архипелага. Становления припая в проливе Вилькицкого не наблюдалось (рис. 2.1.1).

Поле сплоченности льда было достаточно однородным. Преобладали сплоченные льды (сплоченность 9—10 баллов). Граница дрейфующих льдов в Гренландском море была близка к своему среднему многолетнему положению для января, а в Баренцевом море — к экстремально северному положению (рис. 2.1.2).

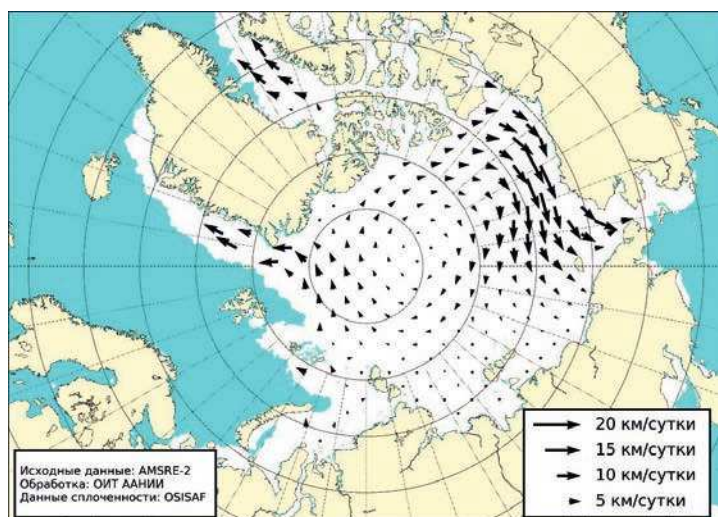


Рис. 2.1.3. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в январе 2021 г., восстановленное на основе корреляционного анализа спутниковых изображений льда в микроволновом диапазоне.

В январе были хорошо развиты основные структуры дрейфа льда в СЛО — Трансарктический перенос льда и Канадский антициклонический круговорот.

Трансарктический перенос льда брал свое начало в северо-западной части моря Лаптевых, от архипелага Северная Земля. Стрежень потока был смещен к западу от своего обычного положения. Поток льдов проходил через приполюсный район. Далее основная его часть выносилась в пролив Фрама. Скорость дрейфа потока льда значительно увеличивалась на подходе и в самом проливе Фрама.

Канадский антициклонический круговорот был развит в своих средних границах. Центр этого гигантского круговорота наблюдался к северу от моря Бофорта на широте 83° с.ш. Скорость дрейфа на западной периферии круговорота была невелика (5 км/сут). На восточной периферии круговорота — у канадского и аляскинского побережья — скорость дрейфа возрастала вдвое, до 10 км/сут. Льды из моря Бофорта выносило в Чукотское море и в северную часть Восточно-Сибирского моря (рис. 2.1.3).

В феврале наблюдались дальнейшее развитие ледяного покрова и нарастание толщины льда. В СЛО преобладали однолетние средние льды (диапазон толщины 70—120 см) и однолетние тонкие льды. Появление однолетних толстых льдов отмечалось в виде неширокой полосы (100—150 км) у границы старых льдов. Большое количество однолетних толстых льдов наблюдалось в море Бофорта. Такое незначительное распространение однолетних толстых льдов является нехарактерным для февраля. В среднем в феврале количество однолетних толстых льдов уже сопоставимо по площади с количеством более тонких однолетних льдов. Это свидетельствует о малой интенсивности нарастания льда по толщине по всему океану.

В морях преобладали однолетние средние и тонкие льды, а в Баренцевом море преобладали однолетние тонкие и молодые льды (рис. 2.1.4).

Припай во всех арктических морях был развит меньше своего среднего многолетнего значения. Отсутствовал припай в проливе Вилькицкого и на восточных подходах к нему со стороны моря Лаптевых. Наблюдался хорошо развитый припай в районе Новосибирских островов и в районе островов Канадского Арктического архипелага.

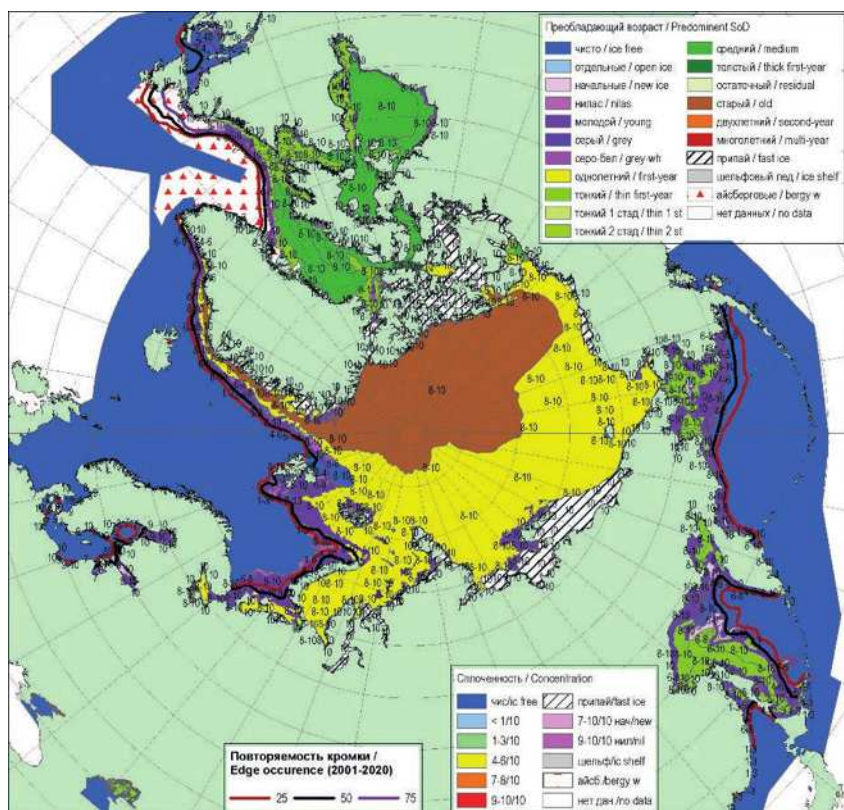


Рис. 2.1.4. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту льда за 18—23 февраля 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

Заприпайные полыньи наблюдались в морях западного района российского сектора Арктики (в Карском море и в западной части моря Лаптевых). В остальных морях развитие заприпайных полыней было незначительным.

На акватории всех российских арктических морей и в море Бофорта наблюдались только однолетние льды, от молодых до однолетних средних. Основной массив старых льдов в СЛО был смещен в гренландский и канадский секторы Арктики и в приполюсный район.

Поле сплоченности льда было достаточно однородным. Преобладали сплоченные льды (сплоченность 9—10 баллов). Граница дрейфующих льдов в западном районе Арктики, в морях Гренландском и Баренцевом была близка к своему среднему многолетнему положению для февраля (рис. 2.1.5).

В феврале в поле дрейфа произошла значительная трансформация основных структур дрейфа льда. Трансарктический перенос льда был смещен на самую западную периферию океанического ледяного массива. Перенос льда начинался из северной части Карского моря и далее по западной периферии ледяного массива узкая полоса Трансарктического переноса выносилась в пролив Фрама. Ширина потока льда и скорость его дрейфа были очень малы.

Канадский антициклонический круговорот был развит очень хорошо и распространился практически на всю акваторию СЛО. Центр круговорота был сильно смещен к евразийскому побережью и располагался к северу от Восточно-Сибирского

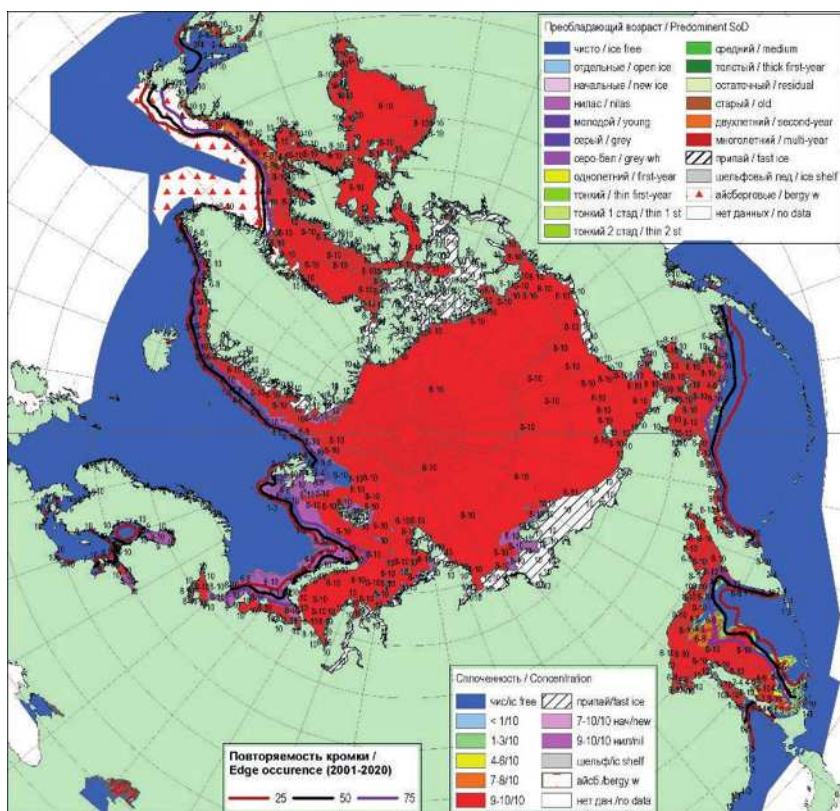


Рис. 2.1.5. Обзорная ледовая карта САО по сплоченности льда за 18—23 февраля 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

моря на широте 80° с.ш. Непосредственно сам круговорот наблюдался в виде гигантского антициклонического вихря и был выражен очень хорошо. Скорость дрейфа льда была небольшой в центре круговорота (менее 5 км/сут) и несколько увеличивались на периферии вихря — до 5 км/сут (рис. 2.1.6).

В марте наблюдалось дальнейшее нарастание и развитие ледяного покрова, но происходило оно с низкой интенсивностью. Об этом свидетельствуют медленное распространение однолетних толстых льдов в арктических морях и более медленное по сравнению с нормой нарастание льда по толщине на полярных станциях.

Однолетних толстых льдов не наблюдалось в Баренцевом и Карском морях. В западном районе российского сектора САО зона однолетних толстых льдов наблюдалась в виде неширокой полосы (100—150 км), расположенной южнее массива старых льдов. В морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском однолетние толстые льды наблюдались только в северной части морей. Исключение составило море Бофорта, в котором наблюдался полный переход однолетних льдов в возрастную градацию однолетних толстых. Подобная ситуация, когда в марте в российских арктических морях еще не наблюдается преобладания однолетних толстых льдов, является достаточно необычной и свидетельствует о слабом нарастании ледяного покрова по толщине.

Во всех морях российского сектора Арктики по-прежнему преобладали льды смешанного возрастного состава: были представлены все возрастные категории. По-

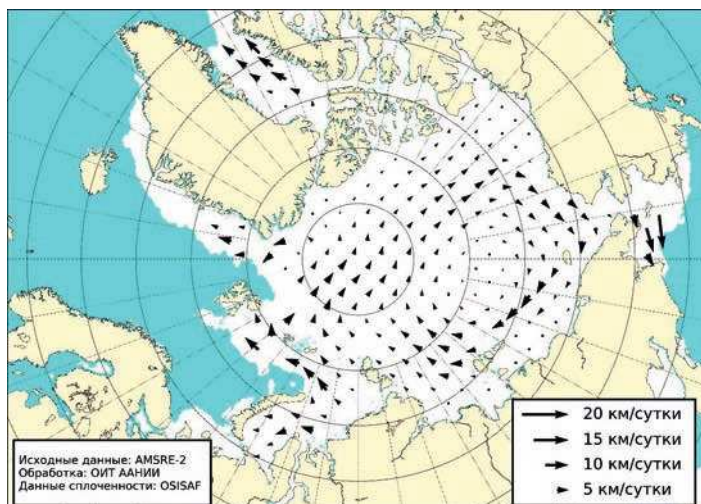


Рис. 2.1.6. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в феврале 2021 г., восстановленное на основе корреляционного анализа спутниковых изображений льда в микроволновом диапазоне.

прежнему наблюдалось много однолетних тонких и молодых льдов в Баренцевом море. Молодые, однолетние тонкие и средние льды преобладали в морях Карском и Лаптевых. В Восточно-Сибирском и Чукотском морях преобладали однолетние средние и толстые льды.

Из-за постоянного выноса льдов в западной части моря Лаптевых не установился припай на восточных подходах к проливу Вилькицкого. В море Лаптевых наблюдалось развитие постоянных заприпайных полыней в западной части моря (рис. 2.1.7).

В поле сплоченности наблюдалась большая однородность, характерная для холодных зимних месяцев, когда любая полынья или разрыв в ледяном покрове сразу покрываются начальными и молодыми льдами. В результате быстрого замерзания появившихся пространств чистой воды в холодные месяцы всегда наблюдается лед сплоченностью 9—10 баллов, хотя толщина его могла быть совершенно различной. Граница дрейфующих льдов в западном районе Арктики, в морях Гренландском и Баренцевом была близка к своему среднему многолетнему положению для марта (рис. 2.1.8).

В марте сформировалось необычное поле дрейфа ледяного покрова, состоящее из одной преобладающей структуры — Трансарктического переноса льда. В принципе, такая картина нечасто, но все-таки наблюдалась и в предшествующие годы. Однако Трансарктический перенос льда, наблюдаемый в марте 2021 г., был развит значительно обширнее и интенсивнее. Две ветви дрейфа из морей Бофорта и Чукотского соединялись в единый поток к северу от острова Врангеля. Далее обширный ледовый поток проходил по северным границам всех арктических морей — от Чукотского до Карского — и через приполюсный район выносился в пролив Фрама. Скорость дрейфа льда в Трансарктическом переносе составляла около 5 км/сут. В Гренландском море и в проливе Фрама скорость дрейфа увеличивалась и достигала в среднем около 10 км/сут. Канадский антициклонический круговорот практически отсутствовал. Результирующее поле среднемесячного дрейфа за март приведено на рис. 2.1.9.

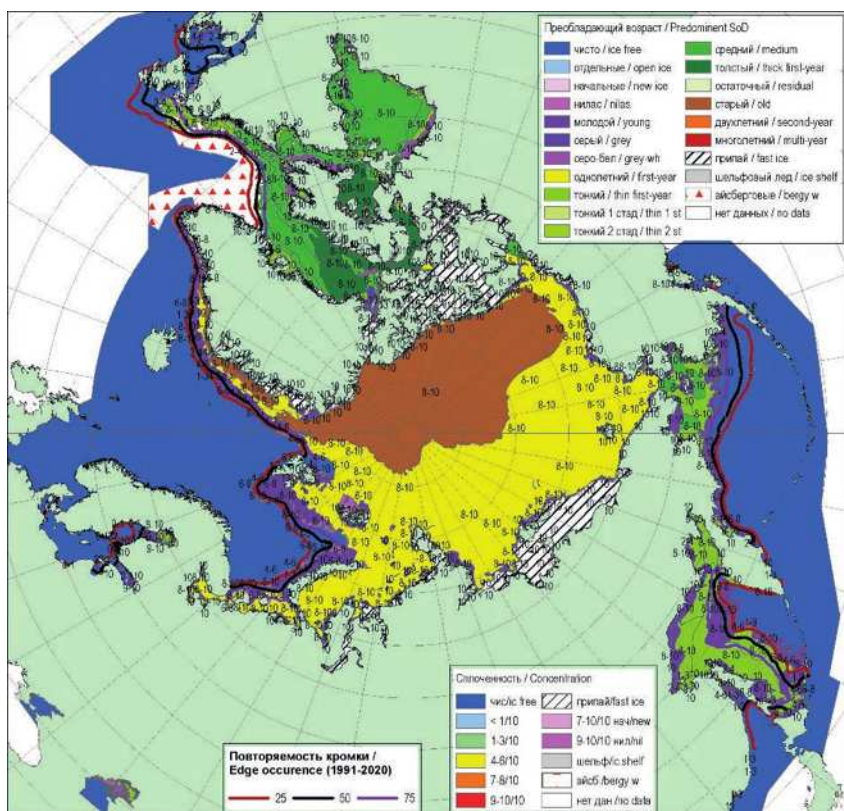


Рис. 2.1.7. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту льда за 18—23 марта 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

Позднее начало ледообразования в российских арктических морях и небольшая интенсивность его нарастания привели к формированию отрицательных аномалий толщины припайного льда. По данным полярных станций в течение зимних месяцев отрицательная аномалия толщины льда сформировалась по всему побережью российских арктических морей. В Карском море аномалия составила –20 ... –40 см, в море Лаптевых и в районе Новосибирских островов –15 ... –20 см. По побережью восточной части Восточно-Сибирского моря и чукотскому побережью аномалии были самыми значительными и составили –50 ... –60 см.

Развитие припая в морях в течение первых зимних месяцев происходило с малой интенсивностью. Площадь припая во всех российских арктических морях была меньше средних многолетних значений. Исключение составил припай в западной части Восточно-Сибирского моря. Припай в западной части Восточно-Сибирского моря был развит на 25 % больше нормы и сохранялся весь квартал. В середине марта суммарная площадь припая в российских арктических морях составила 500 тыс. км² при норме 586 тыс. км², что на 15 % меньше средних многолетних значений. Небольшое развитие припая наблюдалось во всех российских арктических морях, кроме припая района Новосибирских островов.

Общее количество льдов в Северном Ледовитом океане по оценкам, выполненным в ААНИИ, в конце первого квартала 2021 г. составило 11,67 млн км², что на 2,5 % меньше среднего многолетнего значения за длинный ряд наблюдений

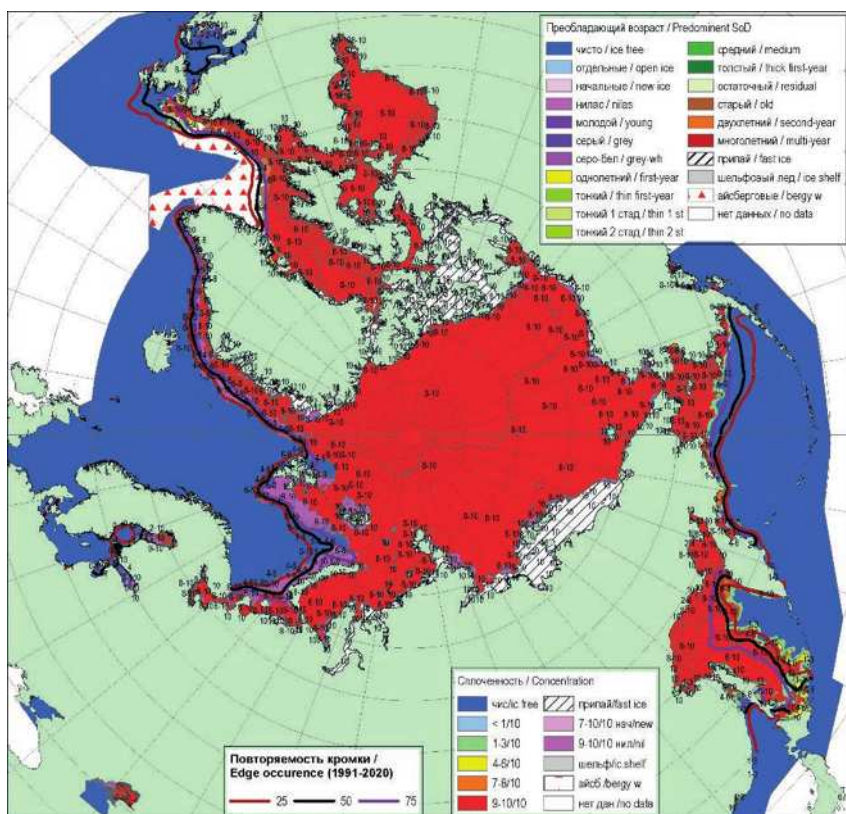


Рис. 2.1.8. Обзорная ледовая карта СЛО по сплоченности льда за 13—17 марта 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

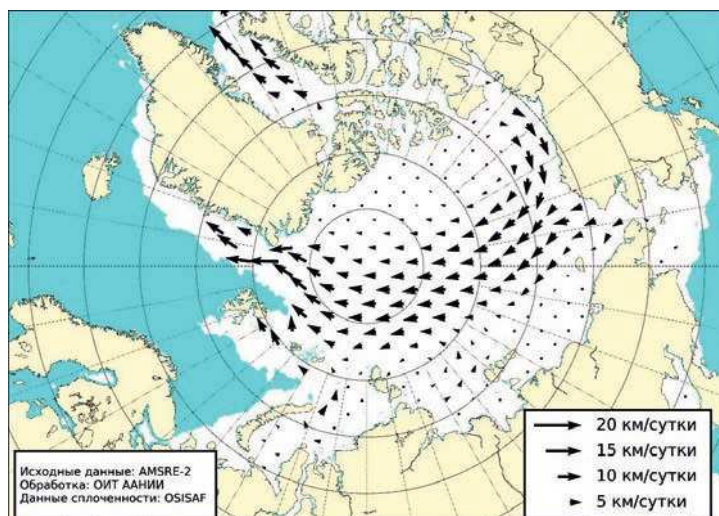


Рис. 2.1.9. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в марте 2021 г., восстановленное на основе корреляционного анализа спутниковых изображений льда в микроволновом диапазоне.

(с 1978 г.). Количество льда, наблюдавшееся в СЛО в конце марта 2021 г., оказалось очень близким к среднему значению за десятилетний период 2011 — 2020 гг. и очень близким к значениям за 2016 и 2018 гг. (рис. 2.4.11 а).

Необходимо отметить, что если в начале января 2021 г. отрицательная аномалия общего количества льда в СЛО составила 3,3 %, то за первый квартал 2021 г. аномалия сократилась на 0,8 % и составила 2,5 %, что свидетельствует о достаточно интенсивном увеличении площади льда в СЛО в первом квартале года. Однако возрастной состав льдов и их толщина в морях и по данным полярных станций были значительно меньше средних многолетних значений.

При развитии площади ледяного покрова, близком к норме, толщина ледяного покрова была значительно меньше нормы по всему СЛО и его морям, что подтверждается модельными расчетами объема накопленного льда в СЛО. Ежедневные оценки объема морского льда СЛО на основе расчетов средневзвешенной толщины льда по совместной модели морского льда — океана HYCOM/CICE Датского метеорологического института приведены на рис. 2.4.10. Как показывает модельный расчет, по объему накопленного льда в СЛО по состоянию на март 2021 г. этот год занимает третье место по рангу в ряду минимумов, уступая только 2017 и 2020 гг.

2.2. РАЗВИТИЕ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД (АПРЕЛЬ — ИЮНЬ)

Распределение ледяного покрова по возрастным градациям и по сплоченности, а также поля среднемесячного дрейфа за каждый месяц за период с апреля по июнь 2021 г. приведены на рис. 2.2.1 — 2.2.10.

В апреле наблюдалось дальнейшее развитие ледяного покрова и переход однолетних средних льдов в возрастную градацию однолетних толстых льдов в некоторых районах окраинных арктических морей. Однако на обширных акваториях Баренцева, Карского и Чукотского морей сохранялось преобладание однолетних средних и тонких льдов. Процесс нарастания льда в весенний период 2021 г. происходил со значительным запаздыванием по сравнению с нормой.

Заприпайные полыньи в арктических морях были развиты слабо. Они отмечались только в западной части моря Лаптевых. В связи с этим молодых льдов (толщиной до 30 см) наблюдалось также мало. Только в Баренцевом море наблюдались обширные зоны молодых льдов в прикромочной зоне.

Был хорошо развит припай в северо-восточной части Карского моря и в районе Новосибирских островов, особенно в западной части Восточно-Сибирского моря, и очень слабо развит припай в районе архипелага Северная Земля со стороны моря Лаптевых, что было обусловлено постоянным выносом льдов из районов этих морей.

Старые льды наблюдались в гринландском и канадском секторах, а также в приполюсном районе Арктики (рис. 2.2.1).

В поле сплоченности ледяного покрова прослеживалась достаточная однородность. Преобладали сплоченные льды, что характерно для зимних месяцев в СЛО. Граница распространения ледяного покрова в Баренцевом море, а также морях Гренландском, Баффина и Лабрадор была близка к среднему многолетнему положению (рис. 2.2.2).

Из основных структур дрейфа льда в СЛО был хорошо развит Трансарктический перенос льдов. Канадский антициклонический круговорот был развит очень слабо и смещен к островам Канадского Арктического архипелага.

Трансарктический перенос льдов был развит очень хорошо и охватывал большую часть акватории океана. Перенос начинался от Берингова пролива, включал в себя входящие потоки из морей Восточно-Сибирского, Лаптевых и Карского, про-

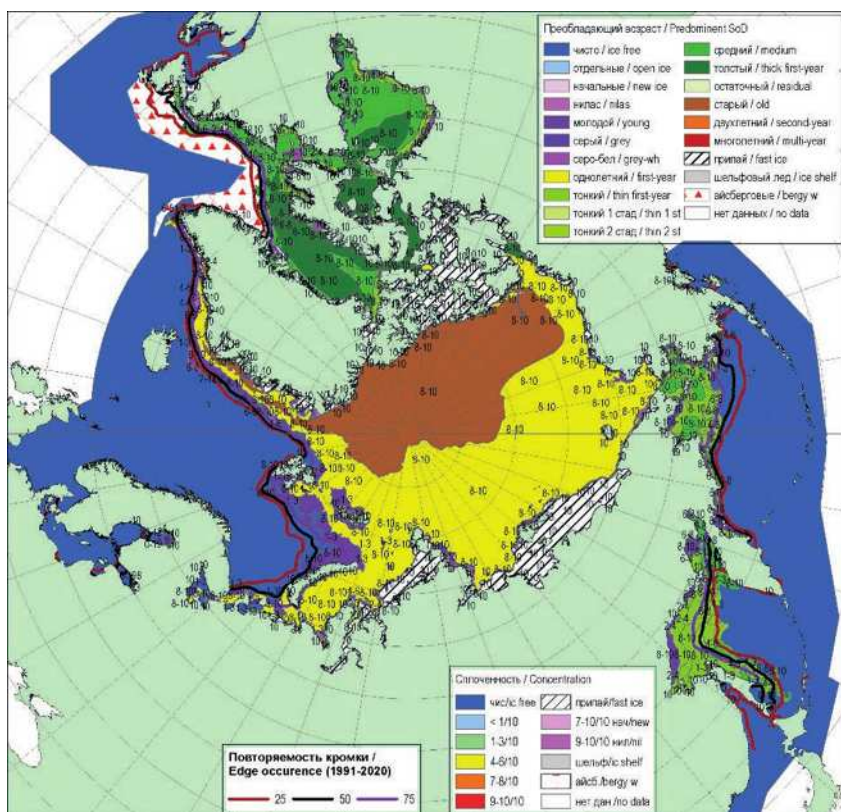


Рис. 2.2.1. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту льда за 16—20 апреля 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

ходил через приполюсный район и выносил льды в пролив Фрама. Скорость дрейфа льдов в Трансарктическом переносе не превышала 5 км/сут. На подходах к проливу Фрама и в самом проливе скорость дрейфа льда возрастала до 15 км/сут (рис. 2.2.3).

В течение мая, который считается месяцем максимального накопления ледяного покрова, в структурном составе дрейфующих льдов Северного Ледовитого океана преобладали однолетние льды (преимущественно однолетние толстые и средние льды), которые составляли около 60 % общего количества льда. Около 35 % общего количества льда составляли старые льды. Остальное количество льдов было представлено молодыми льдами в прикромочной зоне морей (в Гренландском и Баренцевом моря) и в заприпайных полыньях (в западной части моря Лаптевых и в море Бофорта).

Однолетние льды занимали весь российский сектор Арктики, более половины приполюсного района и аляскинского сектора Арктики. Старые льды наблюдались преимущественно в гренландском и канадском секторах Арктики. Из приполюсного района старые льды были в значительной степени вытеснены и замещены однолетними льдами.

Припай в конце периода максимального развития был развит слабо в морях западного района российского сектора Арктики, меньше своего среднего многолетнего значения. Наиболее обширный припай наблюдался в районе Новосибирских островов, в западной части Восточно-Сибирского моря и между островами Канадского

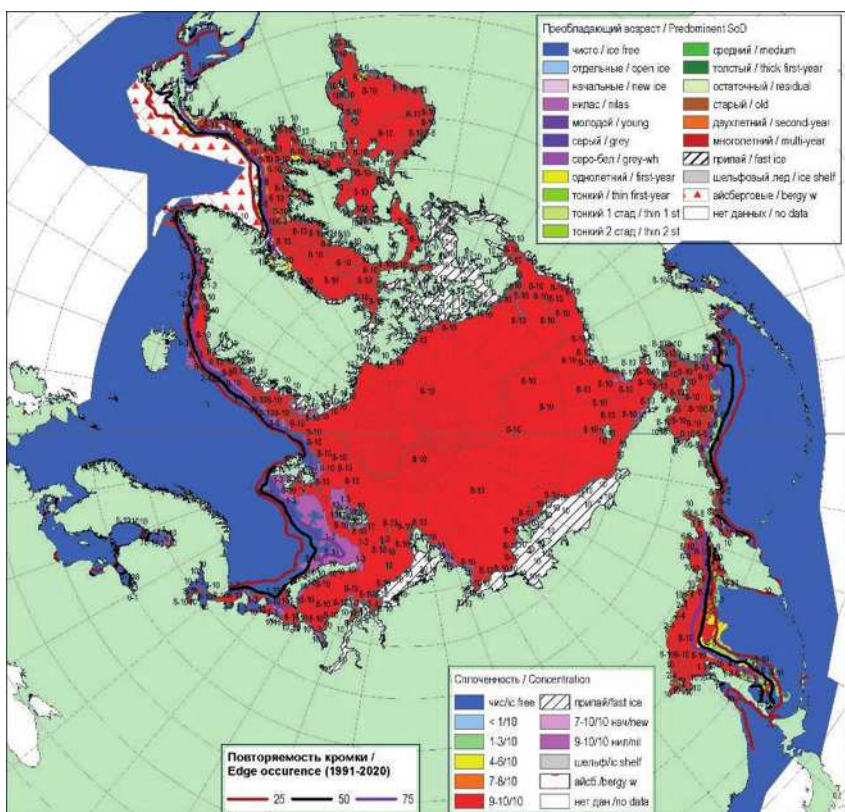


Рис. 2.2.2. Обзорная ледовая карта СЛЮ по сплоченности льда за 16—20 апреля 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

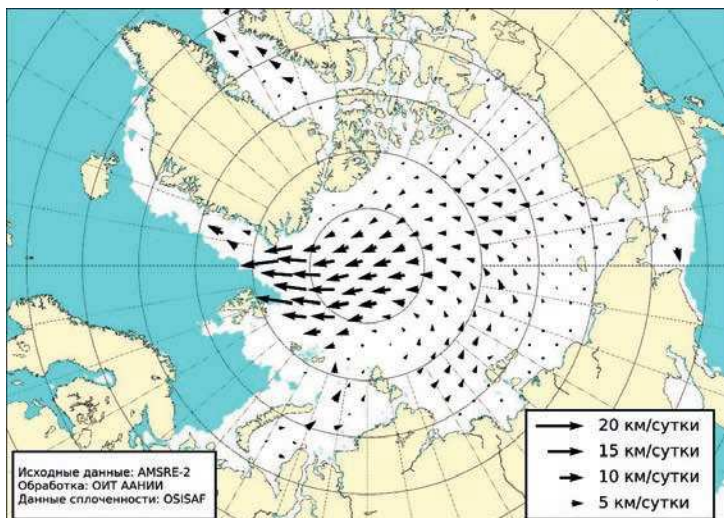


Рис. 2.2.3. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в апреле 2021 г., восстановленное на основе корреляционного анализа спутниковых изображений льда в микроволновом диапазоне.

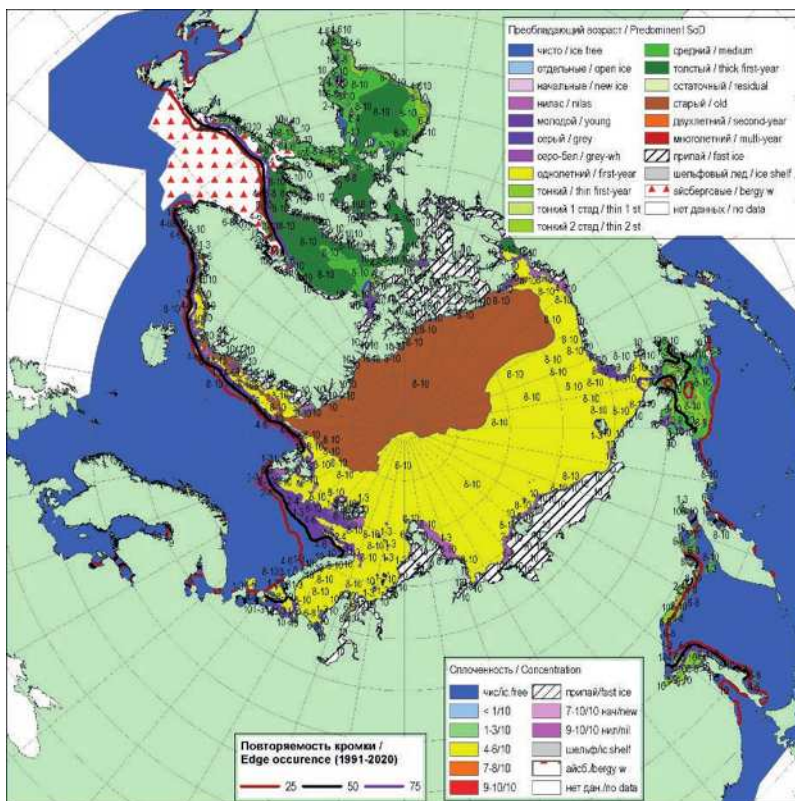


Рис. 2.2.4. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту за 14—18 мая 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

Арктического архипелага. Заприпайные полыньи не имели большого развития: на акватории арктических морей они наблюдались только в западной части моря Лаптевых, вдоль припая остров Северная Земля и в море Бофорта (рис. 2.2.4).

В поле сплоченности ледяного покрова прослеживалась достаточная однородность. По всей акватории океана и морей преобладали сплоченные льды, что характерно для зимних месяцев в СЛО. Граница распространения ледяного покрова в Баренцевом море, а также морях Гренландском, Баффина и Лабрадор была близка к среднему многолетнему положению (рис. 2.2.5).

Были хорошо развиты зоны заприпайных полыней и сформировавшихся разрывов в морях Гренландском, Баренцевом и Бофорта, а также в западной части моря Лаптевых. Однако обширного развития заприпайных полыней в арктических морях не наблюдалось. В мае 2021 г. в арктических морях не произошло формирования крупных очагов очищения, как это наблюдалось в предыдущие годы.

В мае в поле дрейфа произошли существенные изменения. Вместо наблюдавшегося в апреле преобладающего Трансарктического переноса, который распространялся практически на всю акваторию СЛО, в мае вновь сформировались традиционные структуры дрейфа льда — Трансарктический перенос и Канадский антициклонический круговорот.

Трансарктический перенос льда начинался от северной части архипелага Новосибирских островов, проходил через приполюсный район, подходил к побе-

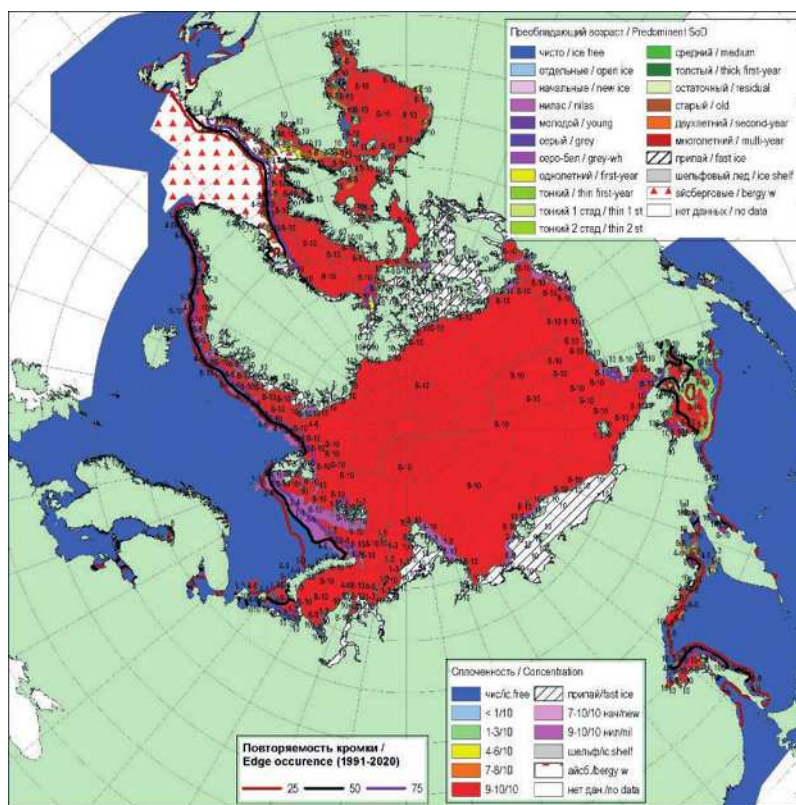


Рис. 2.2.5. Обзорная ледовая карта СЛО по сплоченности льда за 14—18 мая 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

режью Гренландии и далее выносил льды в пролив Фрама. В приполюсном районе наблюдалось замещение старых льдов однолетними льдами.

Канадский антициклонический круговорот также получил хорошее развитие. Его центр располагался над северной частью моря Бофорта. В приполюсной ветви и у побережья островов Канадского Арктического архипелага скорость дрейфа льдов не превышала 5 км/сут. На периферии круговорота, в морях Бофорта и Чукотском, скорость дрейфа льда достигала 10 км/сут (рис. 2.2.6).

В весенний период интенсивность нарастания толщины льда была близка к норме во всех морях российского сектора Арктики, что привело к некоторому сокращению отрицательных аномалий толщины льда, сформировавшихся в зимние месяцы. Во всех морях наблюдалось уменьшение отрицательной аномалии с $-20 \dots -40$ до $-10 \dots -30$ см. В некоторых районах побережья, таких как амдерминское побережье в юго-западной части Карского моря, район Новосибирских островов, прибрежная центральная часть Восточно-Сибирского моря, толщина льда в припае приблизилась к средним многолетним значениям.

Распределение аномалии толщины льда по морям в конце периода нарастания (середина мая) приведены на рис. 2.2.7.

В июне началось быстрое очищение акваторий, которое наблюдалось во всех окраинных морях российского сектора Арктики, от Баренцева моря до Чукотского. Центры очищения развились во всех арктических морях, кроме моря Бофорта.

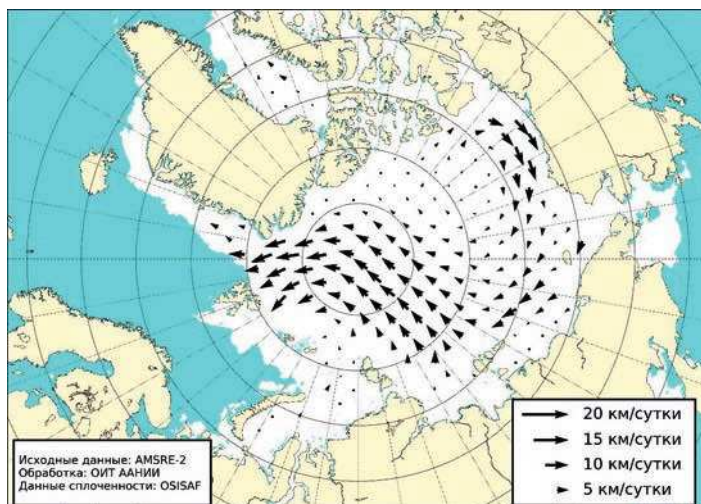


Рис. 2.2.6. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в мае 2021 г., восстановленное на основе корреляционного анализа спутниковых изображений льда в микроволновом диапазоне.

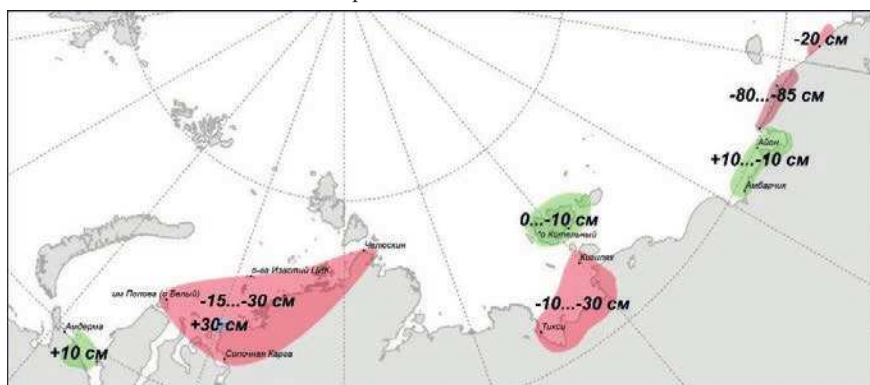


Рис. 2.2.7. Аномалии толщины льда в морях российских секторов Арктики по данным полярных станций на период максимального нарастания в 2021 г. (конец мая).

Обширное разрежение развилось под архипелагом Новая Земля в юго-восточной части Карского моря. Гигантское разрежение, экстремально большое для июня, развилось в западной части моря Лаптевых. Очень большое разрежение развилось к северу от припая Новосибирских островов. Крупные локальные разрежения наблюдались в центральной прибрежной части Восточно-Сибирского и в юго-западной части Чукотского моря.

Во всех российских арктических морях сформировались крупные отрицательные аномалии ледовитости. В третьей декаде июня аномалии ледовитости в морях составили: в Баренцевом море -22% , в юго-западной части Карского моря -24% , в западной части моря Лаптевых -41% , в западной части Восточно-Сибирского моря -17% , в Чукотском море -26% .

Наблюдалось аномально большое отступление границы дрейфующих льдов в северо-восточной части моря Баренцева и в западной части моря Лаптевых. Очищение этих морей в первую очередь было связано с интенсивным дрейфом льда

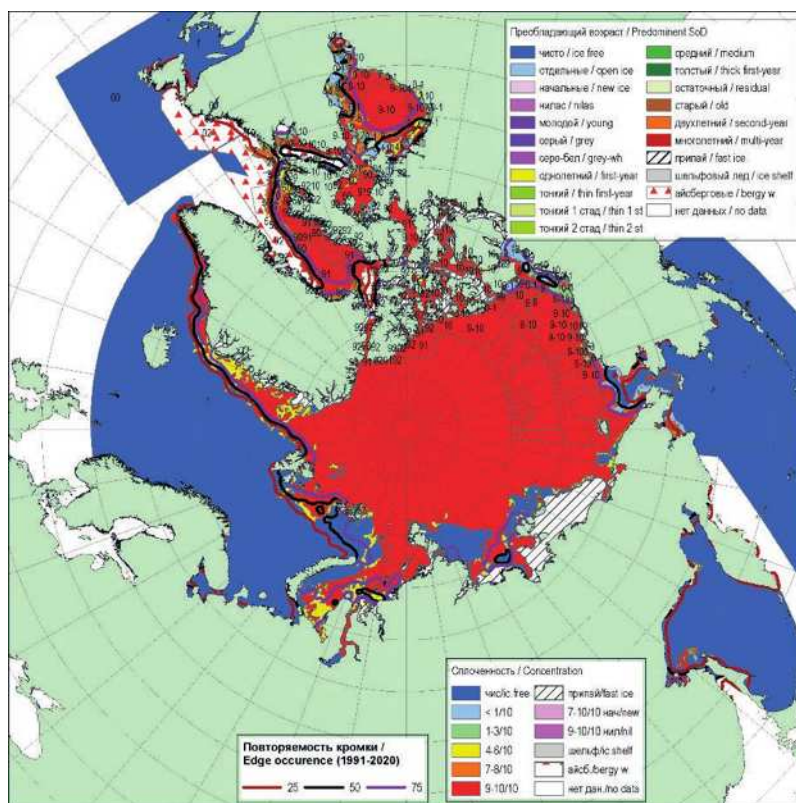


Рис. 2.2.8. Обзорная ледовая карта СЛО по сплоченности льда за 21—22 июня 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

выносного характера, адвекцией тепла в эти районы и развитием тепловых процессов таяния и разрушения льда.

В море Бофорта развитие процессов очищения ото льда развивалось гораздо медленнее. Наблюдалось разрушение припая среди островов Канадского Арктического архипелага, но припай в российских арктических морях сохранялся (рис. 2.2.8).

В возрастном составе льда на начало активного таяния и разрушения льда преобладали однолетние толстые льды. Образование начальных и молодых льдов в окраинных морях прекратилось. Старые льды занимали не более 35 % акватории океана. Однолетние льды, среди которых преобладали однолетние толстые льды, составляли около 60 %. Остальную часть акватории океана занимали разряжения и полыньи вдоль побережий.

Основными очагами очищения морей послужили: прикромочная зона в северной части Баренцева моря, вся юго-западная часть Карского моря, а также западная часть и заприпайный район в море Лаптевых и район, прилегающий к Берингову проливу в Чукотском море (рис. 2.2.9).

В июне в поле дрейфа льда в СЛО наблюдалось развитие нескольких крупномасштабных структур дрейфа.

Произошедшие масштабные изменения в циркуляции атмосферы привели к формированию традиционных структур дрейфа — обширного циклонического кру-

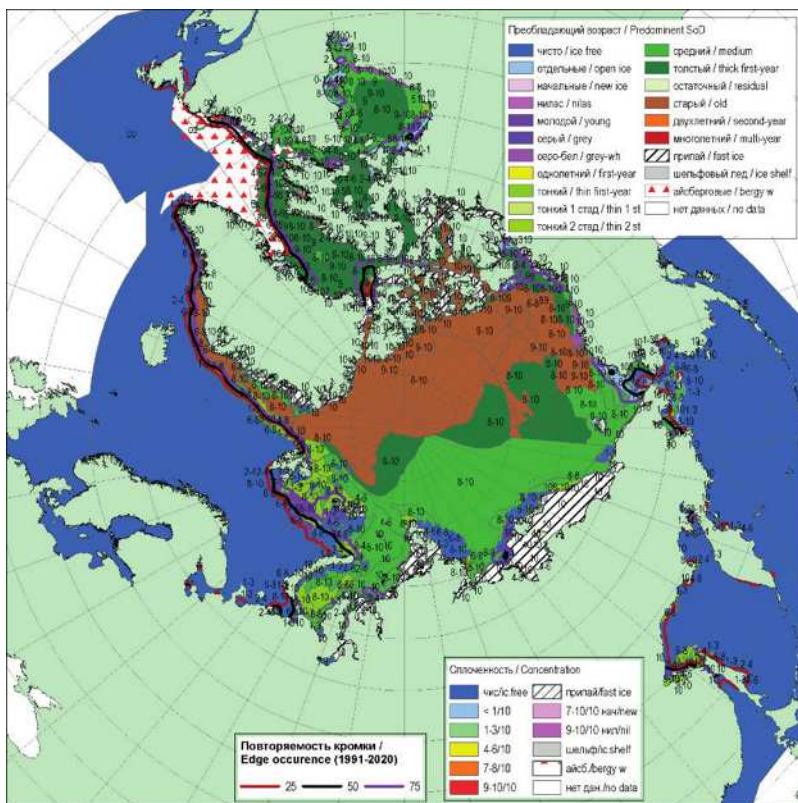


Рис. 2.2.9. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту за 5—8 июня 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

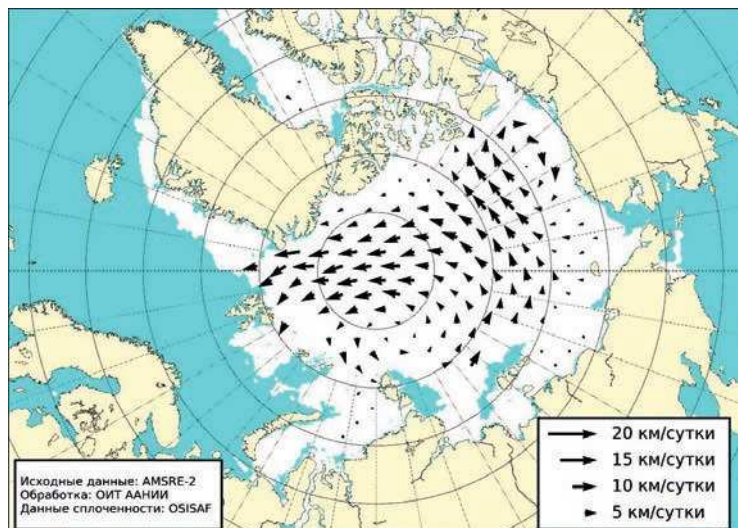


Рис. 2.2.10. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в июне 2021 г., восстановленное на основе корреляционного анализа спутниковых изображений льда в микроволновом диапазоне.

говорота в центральной части СЛО и менее развитого Канадского антициклонического круговорота, который был смещен в море Бофорта.

Сформировавшийся циклонический вихрь охватывал обширную акваторию в центральной части СЛО. По южной периферии вихря наблюдался дрейф льда из северных частей морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, который выносился в приполюсный район. По северной периферии вихря лед дрейфовал вдоль побережья островов Канадского Арктического архипелага и побережья Гренландии. Часть потока этой ветви вихря направлялась в пролив Фрама. Этот лед выносило из акватории СЛО. Вторая, гораздо меньшая ветвь циклонического вихря приносила лед в северную часть Карского моря.

Канадский антициклонический круговорот получил менее выраженное развитие и существовал в виде обширного вихря с центром над морем Бофорта. Интенсивность дрейфа льда в Канадском антициклоническом круговороте была небольшой, и скорость дрейфа составляла около 5 км/сут (рис. 2.2.10).

Общее количество льдов в СЛО в июне, по оценкам, выполненным в ААНИИ, составило 11 505,8 млн км², что оказалось на 2,5 % меньше среднего многолетнего значения по ряду за 1978—2020 гг. Количество льда, наблюдавшееся в СЛО в конце июня 2021 г., оказалось очень близким к среднему значению за десятилетний период 2011—2020 гг. и даже несколько превосходило его, особенно в секторе 95° в.д. — 170° з.д. (моря Лаптевых, Чукотское, Берингово и Охотское).

В целом же при сравнении площади ледяного покрова в СЛО со средними значениями за длинный ряд наблюдений с 1978 г. можно констатировать, что отрицательная аномалия общей площади льда, составившая –2,5 %, сформировалась главным образом за счет малой ледовитости, наблюдавшейся в секторах 45° з.д. — 95° в.д. (моря Гренландское, Баренцево и Карское).

При развитии площади ледяного покрова, близкой к норме, толщина ледяного покрова была значительно меньше нормы по всему СЛО и его морям, что подтверждается модельными расчетами объема накопленного льда в СЛО. Ежедневные оценки объема морского льда СЛО на основе расчетов средневзвешенной толщины льда по совместной модели морского льда — океана HYCOM/CICE Датского метеорологического института приведены на рис. 2.4.10. Как показывает модельный расчет, по объему накопленного льда в СЛО в июне 2021 г. этот год сохранял третье — четвертое место по рангу минимумов, превосходя только 2017 и 2020 гг. и приближаясь по значению к показателям 2019 г.

2.3. РАЗВИТИЕ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД (ИЮЛЬ — СЕНТЯБРЬ)

Летние ледовые процессы развивались на благоприятном фоне, который сформировался в начале летнего периода и особенно хорошо проявился в окраинных морях российского сектора Арктики. Распределение ледяного покрова по сплоченности и по возрастным градациям за каждый месяц и поля среднemesячного дрейфа период с июля по сентябрь 2021 г. приведены на рис. 2.3.1 — 2.3.10.

В июле продолжалось интенсивное очищение морей западного района российского сектора Арктики (Баренцева, юго-западной части Карского, Лаптевых) и юго-восточной части Чукотского моря. К концу июля на большей части акватории этих морей наблюдались обширные пространства редких льдов и чистой воды. Аномалии ледовитости в этих морях составляли –20 ... –70 %. Значительно медленнее процессы таяния развивались в северо-восточной части Карского и Восточно-Сибирского морей.

Припай в российских арктических морях практически полностью разрушился во второй декаде июля, т. е. в среднем на 5—10 суток раньше средних многолет-

них сроков. Припай среди островов Канадского Арктического архипелага в течение июля начал частично разрушаться, но сохранялся до конца июля. Вынос однолетних толстых и старых льдов из СЛО через пролив Фрама был близок к среднему многолетнему значению по ширине ледового потока и скорости дрейфа (рис. 2.3.1).

В возрастном составе льда наблюдалось дальнейшее сокращение количества однолетних толстых льдов в окраинных морях. Небольшие локальные полосы и пятна старых льдов сохранялись в северной части Чукотского моря. Обширная область дрейфующих старых льдов наблюдалась в море Бофорта. Дрейфующие льды в море Бофорта были практически вплотную прижаты к побережью полуострова Аляска (рис. 2.3.2).

Среднемесячное поле дрейфа ледяного покрова приведено на рис. 2.3.3. Трансарктический перенос льда был развит очень слабо. Перенос начинался в северной части морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, далее проходил через приполюсный район со смещением стрегия к юго-западу и выносил льды в пролив Фрама. Средняя скорость дрейфа составляла около 5 км/сут.

Канадский антициклонический круговорот получил более выраженное развитие и наблюдался в виде вихря с центром над морем Бофорта. Интенсивность дрейфа льда в Канадском антициклоническом круговороте была также невелика, и скорость дрейфа составляла около 5 км/сут.

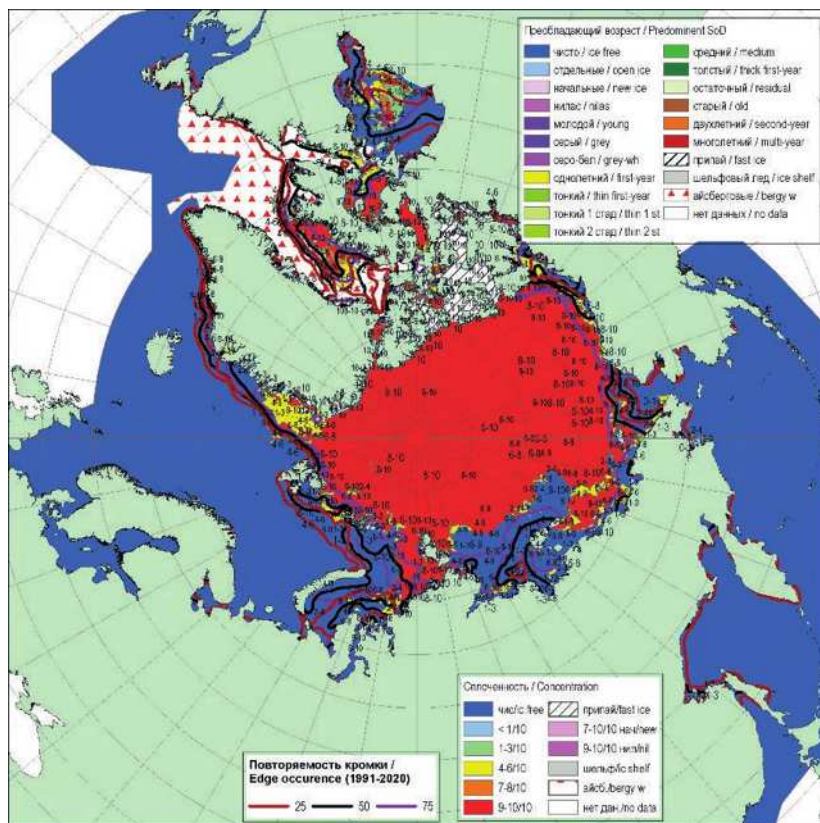


Рис. 2.3.1. Обзорная ледовая карта СЛО по сплоченности за 15—20 июля 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛС США.

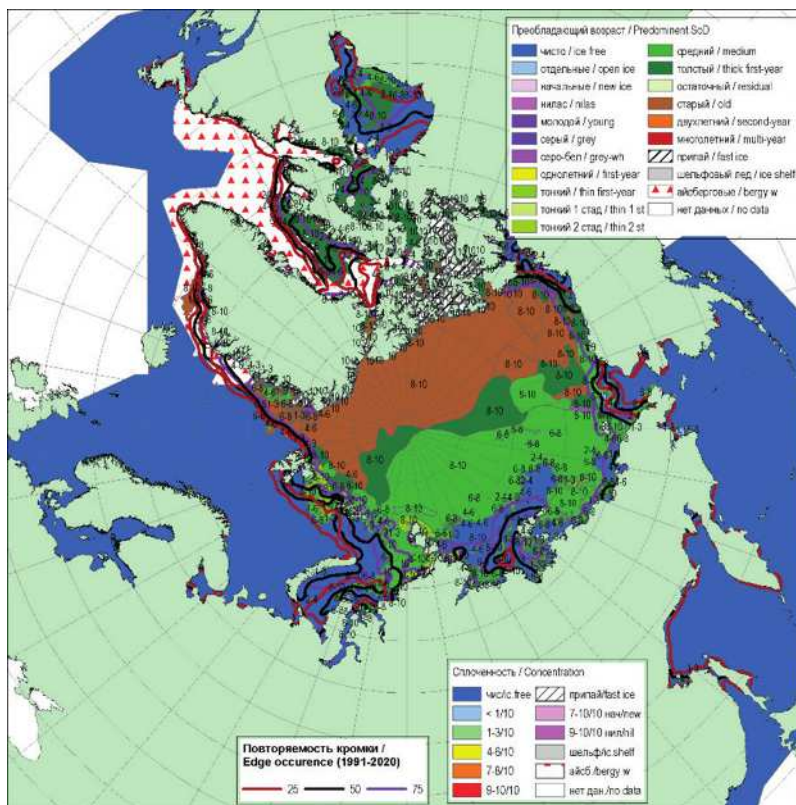


Рис. 2.3.2. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту за 15—20 июля 2021 г., составленная на основе ледового анализа КЛС и НЛЦ США.

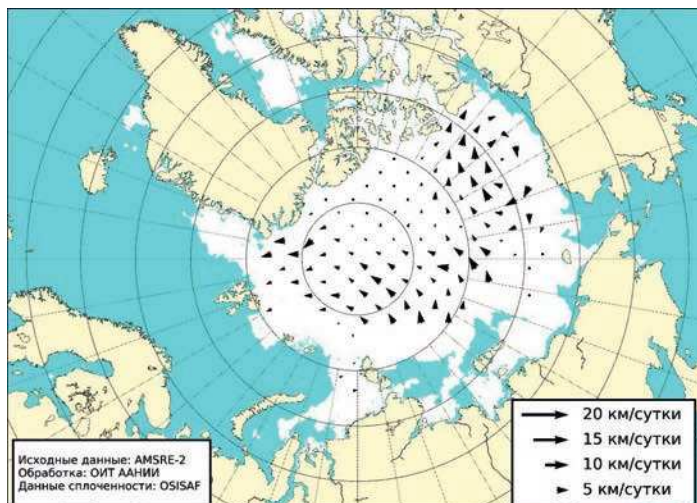


Рис. 2.3.3. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в июле 2021 г., восстановленное на основе корреляционного анализа спутниковых изображений льда в микроволновом диапазоне.

В течение августа продолжалось интенсивное сокращение ледяного покрова в Северном Ледовитом океане и его морях. Уменьшение площади льдов происходило в основном за счет их разрушения в окраинных морях российского сектора Арктики. Началось разражение льдов в прибрежных частях морей Восточно-Сибирского и Бофорта. В середине августа все окраинные моря западного района российского сектора Арктики практически полностью очистились ото льда. В морях восточного района российского сектора Арктики (Восточно-Сибирском, Чукотском) и море Бофорта, наоборот, сохранялось большое количество разреженных и сплоченных льдов.

В морях Баренцевом, Карском и Лаптевых сформировались крупные отрицательные аномалии ледовитости, составляющие от -25 до -55 %. Граница отступления дрейфующих льдов в морях Баренцевом и Лаптевых в августе 2021 г. занимала аномально высокое северное положение. Южная граница массива дрейфующих льдов сместилась за северную границу российских арктических морей, и только в северо-восточной части Карского и восточной части Восточно-Сибирского морей наблюдались обширные зоны льдов различной сплоченности, соединенные с массивом льдов СЛО. В середине августа произошло полное разрушение припая в районе островов Канадского Арктического архипелага (рис. 2.3.4). Необходимо особо отметить, что в середине третьей декады августа в центральной части СЛО, гренландском секторе и в проливах Канадского Арктического архипелага начало отмечаться ледообразование.

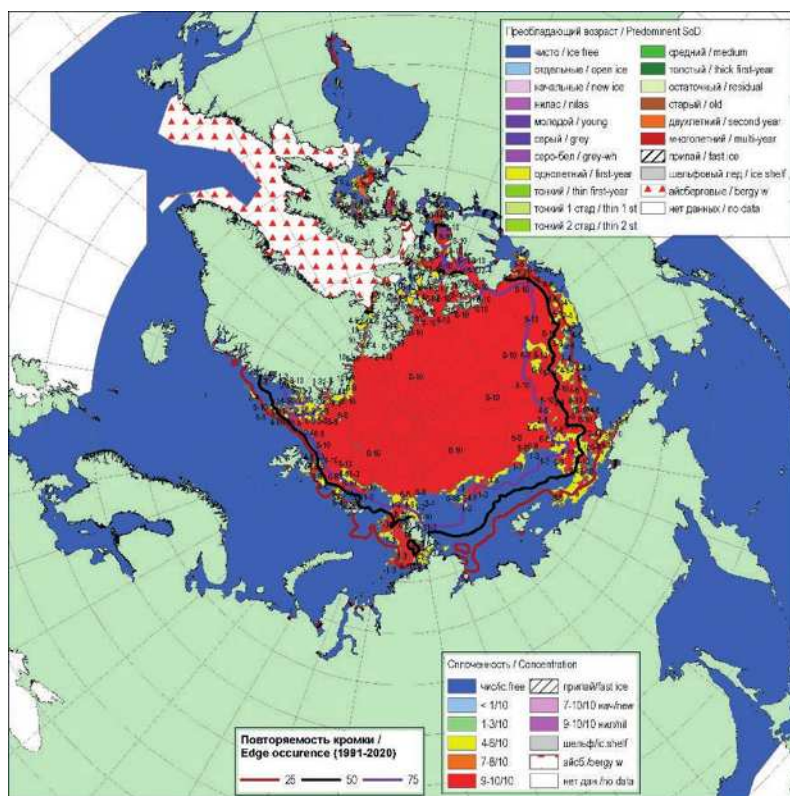


Рис. 2.3.4. Обзорная ледовая карта СЛО по сплоченности за 19—24 августа 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛС США.

Возрастной состав льдов в СЛО и его морях сохранялся. Старые льды наблюдались в гренландском, канадском и аляскинском секторах Арктики, а также в приполюсном районе Арктики. Оставшиеся льды представляли собой однолетний толстый лед различной сплоченности и разрушенности (рис. 2.3.5).

В августе в поле дрейфа льда произошли существенные изменения. Традиционные структуры дрейфа — Трансарктический перенос льда и Канадский антициклонический круговорот — в СЛО не наблюдались. Вместо них сформировался необычный для СЛО хорошо выраженный циклонический вихрь с центром, смещенным к северной границе моря Бофорта.

Сформировавшийся циклонический круговорот выносил льды из моря Бофорта и приносил их к островам Канадского Арктического архипелага, и далее через приполюсный район СЛО поток льдов выносился в северную часть морей Восточно-Сибирского и Чукотского. Скорость дрейфа льдов была невелика и не превышала 5 км/сут (рис. 2.3.6).

В середине сентября сокращение площади ледяного покрова в СЛО достигло максимума и в конце месяца прекратилось. Среди остаточных льдов к северу от параллели 80—82° с.ш. стало наблюдаться ледообразование.

В третьей декаде сентября в прикромочной зоне на чистой воде по широкому фронту от Баренцева моря до моря Бофорта началось ледообразование, что в среднем на 5—10 суток позже средних многолетних сроков. Ледообразование во второй

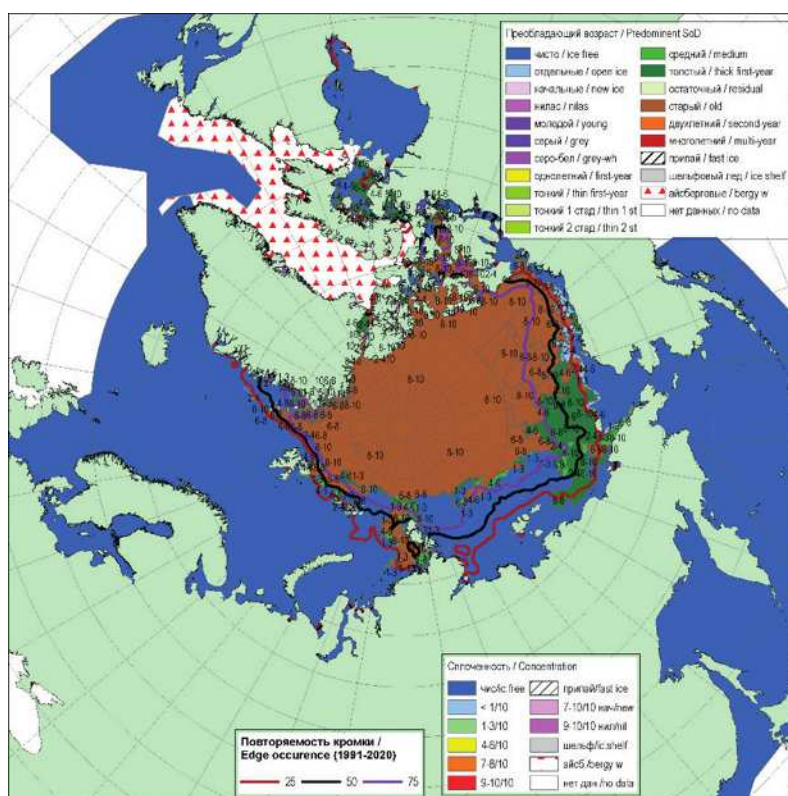


Рис. 2.3.5. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту за 19—24 августа 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛС США.

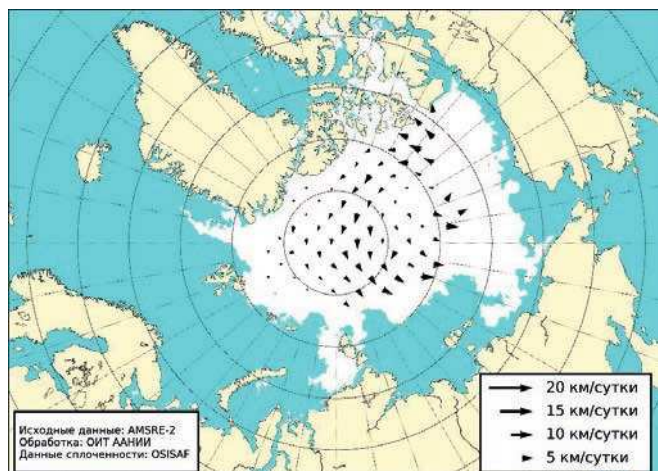


Рис. 2.3.6. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в августе 2021 г., восстановленное на основе корреляционного анализа спутниковых изображений льда в микроволновом диапазоне.

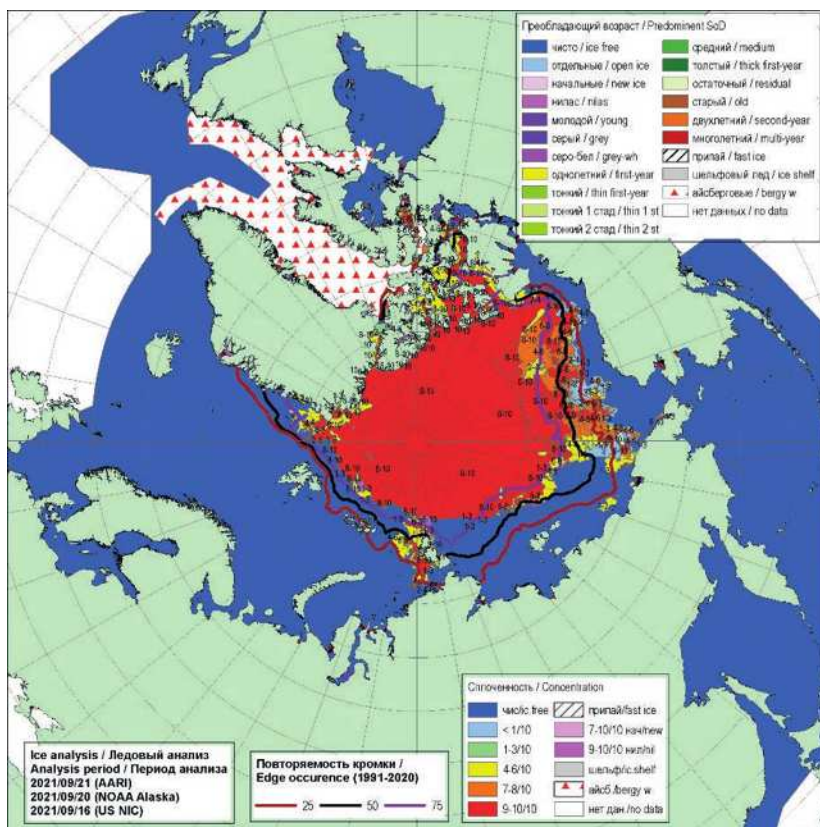


Рис. 2.3.7. Обзорная ледовая карта СЛО по сплоченности за 19—24 сентября 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛС США.

половине сентября развивалось медленно. Начальные и молодые льды наблюдались непосредственно в прикомочной зоне остаточных льдов в районе параллели 75—80° с.ш. До конца сентября ширина полосы начальных и молодых льдов не превышала 50—100 км. Таким образом, характерной чертой начала осеннего ледообразования в 2021 г. является его позднее начало и медленное развитие на начальном этапе.

Основная масса льдов, сохранившихся после периода летнего таяния, наблюдалась в приполюсном районе, гренландском и канадском секторах СЛО. Обширные языки остаточных льдов сохранились в северо-восточной части Карского моря и в восточной части Восточно-Сибирского моря. Остаточные льды сохранились также среди островов Канадского Арктического архипелага (рис. 2.3.7).

В сентябре 2021 г. был обновлен минимум положения границы остаточных льдов в Гренландском, Баренцевом морях и в западной части моря Лаптевых (рис. 2.3.8).

Дрейф ледяного покрова в сентябре приведен на рис. 2.3.9. В сентябре сформировался слабо выраженный Трансарктический перенос льдов, который начинался к северу от моря Лаптевых и через приполюсный район выносил льды к побережью Гренландии и далее в пролив Фрама. Вместо Канадского антициклонического круговорота сформировался слабо выраженный перенос льдов из северной части моря Бофорта в северную часть Восточно-Сибирского моря. Этот перенос приводил к по-

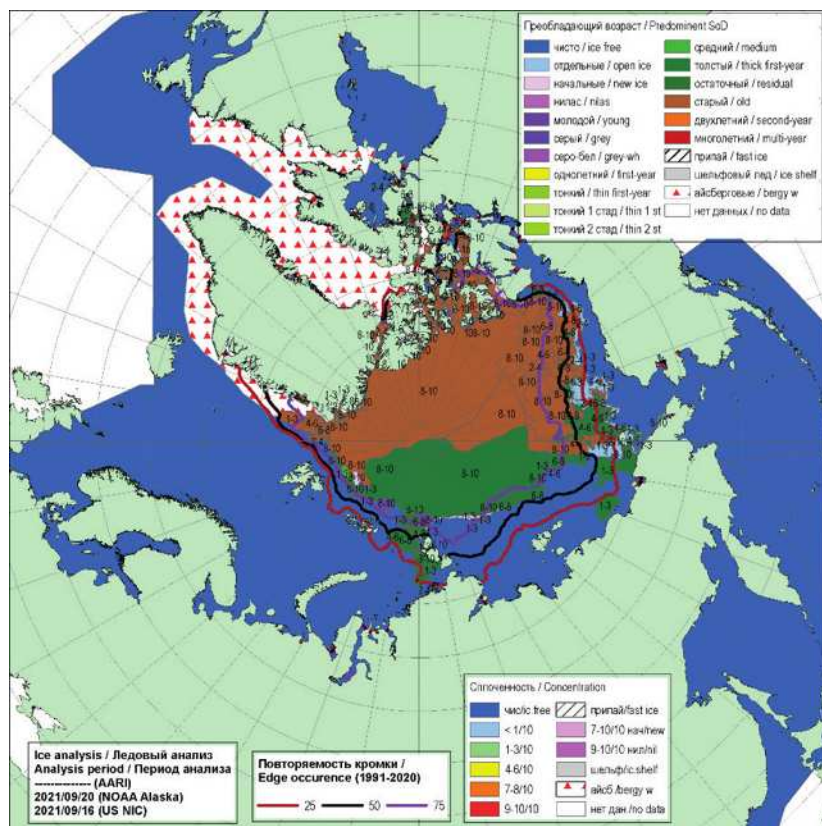


Рис. 2.3.8. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту за 16—20 сентября 2021 г., составленная на основе ледового анализа КЛС и НЛС США.

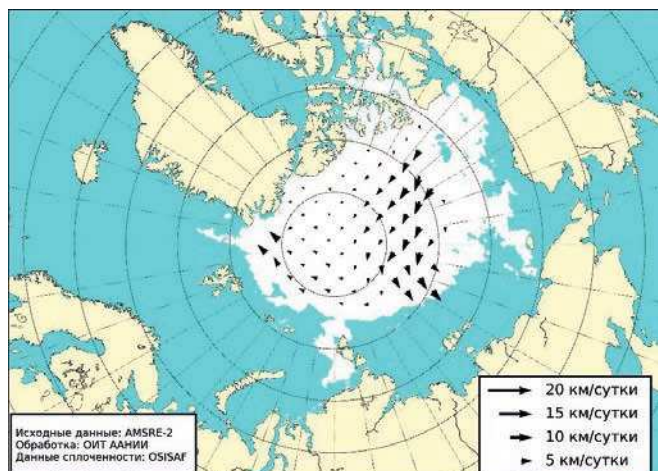


Рис. 2.3.9. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в сентябре 2021 г., восстановленное на основе корреляционного анализа спутниковых изображений льда в микроволновом диапазоне.

стоянному увеличению количества остаточных льдов в восточной части Восточно-Сибирского моря и распространению их в прибрежной части Восточно-Сибирского моря и даже вдоль чукотского побережья. Скорость дрейфа ледяного покрова была незначительной и составила менее 5 км/сут.

Для оценки изменения объема и толщины льда в СЛО за летний сезон 2021 г. была использована модель совместной циркуляции вод и льдов ARI-IOCM, разработанная в ААНИИ. Модель ARI-IOCM, которая представляет собой результат объединения трех моделей: трехмерной бароклинной модели циркуляции вод, модели дрейфа ледяного покрова и термодинамической модели морского льда, адаптированной к акватории СЛО и прилегающей акватории Атлантического океана, имеет пространственное разрешение 13,8 км.

На рис. 2.3.10 представлено распределение средней расчетной толщины льда (с учетом торосов) на 1 мая и 1 октября 2021 г. Площадь льда по расчетам на начало мая и начало октября составляет 13,5 и 5,1 млн км² соответственно. Вычисленные объемы льда в СЛО на эти даты составили 24,0 и 5,8 тыс. км³. Таким образом, уменьшение объема льдов за летний сезон составило 18,2 тыс. км³.

По модельным оценкам Датского метеорологического института, объем морского льда в период его максимального сокращения в середине сентября составил около 6 тыс. км³, что на 1 тыс. км³ (около 15 %) меньше среднего многолетнего значения и очень близко к значениям, вычисленным в ААНИИ. По расчетному объему льдов в СЛО в сентябре 2021 г., этот год занимал четвертое место по рангу в ряду минимумов, превышая значения за 2017, 2019 и 2020 гг. (см. рис. 2.4.10).

По оценкам, выполненным в ААНИИ, общая площадь дрейфующих льдов в СЛО в середине сентября 2021 г. составила 4,67 млн км² при норме 6,1 млн км², что на 23 % меньше средних многолетних значений. Площадь льдов в СЛО оказалась на 1,43 млн км² меньше средних значений за весь ряд наблюдений с 1978 по 2021 г. По общей площади остаточного льда на середину сентября 2021 год стал восьмым по рангу в ряду минимумов в группе легких лет. Данные о площади льдов в Северном Ледовитом океане и его секторах на середину сентября, а также сравнение этих показателей с показателями за ряд лет с 2016 по 2020 г. приведены в табл. 2.3.1.



Рис. 2.3.10. Распределение средней толщины льда (с учетом торосов) в СЛО по результатам расчетов на 1 мая (слева) и 1 октября (справа) 2021 г.

Таблица 2.3.1

Значения ледовитости за 13—19 сентября 2021 г. и ее аномалии по отношению к значениям за разные годы и за периоды 2011—2021 и 1978—2021 гг. по данным наблюдений SSMR-SSM/I-SSMIS

Район, сектор	S, тыс. км ²	Аномалия, тыс. км ²						
		2016	2017	2018	2018	2020	2011— 2021	1978— 2021
СЛО	4666,7	371,4	35,3	109,2	555,9	992,0	288,8	–1170,8
Сектор 45° з.д. — 95° в.д. (моря Гренландское — Карское)	937,3	–208,3	–102,4	–46,5	–214,3	69,4	–138,6	–452,6
Сектор 95° в.д. — 170° з.д. (моря Лаптевых — Чукотское, Берингово, Охотское)	1371,8	102,2	–136,7	132,6	354,4	590,7	167,6	–532,8
Сектор 170—45° з.д. (море Бофорта и канадская Арктика)	2834,1	943,0	693,9	353,8	725,1	449,4	570,9	132,7

На рис. 2.4.11 приведены ежедневные оценки сезонного хода площади льдов для Северного Ледовитого океана и его отдельных секторов за период с 26 октября 1978 г. по 21 сентября 2021 г. на основе расчетов по данным SSMR-SSM/I-SSMIS, алгоритм NASATEAM. Ход изменения площади льдов показывает, что в течение практически всего летнего сезона количество льда в СЛО в целом было меньше среднего многолетнего значения (нормы за 1978—2021 гг.). Наибольшее сокращение площади льдов в СЛО и его морях в летний сезон 2021 г. наблюдались в двух секторах Арктики: в секторе 45° з.д. — 95° в.д. (Гренландское море — Карское море) и секторе 95° в.д. — 170° з.д. (море Лаптевых — Чукотское, Берингово, Охотское моря). В отличие от значительного сокращения площади льда, наблюдаемого в этих секторах, в секторе 170—45° з.д. (море Бофорта и канадская Арктика) ледовитость в летний сезон превышала среднее многолетнее значение (норма за 1978—2021 гг.).

2.4. РАЗВИТИЕ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД (ОКТАБРЬ — ДЕКАБРЬ)

Распределение ледяного покрова по возрастным градациям и по сплоченности, а также поля среднемесячного дрейфа льда за каждый месяц за период с октября по декабрь 2021 г. приведены на рис. 2.4.1 — 2.4.9.

В центральной части СЛО, гренландском секторе и в проливах Канадского Арктического архипелага начальные льды начали появляться в конце августа.

Основной особенностью ледообразования в осенний сезон 2021 г. было его начало в близкие к средним многолетним сроки в тех районах, в которых сохранились остаточные льды (северо-восточной части Карского и восточной части Восточно-Сибирского морей, северной части моря Бофорта) и позднее начало в тех районах, которые были полностью свободны ото льда.

В первой декаде октября волна ледообразования подошла к северной границе российских арктических морей. Одновременно с подходом волны ледообразования с севера наблюдалось его начало в прибрежных районах морей.

В течение октября молодыми льдами были полностью покрыты акватории следующих морей: проливы Канадского Арктического архипелага, северо-восточная часть Карского моря, западная часть моря Лаптевых, вся акватория морей Восточно-Сибирского и Бофорта, а также значительная часть Гренландского моря. Остальные окраинные моря — Баренцево, юго-западная часть Карского, восточная часть моря Лаптевых и Чукотское море — оставались в значительной степени свободными ото льда.

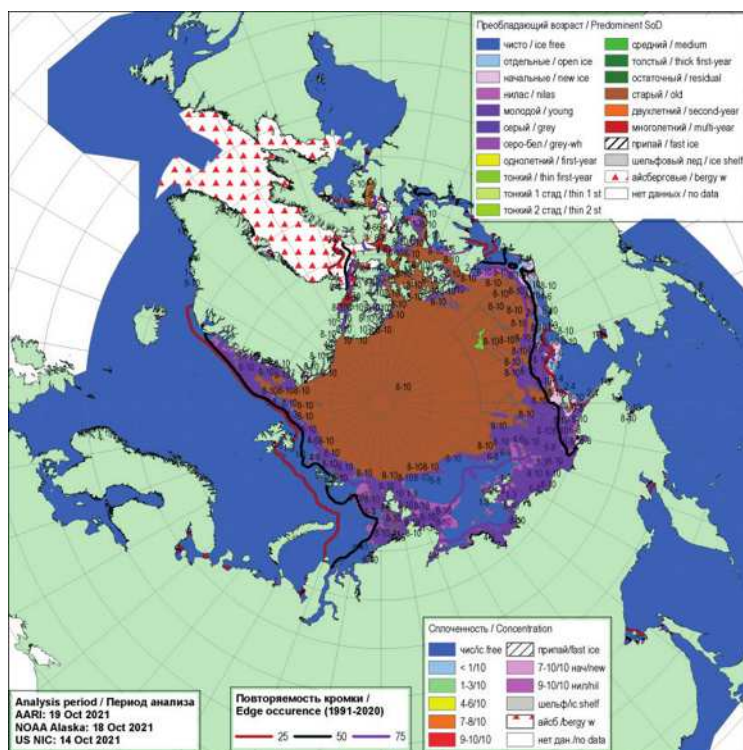


Рис. 2.4.1. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту льда за 14—19 октября 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛЦ и НЛЦ США.

До конца октября на акватории СЛО южнее массива старых льдов наблюдались исключительно молодые льды и отдельные локальные зоны однолетних тонких льдов. Массового перехода молодых льдов в возрастную градацию однолетних тонких льдов не наблюдалось, что свидетельствует о медленном развитии осенних ледовых процессов в 2021 г. (рис. 2.4.1).

Количество молодых льдов, появившихся в СЛО и его морях с середины сентября по середину октября, составило около 1,80 млн км², что было очень близко к среднему многолетнему значению за ряд наблюдений за 1979—2020 гг. (норма 1,80 млн км²).

Поле сплоченности ледяного покрова в тех районах, в которых ледообразование уже началось, было достаточно однородным. Здесь преобладали молодые льды сплоченностью 9 — 10 баллов. Образования припая, который в конце октября обычно становится среди островов Канадского Арктического архипелага, не наблюдалось.

Граница дрейфующих льдов располагалась значительно севернее среднего многолетнего положения в морях Баренцевом и Лаптевых, была близка к среднему многолетнему положению в морях Гренландском, Чукотском и Бофорта и наблюдалась в непосредственной близости от берега в северо-восточной части Карского моря, западной части моря Лаптевых и Восточно-Сибирском море (рис. 2.4.2).

В октябре над СЛО сформировалась одна крупномасштабная структура дрейфа льда — гигантский антициклонический круговорот с центром над приполюсным районом. Интересной особенностью этого антициклонического вихря были неболь-

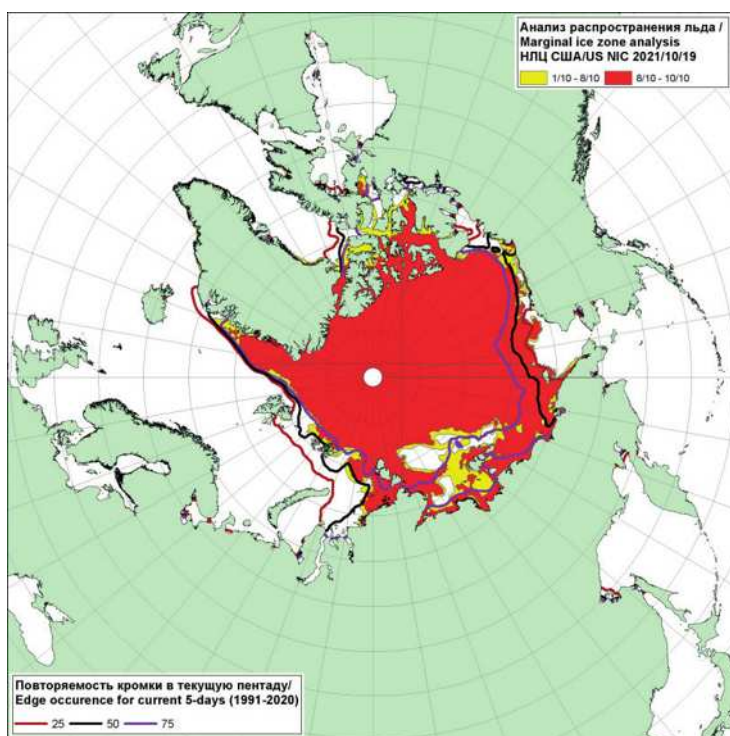


Рис. 2.4.2. Обзорная ледовая карта СЛО по сплоченности льда за 14—19 октября 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

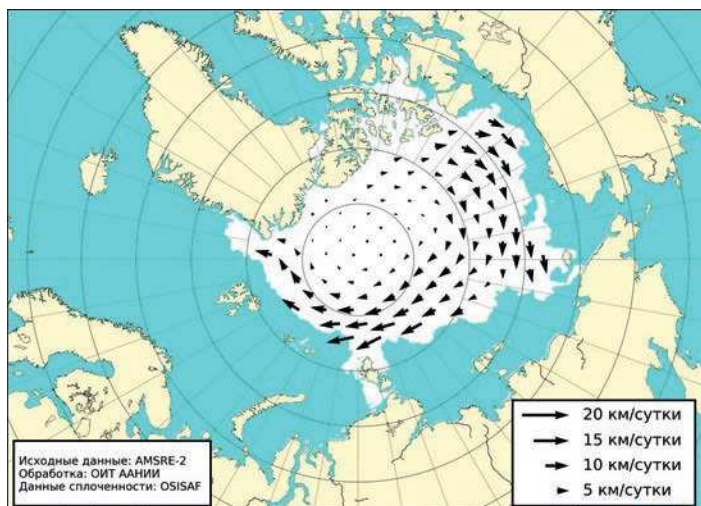


Рис. 2.4.3. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в октябре 2021 г.

шая скорость дрейфа льда в центральной его части и значительная скорость дрейфа (до 10 км/сут) на периферии. На подходе к проливу Фрама поток льда разделялся на две ветви. Одна из ветвей, более широкая, направлялась в пролив, а вторая ветвь существенно замедлялась и вдоль северного побережья Гренландии и островов Канадского Арктического архипелага уходила в море Бофорта.

Еще одной интересной особенностью сформировавшегося поля дрейфа стал вынос льдов в восточную часть Восточно-Сибирского моря, который вызвал такое редкое явление, как «обвал» остаточных льдов в восточную часть моря и к чукотскому побережью (рис. 2.4.3).

В ноябре наблюдалось увеличение интенсивности ледообразования и дальнейшее распространение молодых льдов по акватории морей. Количество молодых льдов, появившихся в СЛО с середины октября по середину ноября, составило 2,80 млн км², что на 25 % превысило среднее многолетнее значение (2,24 млн км²).

Интенсивность нарастания льда по толщине также было достаточно большой, что прослеживалось по появлению однолетних тонких льдов в северных и центральных районах всех арктических морей и в море Бофорта.

В СЛО и его морях сложилось следующее распределение льдов. Старые и остаточные однолетние льды занимали весь приполюсный район, гренландский, канадский и северную часть аляскинского секторов СЛО. Молодые льды преобладали в Баренцевом море, юго-западной части Карского моря и в прибрежных частях остальных морей. В северных и центральных районах морей Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Бофорта преобладали однолетние тонкие льды (диапазон толщины 30—70 см) (рис. 2.4.4).

Сплощенные льды наблюдались по всей акватории океана и в его окраинных морях. Свободными ото льда оставались большая часть акватории Баренцева моря и южный район юго-западной части Карского моря. В середине ноября произошло полное замерзание акватории Чукотского моря, включая подходы к Берингову проливу, чего ни разу не наблюдалось в такие ранние сроки за последние пять лет.

В ноябре 2021 г. граница распространения дрейфующих льдов в СЛО была близка к своему среднему многолетнему положению. Среди островов Канадского

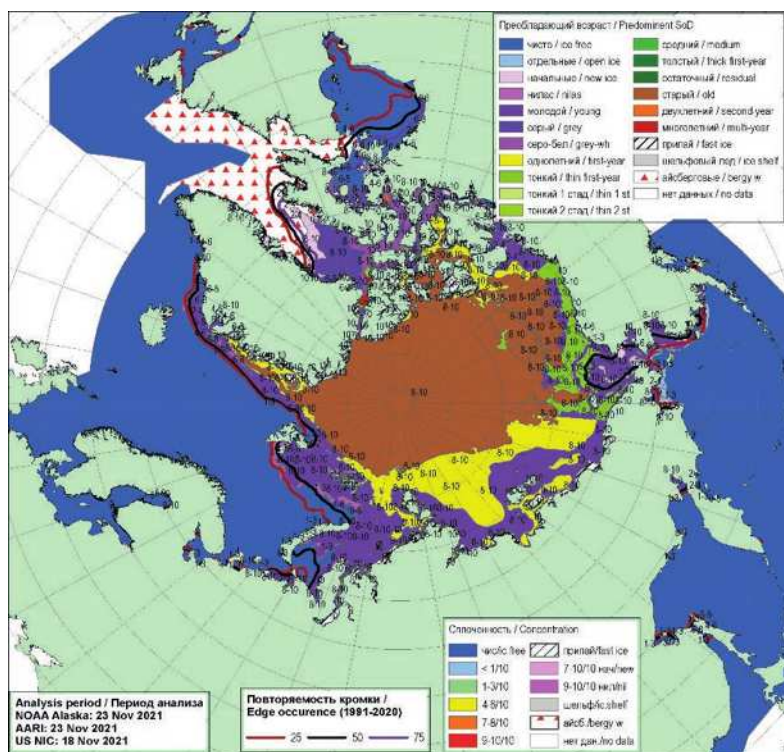


Рис. 2.4.4. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту льда за 18—23 ноября 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛЦ и НЛЦ США.

Арктического архипелага и островов российских архипелагов начал формироваться прибрежный припай (рис. 2.4.5).

В ноябре наблюдалось развитие традиционной картины дрейфа ледяного покрова в СЛО. Получил хорошее развитие Трансарктический перенос льда, который брал свое начало из северных районов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Далее через приполюсный район поток льда выносился в пролив Фрама. Небольшая часть потока по южной периферии выносилась в северную часть Баренцева моря. Скорость дрейфа льдов в Трансарктическом переносе была достаточно высокой, изменяясь в диапазоне 10—15 км/сут.

Канадский антициклонический круговорот был развит значительно слабее. Он охватывал преимущественно только акваторию моря Бофорта и северную часть Чукотского моря. Скорость дрейфа льдов на периферии круговорота составляла 5—10 км/сут (рис. 2.4.6).

В декабре продолжилось распространение ледяного покрова в Гренландском и Баренцевом морях. В СЛО и его морях наблюдалось дальнейшее увеличение толщины льдов осеннего ледообразования. Количество молодых льдов, появившихся в СЛО и его морях с середины ноября по середину декабря, составило около 1,42 млн км², что оказалось на 5 % больше среднего многолетнего значения за ряд наблюдений за 1979—2021 гг. (норма 1,35 млн км²). В декабре процесс увеличения площади ледяного покрова оказался достаточно близким к средним многолетним показателям.

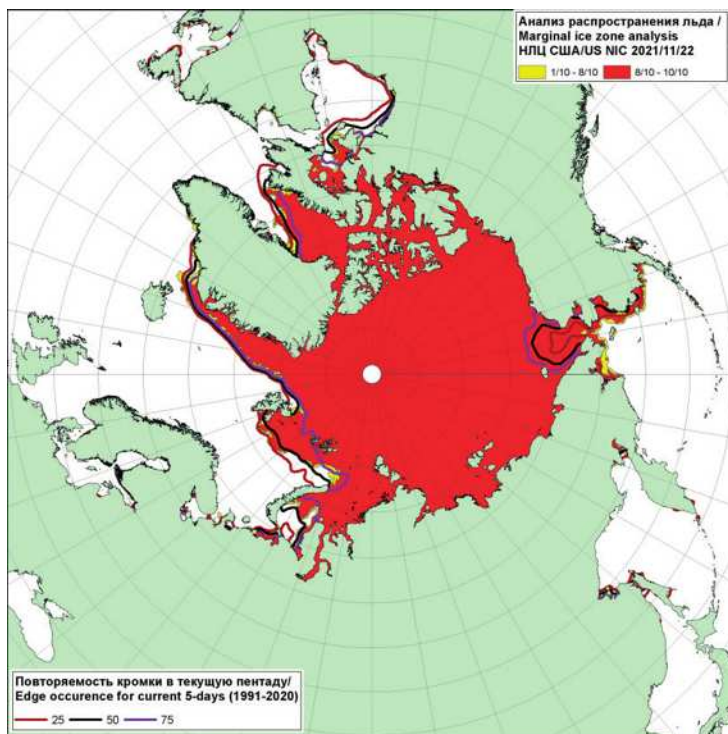


Рис. 2.4.5. Обзорная ледовая карта СЛЮ по сплоченности льда за 18—23 ноября 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

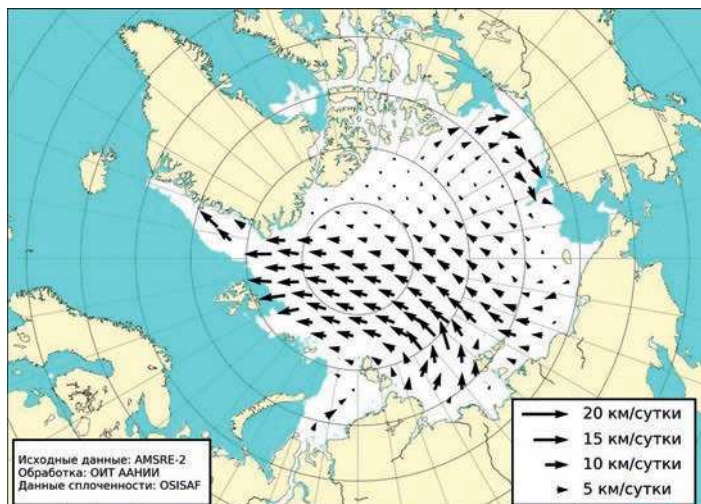


Рис. 2.4.6. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в ноябре 2021 г.

В начале декабря ледообразование охватило полностью северную и южную части Баренцева моря и юго-западную часть Карского моря. Замерзли акватории всех арктических морей, кроме традиционно незамерзающей центральной части Баренцева моря. В северной части Баренцева моря, северо-восточной части

Карского моря, в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском молодые льды перешли в стадию однолетних тонких льдов (диапазон толщины 30—70 см). В районе северных границ арктических морей и в море Бофорта наблюдался переход однолетних тонких льдов в возрастную градацию однолетнего среднего льда (диапазон толщины 70—120 см) (рис. 2.4.7).

По всей акватории СЛО и арктических морей сформировалось однородное поле льда сплоченностью 9—10 баллов. Обширных разрывов и разряжений в ледяном покрове не наблюдалось. Граница распространения дрейфующих льдов в Гренландском и Баренцевом морях была близка к своему среднему многолетнему положению. В середине декабря установился сплошной припай в районе архипелага Новосибирские острова. Обширный припай наблюдался также среди островов Канадского Арктического архипелага. В остальных морях припай установился вдоль побережья в средних границах. Заприпайные полыньи были развиты слабо (рис. 2.4.8).

В поле дрейфа льда наблюдалось практически полное отсутствие каких-либо крупномасштабных структур. Скорость дрейфа была низкой и составляла менее 5 км/сут. Непосредственно в СЛО наблюдалось малоградиентное поле дрейфа льдов, в котором выделялось несколько локальных потоков — выносной поток льда в пролив Фрама, небольшой поток из северной части Карского моря в Баренцево, поток льда из моря Бофорта вдоль чукотского побережья в западную часть Чукотского моря и восточную часть Восточно-Сибирского моря (рис. 2.4.9).

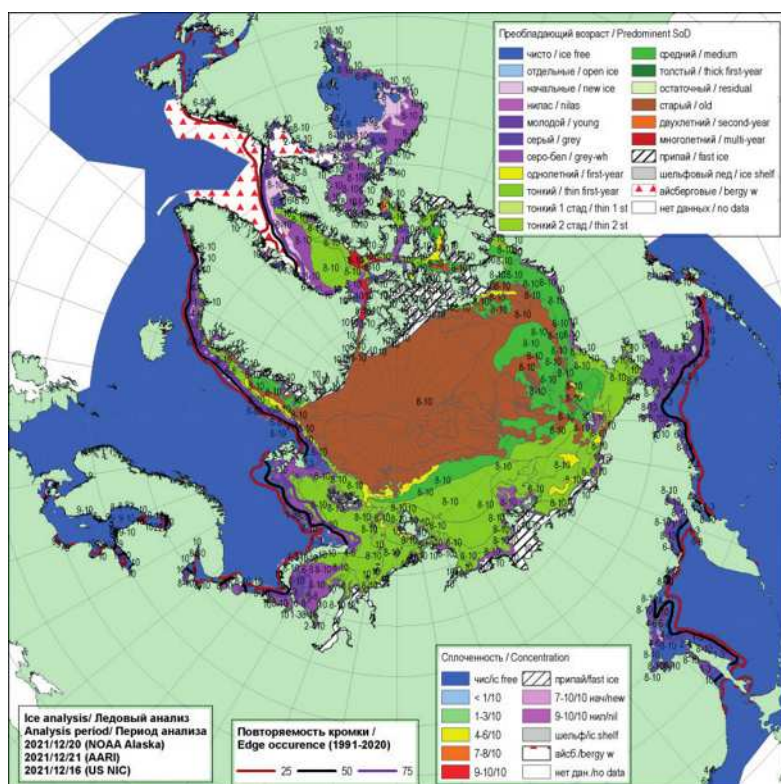


Рис. 2.4.7. Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту льда за 16—21 декабря 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛЦ и НЛЦ США.

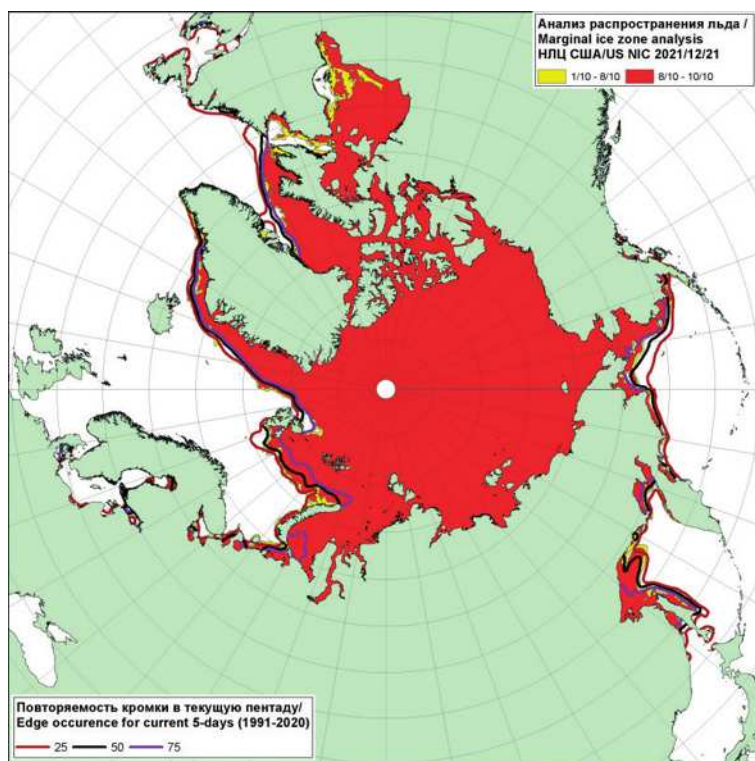


Рис. 2.4.8. Обзорная ледовая карта СЛО по сплоченности льда за 16—21 декабря 2021 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

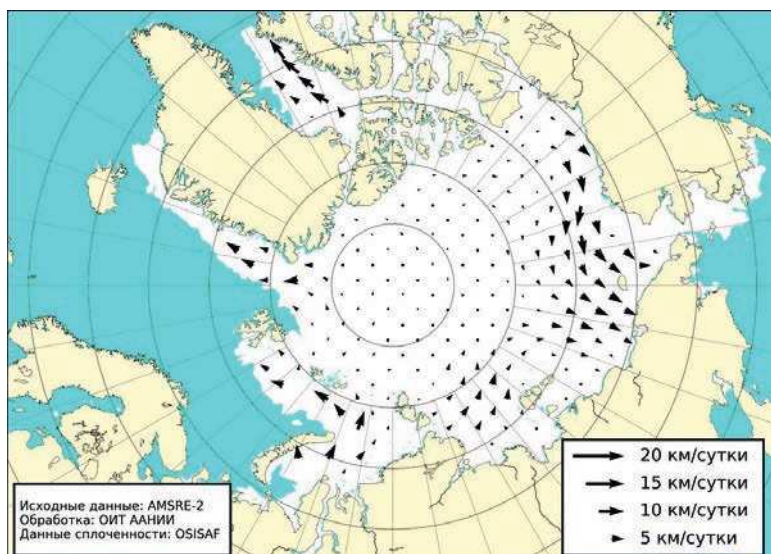


Рис. 2.4.9. Поле скорости фактического дрейфа морского льда в декабре 2021 г.

На рис. 2.4.10 приведены оценки сезонного хода объема морского льда СЛО на основе расчетов средневзвешенной толщины льда по совместной модели морского льда — океана HYCOM/CICE Датского метеорологического института, позволяющие оценить сезонные и межгодовые изменения объема морского дрейфующего льда в СЛО. Согласно результатам расчетов для первой половины года, объем льда был минимальным за весь ряд наблюдений. В результате летнего таяния, которое было менее интенсивным, чем в предыдущие годы, в 2021 г. объем сохранившегося льда в конце периода таяния (в сентябре) оказался третьим по рангу в ряду минимумов, превышая объемы сохранившегося льда в 2019 и 2020 гг.

Сравнение приведенных оценок с результатами расчета толщины и объема льдов на начало мая и октября по модели совместной циркуляции вод и льдов ARI-IOCM, разработанной в ААНИИ, показывает, что результаты расчетов по обеим моделям очень близки, что может свидетельствовать о достоверности расчетов.

На рис. 2.4.11 приведены ежедневные оценки сезонного хода ледовитости для Северного Ледовитого океана и его отдельных секторов (за период с октября 1978 г. по декабрь 2021 г.) по годам на основе расчетов по данным SSMR–SSM/I, алгоритм NASATEAM. По оценкам, выполненным в ААНИИ, общая площадь дрейфующих льдов в Северном Ледовитом океане в конце декабря 2021 г. составила 11,33 млн км² при норме 11,55 млн км², т. е. была на 2 % меньше средних многолетних значений. По площади распространения льдов в конце года 2021 год оказался очень близким к среднему многолетнему значению за ряд наблюдений с 1978 по 2021 г.

Сезонный ход ледовитости СЛО показывает, что общее количество льдов в течение зимнего и весеннего периодов было близким к средним многолетним значениям для всего ряда наблюдений за 1978—2021 гг. Однако в течение летнего периода общая площадь льдов существенно сократилась, и к концу летнего периода

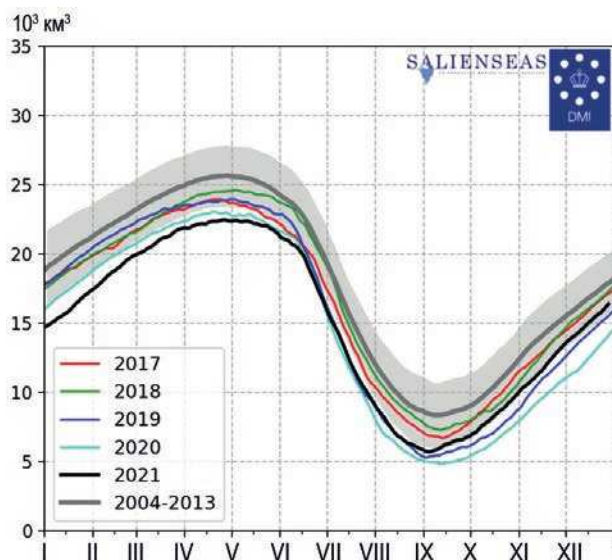


Рис. 2.4.10. Ежедневные оценки сезонного хода объема морского льда в СЛО (10^3 км^3) на основе расчетов средневзвешенной толщины льда по совместной модели морского льда — океана HYCOM/CICE Датского метеорологического института с 1 января 2004 г. по 28 декабря 2021 г.

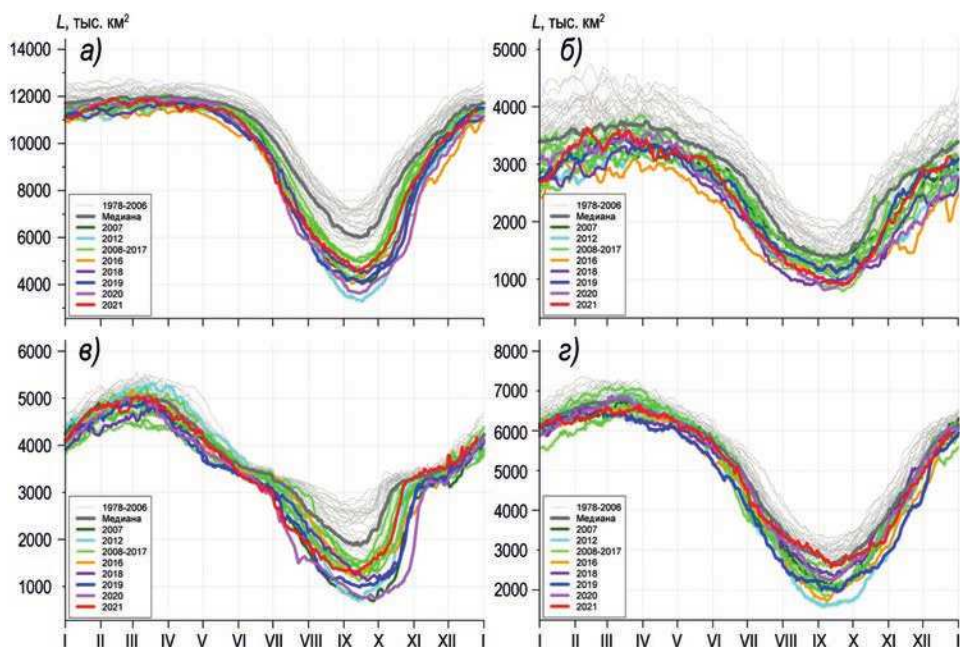


Рис. 2.4.11. Ежедневные оценки сезонного хода ледовитости для Северного Ледовитого океана и трех меридиональных секторов за период с 26 октября 1978 г. по 29 декабря 2021 г. по годам на основе расчетов по данным SSMR — SSM/I — SSMIS — AMSR2.

- а) Северный Ледовитый океан; б) сектор 45° з.д. — 95° в.д. (Гренландское — Карское моря);
 в) сектор 95° в.д. — 170° з.д. (моря Лаптевых — Чукотское и Берингово, Охотское);
 г) сектор 170 — 45° з.д. (море Бофорта и канадская Арктика).

таяния ее значения оказались на 23 % меньше среднего многолетнего значения за весь ряд наблюдений с 1978 по 2021 г.

По общей площади остаточного льда в середине сентября 2021 год стал восьмым по рангу минимумов в группе легких лет. Развитие ледовых условий в разных секторах и в разные сезоны года выявило интересные особенности, проявившиеся в 2021 г. Основной вклад в формирование легких ледовых условий в течение года вносили моря западного меридионального сектора 95° в.д. — 170° з.д. (Гренландское, Баренцево и Карское моря), а основной вклад в значительную остаточную ледовитость в конце летнего периода (восьмое значение по рангу в ряду минимумов) вносили моря меридионального сектора 170—45° з.д. (море Бофорта и канадская Арктика) (рис. 2.4.11).

Развитие ледовых условий в 2021 г. сохранило тенденцию, наблюдающуюся в последнее десятилетие. После аномально легкого развития ледовых условий в 2012 г. во все последующие годы, включая 2021 г., наблюдалось развитие умеренно малой ледовитости (на 5—10 % меньше средних многолетних значений) в течение всего года, кроме летнего периода. В летний период происходило значительное сокращение ледовитости и формировались легкие ледовые условия (аномалия ледовитости была на 25—30 % меньше средних многолетних значений). Аномальное увеличение площади ледяного покрова стало наблюдаться в осенний сезон года (в ноябре — декабре).

2.5. ЛЕДОВО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЯХ РЕК

Обзор ледово-гидрологических условий в устьевых областях рек бассейнов морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского составлен на основе ежедневной информации, полученной на АСПД ААНИИ кодом КН-15 с постов стационарной сети Росгидромета, расположенных на устьевых участках рек, и кодом КН-02 SEA с полярных станций, расположенных на устьевых взморьях рек Оби и Енисей.

Ледово-гидрологические условия в устьевых областях рек бассейна Карского моря

Наращение льда в зимне-весенний период

Наибольшее наращение льда по толщине на устьевых участках рек Оби, Таз и Енисей (п. Игарка) наблюдалось в январе, на устьевом участке реки Енисей (п. Дудинка) — в феврале. В п. Караул наибольшее наращение наблюдалось в январе и марте. На реке Оби (п. Салехард) в конце апреля измерения не производились в связи с опасностью выхода на лед. В апреле на реке Енисей в районе п. Игарка нарастания льда не отмечалось. На реке Таз к концу апреля лед растаял на 3 см.

В табл. 2.5.1 приведены данные о нарастании толщины льда ежемесячно с января по апрель на устьевых участках рек Оби, Енисей и Таз.

Таблица 2.5.1

Толщина льда (H) и его нарастание (ΔH) от месяца к месяцу на устьевых участках рек бассейна Карского моря

Река	Пункт	31 января		28 февраля		31 марта		30 апреля	
		H см	ΔH см	H см	ΔH см	H см	ΔH см	H см	ΔH см
Обь	Салехард	116	+42	148	+32	158	+10	—	—
Таз	Тазовское	84	+22	105	+21	115	+10	112	–3
Енисей	Игарка	74	+24	84	+10	88	+4	88	0
	Дудинка	93	+19	120	+27	144	+24	150	+6
	Караул	73	+17	86	+13	103	+17	112	+9

В табл. 2.5.2 приведены аномалии толщины льда на конец апреля, т. е. в период, близкий к максимальному нарастанию льда. На реках Оби и Енисей (п. Дудинка) отмечены значения толщины льда, превышающие средние многолетние значения на 19—57 см, а на реках Таз и Енисей (п. Игарка и п. Караул) — меньше средних многолетних на 8—20 см.

Высота снега на льду в конце апреля на реке Таз составила 36—50 см, на реке Енисей от 0 до 10 см. На реке Оби в конце апреля высота снега не отмечена.

Таблица 2.5.2

Толщина льда и ее аномалия на конец апреля на устьевых участках рек бассейна Карского моря

Река	Пункт	Толщина, см		
		2021 г.	Средняя	Аномалия
Обь	Салехард	158*	101	+57
Таз	Тазовское	112	132	–20
Енисей	Игарка	88	96	–8
	Дудинка	150	131	+19
	Караул	112	134	–12

В табл. 2.5.3 приведены сроки начала весеннего ледохода и очищения ото льда, а также их аномалии по отношению к средним многолетним датам.

Таблица 2.5.3

**Толщина льда (H) и его нарастание (ΔH) от месяца к месяцу
на устьевых взморьях рек Оби и Енисей**

Устьевое взморье	Пункт	31 января		28 февраля		31 марта		30 апреля	
		H см	ΔH см	H см	ΔH см	H см	ΔH см	H см	ΔH см
Обская губа	Новый Порт	110	+47	152	+42	178	+26	184	+6
Енисейский залив	Сопочная Карга	88	+30	114	+26	133	+19	146	+13

Наибольшее нарастание льда на устьевых взморьях рек Оби и Енисей наблюдалось в январе.

В табл. 2.5.4 приведены аномалии толщины льда на устьевом взморье рек Оби и Енисей на конец апреля, т. е. в период, близкий к максимальному нарастанию льда.

Таблица 2.5.4

**Толщина льда и ее аномалия на конец апреля
на устьевых взморьях рек Оби и Енисей**

Устьевое взморье	Пункт	Толщина льда, см		
		2021 г.	Среднее	Аномалия
Обская губа	Новый Порт	184	141	+43
Енисейский залив	Сопочная Карга	146	163	–17

Толщина льда в конце апреля на устьевом взморье реки Оби была больше среднего многолетнего значения на 43 см, а на устьевом взморье реки Енисей — меньше среднего многолетнего на 17 см.

Высота снега на льду в конце апреля составила 30—39 см в п. Новый Порт и 15—19 см в п. Сопочная Карга.

Характеристика процесса вскрытия

Признаком начала разрушения льда весной является образование закраин.

Появление воды на льду и закраины на устьевом участке реки Оби отмечены в третьей декаде апреля. На реке Таз вода на льду появилась в конце третьей декады апреля, а закраины — в конце второй декады мая. На реке Енисей появление воды на льду и закраины наблюдались в первой и второй декадах мая. Подвижки льда на реке Оби отмечены в середине второй декады мая, на реках Таз и Енисей (п. Дудинка) — во второй декаде мая. Затопы льда на устьевых участках рек бассейнов морей Карского моря не отмечены.

Весенний ледоход и очищение ото льда на устьевых участках рек Оби и Таз начались раньше средних многолетних сроков на 4—9 дней. На реке Енисей весенние процессы отмечены в сроки, близкие к средним многолетним, кроме п. Игарка, где начало ледохода произошло раньше средней многолетней даты на 5 дней, а очищение — на 3 дня.

Продолжительность весеннего ледохода на реках Оби, Таз и Енисей составила от 2 до 11 суток.

В табл. 2.5.5 приведены сроки начала весеннего ледохода и очищения ото льда, а также их аномалии по отношению к средним многолетним на устьевых участках рек Оби, Енисей и Таз.

Таблица 2.5.5

Сроки вскрытия, очищения и их аномалии на устьевых участках рек

Река	Пункт	Дата начала ледохода			Дата очищения от льда		
		2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки	2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки
Обь	Салехард	17.05	24.05	–7	24.05	28.05	–4
Таз	Тазовское	31.05	09.06	–9	02.06	11.06	–9
Енисей	Игарка	22.05	27.05	–5	02.06	05.06	–3
	Дудинка	03.06	03.06	0	10.06	10.06	0
	Караул	05.06	07.06	–2	16.06	15.06	+1

В табл. 2.5.6 приведены сроки взлома припая и очищения ото льда, а также аномалии по отношению к средним многолетним срокам на устьевых взморьях рек Оби и Енисей.

Таблица 2.5.6

Сроки вскрытия и очищения на устьевых взморьях рек Оби и Енисей

Устьевое взморье	Пункт	Ледовая фаза	Дата		
			2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки
Обская губа	Новый Порт	Взлом припая	07.06	18.06	–11
		Очищение от льда	12.06	26.06	–14
Енисейский залив	Сопочная Карга	Взлом припая	17.06	19.06	–2
		Очищение от льда	21.06	26.06	–5

Вода на льду на устьевых взморьях рек бассейна Карского моря отмечена во второй декаде мая. Взлом припая и очищение устьевых участков рек Оби и Енисей произошли в сроки раньше средних многолетних на 2 — 14 дней.

Продолжительность ледохода в Обской губе и в Енисейском заливе составила 4—5 дней.

Характеристика процесса замерзания

Замерзание крупных рек бассейна Карского моря, как правило, начинается с появления заберегов. Осенью 2021 г. появление заберегов зафиксировано на 6—17 дней позже средних многолетних сроков. На реке Енисей (п. Игарка) заберегов не отмечено.

Устойчивое появление плавучего льда и ледостав также отмечены на 2—14 дней позже средних многолетних сроков. Продолжительность периода с плавучим льдом составила 1—2 дня на реке Енисей и 6—7 дней на реках Оби и Таз.

В табл. 2.5.7 приведены сроки наступления осенних ледовых явлений и их аномалии на устьевых участках рек Оби, Таз и Енисей.

В табл. 2.5.8 приведены сроки замерзания, а также аномалии по отношению к средним многолетним срокам на устьевых взморьях рек Оби и Енисей.

На устьевом взморье появление плавучего льда и полное замерзание происходили на 9—15 дней позже средних многолетних дат. Продолжительность периода с плавучим льдом составила 9—11 дней.

Таблица 2.5.7

Сроки наступления ледовых явлений и их аномалии на устьевых участках рек

Река, пункт	Дата появления заберегов			Дата устойчивого появления плавучего льда			Дата ледостава		
	2021 г.	Средняя*	Аномалия, сутки	2021 г.	Средняя*	Аномалия, сутки	2021 г.	Средняя*	Аномалия, сутки
Обь, Салехард	26.10	20.10	+6	25.10	23.10	+2	01.11	30.10	+2
Таз, Тазовское	26.10	10.10	+16	22.10	12.10	+10	28.10	14.10	+14
Енисей, Игарка	нб	17.10	—	31.10	17.10	+14	02.11	22.10	+11
Енисей, Дудинка	01.11	15.10	+17	01.11	18.10	+14	02.11	24.10	+9
Енисей, Караул	27.10	14.10	+13	29.10	19.10	+10	31.10	22.10	+9

*Средняя за весь период наблюдений.

Таблица 2.5.8

**Сроки наступления ледовых явлений и их аномалии
на устьевых взморьях рек Оби и Енисей**

Устьевое взморье	Пункт	Ледовая фаза	Дата		
			2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки
Обская губа	Новый Порт	Устойчивое появление плавучего льда	26.10	12.10	+14
		Полное замерзание	04.10	20.10	+15
Енисейский залив	Сопочная Карга	Устойчивое появление плавучего льда	21.10	12.10	+9
		Полное замерзание	01.11	23.10	+9

Нарастание льда в осенне-зимний период

В табл. 2.5.9 приведены данные о нарастании льда за ноябрь — декабрь, а в табл. 2.5.10 — аномалии толщины льда в конце декабря по отношению к средним многолетним значениям на устьевых участках рек.

Таблица 2.5.9

**Толщина льда (H) и его нарастание (ΔH) в осенне-зимний период
на устьевых участках рек Карского моря**

Река	Пункт	31 октября	30 ноября		31 декабря	
		H см	H см	ΔH см	H см	ΔH см
Обь	Салехард	—	44	+44	63	+19
Таз	Тазовское	—	43	+43	68	+25
Енисей	Игарка	—	25	+25	69	+44
	Дудинка	—	41	+41	70	+29
	Караул	—	38	+38	55	+17

Наибольшее нарастание льда по толщине с момента начала ледообразования на устьевых участках рек Оби, Таз и Енисей (п. Дудинка и п. Караул) наблюдалось в ноябре, а на реке Енисей (п. Игарка) — в декабре.

Таблица 2.5.10

Толщина льда и ее аномалия в конце декабря на устьевых участках рек бассейна Карского моря

Река	Пункт	Толщина льда, см		
		2021 г.	Среднее	Аномалия
Обь	Салехард	63	62	+1
Таз	Тазовское	68	77	–9
Енисей	Игарка	69	59	+10
	Дудинка	70	72	–2
	Караул	55	83	–28

Толщина льда в конце декабря 2021 г. на устьевых участках рек Оби и Енисей (п. Игарка) превышала средние многолетние значения на 1—10 см, а на реках Таз и Енисей (п. Дудинка и п. Караул) была меньше средних значений на 2—28 см.

Высота снега на льду в рассматриваемых пунктах на конец декабря составила от 11—15 до 26—35 см.

В табл. 2.11 приведены данные о нарастании льда за октябрь — декабрь, а в табл. 2.5.12 — аномалии толщины льда на конец декабря на устьевых взморьях рек Оби и Енисей.

Таблица 2.5.11

Толщина льда (H) и его нарастание (ΔH) в осенне-зимний период на устьевых взморьях рек Оби и Енисей

Устьевое взморье	Пункт	31 октября	30 ноября		31 декабря	
		H см	H см	ΔH см	H см	ΔH см
Обская губа	Новый Порт	—	34	+34	63	+29
Енисейский залив	Сопочная Карга	—	52	+52	71	+19

В осенне-зимний период наибольшее нарастание льда на устьевых взморьях рек Оби и Енисей было отмечено в ноябре (с момента начала ледообразования).

Толщина льда в конце декабря 2021 г. на устьевом взморье рек Оби и Енисей была меньше средних многолетних значений на 15—26 см.

Высота снега на льду на конец декабря на устьевом взморье реки Енисей составила 16—20 см, на устьевом взморье реки Оби — 36—50 см.

Таблица 2.5.12

Толщина льда и ее аномалия в конце декабря на устьевых взморьях рек Оби и Енисей

Устьевое взморье	Пункт	Толщина льда, см		
		2021 г.	Средняя	Аномалия
Обская губа	Новый Порт	63	78	–15
Енисейский залив	Сопочная Карга	71	97	–26

Ледово-гидрологические условия на устьевых участках крупных рек бассейна моря Лаптевых

Нарастание льда в зимне-весенний период

Наибольшее нарастание льда на устьевых участках рек бассейна моря Лаптевых отмечено в январе повсюду, кроме п. Тюмети (р. Оленёк), где наибольшее нарастание льда толщине по наблюдалось в феврале. В марте и апреле продолжалось увеличение толщины льда повсюду, кроме устьевых участка реки Лены (п. Кюсюр), где нарастание льда с марта прекратилось, а также рек Яны и Хатанги, где к концу периода толщина льда уменьшилась на 9 и 14 см соответственно.

В табл. 2.5.13 приведены данные о нарастании льда ежемесячно с января по апрель на устьевых участках рек бассейна моря Лаптевых.

Таблица 2.5.13

**Толщина льда (H) и его нарастание (ΔH) от месяца к месяцу
в зимне-весенний период на устьевых участках рек**

Река	Пункт	31 января		28 февраля		31 марта		30 апреля	
		H см	ΔH см	H см	ΔH см	H см	ΔH см	H см	ΔH см
Хатанга	Хатанга	118	+36	144	+26	147	+3	133	-14
Оленёк	Тюмети	59	+10	71	+12	84	+13	91	+7
	Усть-Оленёк	96	+25	117	+21	130	+13	143	+13
Лена	Кюсюр	159	+74	169	+10	169	0	169	0
	Хабарово (Бык, протока)	152	+56	180	+28	197	+17	212	+15
Яна	Юбилейная	63	+15	73	+10	86	+13	77	-9

В табл. 2.5.14 приведены аномалии толщины льда на конец апреля, т. е. в период, близкий к максимальному нарастанию льда.

Таблица 2.5.14

Толщина льда и ее аномалия на конец апреля на устьевых участках рек

Река	Пункт	Толщина льда, см		
		2021 г.	Среднее	Аномалия
Хатанга	Хатанга	133	151	-18
Оленёк	Тюмети	91	136	-45
	Усть-Оленёк	143	190	-47
Лена	Кюсюр	169	173	-4
	Хабарово (Бык, протока)	212	224	-12
Яна	Юбилейная	77	150	-73

Толщина льда в апреле на устьевых участках рек бассейна моря Лаптевых была значительно ниже средних многолетних значений и составляла от 4 до 73 см.

Высота снега на льду в конце апреля на реке Оленёк составила 26—50 см, на реках Хатанге и Лене (п. Кюсюр) — 21—25 см, на реке Яне — 16—20 см. В устьевой части реки Лены (п. Хабарово) снега в конце апреля не наблюдалось.

Характеристика процесса вскрытия

На устьевых участках рек бассейна моря Лаптевых появление воды на льду и закраины наблюдались в третьей декаде мая повсюду, кроме рек Хатанги, Яны и Оленёк (п. Тюмети), где закраины не отмечены. Подвижки на устьевых участках рек бассейна моря Лаптевых наблюдались только на реке Хатанге также в третьей декаде мая. На реках Лене (п. Кюсюр) и Оленёк (п. Тюмети) в третьей декаде мая процесс вскрытия сопровождался образованием заторов.

Весенний ледоход и очищение ото льда повсеместно начались в сроки раньше средних многолетних на 3—12 дней. Продолжительность ледохода составила на реках Хатанге 11 дней, Оленёк от 3 до 11 дней, Лене от 6 до 8 дней, Яне 7 дней.

В табл. 2.15 приведены сроки вскрытия устьевых участков рек Хатанги, Оленёк, Лены, Яны и их аномалии.

Сроки вскрытия и очищения устьевых участков рек

Река	Пункт	Дата начала ледохода			Дата очищения от льда		
		2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки	2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки
Хатанга	Хатанга	02.06	11.06	–9	13.06	16.06	–3
Оленёк	Тюмети	20.05	01.06	–12	31.05	11.06	–11
	Усть-Оленёк	07.06	15.06	–8	10.06	19.06	–9
Лена	Кюсюр	27.05	31.05	–4	02.06	08.06	–6
	Хабарово (Бык, протока)	30.05	06.06	–7	07.06	12.06	–5
Яна	Юбилейная	21.05	28.05	–7	28.05	05.06	–8

Характеристика процесса замерзания

В п. Усть-Оленёк временно отсутствует наблюдатель. Данных нет.

Появление заберегов на устьевых участках рек моря Лаптевых началось позже средних многолетних сроков на 5—13 дней.

В табл. 2.5.16 приведены сроки наступления осенних ледовых явлений на устьевых участках рек Хатанги, Оленёк, Лены и Яны и их аномалии.

Таблица 2.5.16

Сроки наступления осенних ледовых явлений и их аномалии на устьевых участках рек

Река, пункт	Дата появления заберегов			Дата устойчивого появления плавающего льда			Дата ледостава		
	2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки	2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки	2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки
Хатанга, Хатанга	11.10	—	—	13.10	02.10	+11	16.10	04.10	+12
Оленёк, Тюмети	04.10	29.09	+5	08.10	01.10	+7	15.10	10.10	+5
Оленёк, Усть-Оленёк	—	30.09	—	—	02.10	—	—	06.10	—
Лена, Кюсюр	17.10	08.10	+9	17.10	09.10	+8	29.10	23.10	+6
Лена, Хабарово (Бык, протока)	нб	12.10	—	20.10	12.10	+8	28.10	19.10	+9
Яна, Юбилейная	10.10	28.09	+13	08.10	01.10	+7	13.10	06.10	+7

Устойчивое появление плавающего льда и ледостав были отмечены позже средних многолетних сроков на 7—11 и на 5—12 дней соответственно.

Продолжительность периода с плавающим льдом составила 3—12 дней.

Нарастание льда в осенне-зимний период

В табл. 2.5.17 приведены данные об увеличении толщины льда за ноябрь — декабрь, а в табл. 2.5.18 — толщина льда и ее аномалия на конец декабря.

**Толщина льда (H) и его нарастание (ΔH) от месяца к месяцу
в осенне-зимний период на устьевых участках рек**

Река	Пункт	31 октября	30 ноября		31 декабря	
		H см	H см	ΔH см	H см	ΔH см
Хатанга	Хатанга	9	50	+41	87	+37
Оленёк	Тюмети	17	44	+27	76	+32
	Усть-Оленёк	—	—	—	—	—
Лена	Кюсюр	—	46	+46	82	+36
	Хабарово	19	59	+40	106	+47
	(Бык, протока)					
Яна	Юбилейная	17	48	+31	82	+34

В осенне-зимний период наибольшее нарастание льда с момента начала ледообразования на устьевых участках рек Лены (п. Кюсюр) и Хатанги наблюдалось в ноябре, а на устьевых участках рек Оленёк, Лены (п. Хабарово) и Яны — в декабре.

Таблица 2.5.18

Толщина льда и ее аномалия в конце декабря на устьевых участках рек

Река	Пункт	Толщина льда, см		
		2021 г.	Средняя	Аномалия
Хатанга	Хатанга	87	—	—
Оленёк	Тюмети	76	81	–5
	Усть-Оленёк	—	104	—
Лена	Кюсюр	82	89	–7
	Хабарово	106	120	–14
	(Бык, протока)			
Яна	Юбилейная	82	72	+10

На устьевых участках рек Оленёк и Лены толщина льда в конце декабря составляла меньше средних многолетних значений на 5—14 см, а на реке Яне превышала их на 10 см.

Высота снега на льду в рассматриваемых пунктах на конец декабря составила от 0 до 26—35 см.

***Ледово-гидрологические условия на устьевых участках крупных рек бассейна
Восточно-Сибирского моря***

Нарастание льда в зимне-весенний период

В табл. 2.5.19 приведены данные о наблюдаемой толщине льда и о его нарастании на конец месяцев в зимне-весенний период на устьевых участках рек бассейна Восточно-Сибирского моря.

Таблица 2.5.19

**Толщина льда (H) и его нарастание (ΔH) от месяца к месяцу
в зимне-весенний период на устьевых участках рек**

Река	Пункт	31 января		28 февраля		31 марта		30 апреля	
		H см	ΔH см	H см	ΔH см	H см	ΔH см	H см	ΔH см
Индигирка	Чокурдах	100	+20	118	+18	134	+16	143	+9
Колыма	Колымское	78	+17	101	+23	115	+14	121	+6
	Черский	90	+18	109	+19	120	+11	118	–2

Максимальное нарастание льда в устьевых участках рек бассейна Восточно-Сибирского моря наблюдалось: на реке Индигирке в январе, на реке Колыме в феврале. В конце апреля на реке Колыме (п. Черский) наблюдалось таяние.

В табл. 2.5.20 приведены значения толщины льда и ее аномалии в период, близкий к максимальному нарастанию льда, — в конце апреля.

Таблица 2.5.20

Толщина льда и ее аномалия на конец апреля на устьевых участках рек

Река	Пункт	Толщина льда, см		
		2021 г.	Среднее	Аномалия
Индигирка	Чокурдах	143	163	–20
Колыма	Колымское	121	140	–19
	Черский	118	138	–20

Толщина льда в конце апреля на устьевых участках рек Индигирки и Колымы была меньше средних многолетних значений на 19—20 см. Снега на льду в этот период не отмечено.

Характеристика процесса вскрытия

Вода на льду на устьевых участках рек бассейна Восточно-Сибирского моря была отмечена во второй декаде мая (кроме п. Черский, где вода на льду не отмечена). Появление закраин наблюдалось в конце второй — начале третьей декады мая. Подвижки на реках Индигирке и Колыме (п. Колымское) наблюдались в третьей декаде мая. Затоп льда на реке Индигирке отмечался 30 мая. На устьевых участках реки затопы не наблюдались.

Продолжительность ледохода составила 2—3 дня. Весенний ледоход и очищение ото льда на реках Индигирке и Колыме начались раньше средних многолетних сроков на 3—9 дней.

В табл. 2.5.21 приведены сроки вскрытия устьевых участков рек Индигирки и Колымы.

Таблица 2.5.21

Сроки вскрытия, очищения и их аномалии на устьевых участках рек

Река	Пункт	Дата начала ледохода			Дата очищения от льда		
		2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки	2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки
Индигирка	Чокурдах	29.05	06.06	–8	31.05	09.06	–9
Колыма	Колымское	26.05	29.05	–3	29.05	04.06	–5
	Черский	29.05	01.06	–3	31.05	06.06	–6

Характеристика процесса замерзания

Появление заберегов на устьевых участках рек бассейна Восточно-Сибирского моря отмечено на реке Индигирке в сроки, близкие к средним многолетним, на реке Колыме (п. Колымское) позже средних дат на 4 дня. На реке Колыме (п. Черский) заберегов не отмечено.

В табл. 2.5.22 приведены сроки наступления осенних ледовых явлений на устьевых участках рек Индигирки и Колымы и их аномалии.

Появление плавающего льда на устьевых участках рек Индигирки и Колымы (п. Колымское) отмечалось в сроки, близкие к средним многолетним, а на устьевом участке реки Колымы (п. Черский) — раньше средней многолетней даты на 7 дней. Становление ледостава на реке Индигирке отмечено позже средних сроков на 4 дня, на реке Колыме — раньше на 1—3 дня.

Продолжительность периода с плавающим льдом составила 2—8 дней.

Таблица 2.5.22

Сроки наступления ледовых явлений и их аномалии на устьевых участках рек

Река, пункт	Дата появления заберегов			Дата устойчивого появления плавучего льда			Дата ледостава		
	2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки	2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки	2021 г.	Средняя	Аномалия, сутки
Индигирка, Чокурдах	03.10	03.10	0	06.10	06.10	0	13.10	09.10	+4
Колыма, Колымское	10.10	06.10	+4	09.10	08.10	+1	11.10	12.10	–1
Колыма, Черский	нб	06.10	—	01.10	08.10	–7	09.10	10.10	–3

Наращение льда в осенне-зимний период

В табл. 2.5.23 приведены данные о нарастании льда на устьевых участках рек Индигирки и Колымы за октябрь — декабрь, а в табл. 2.5.24 — аномалии толщины льда в декабре по отношению к среднему многолетнему значению.

В п. Колымское измерения за 31 декабря отсутствуют.

Таблица 2.5.23

**Толщина льда (H) и его нарастание (ΔH) от месяца к месяцу
в осенне-зимний период на устьевых участках рек**

Река	Пункт	31 октября	30 ноября		31 декабря	
		H см	H см	ΔH см	H см	ΔH см
Индигирка	Чокурдах	—	59	+59	99	+40
Колыма	Колымское	—	38	+38	—	—
	Черский	—	57	+57	68	+11

Максимальное нарастание льда (с момента начала ледообразования) на устьевых участках рек Индигирки и Колымы отмечено в ноябре.

Таблица 2.5.24

Толщина льда и ее аномалия в конце декабря на устьевых участках рек

Река	Пункт	Толщина льда, см		
		2021 г.	Среднее	Аномалия
Индигирка	Чокурдах	99	88	+11
Колыма	Колымское	—	74	—
	Черский	68	59	+9

В конце декабря толщина льда на устьевых участках рек Индигирки и Колымы (п. Черский) составляла на 9—11 см больше средних многолетних значений.

Высота снега на льду на конец декабря на устьевых участках рек бассейна Восточно-Сибирского моря не отмечена.

3. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ И ЕГО МОРЯХ

3.1. ТЕРМОХАЛИННЫЕ УСЛОВИЯ

Анализ термохалинного состояния вод Северного Ледовитого океана (СЛО) в 2021 г. выполнен на основании данных автономных дрейфующих комплексов ИТР (Ice-Tethered Profiler) и ТОР (Tethered Ocean Profiler), оснащенных профилографами, обеспечивающими непрерывное поступление информации о термохалинной структуре верхнего 760-метрового слоя вод, а также данных, полученных в ходе экспедиций «Арктический плавучий университет» на НЭС «Михаил Сомов» и «Арктика» на НЭС «Академик Трёшников» (табл. 3.1.1, рис. 3.1.1).

Таблица 3.1.1

**Сведения о наблюдениях за температурой и соленостью воды,
выполненных на акватории СЛО в 2021 г. и загруженных
в БДТХ отдела океанологии ААНИИ**

№ п/п	Экспедиция/платформа	Дата станции		Число станций
		Первая	Последняя	
1	ИТР 113	01.01.2021	23.02.2021	531
2	ИТР 120	01.01.2021	30.09.2021	1077
3	ИТР 121	01.01.2021	30.09.2021	897
4	ИТР 122	06.09.2021	30.09.2021	100
5	ИТР 124	02.09.2021	06.09.2021	13
6	ИТР 126	05.09.2021	30.09.2021	52
7	ИТР 127	03.09.2021	30.09.2021	53
8	ТОР 2	03.09.2021	30.09.2021	166
9	ТОР 3	04.09.2021	30.09.2021	159
10	ТОР 4	05.09.2021	30.09.2021	154
11	«Арктический плавучий университет-2021» на НЭС «Михаил Сомов»	17.06.2021	25.06.2021	19
12	«Арктика» на НЭС «Академик Трёшников»	09.08.2021	02.09.2021	159

Особенности вертикальной термохалинной структуры СЛО

Для изучения особенностей термохалинной структуры СЛО в 2021 г. был осуществлен анализ вертикального распределения температуры и солености по данным предварительно выделенной группы океанографических станций: использовались данные ИТР 120 в Канадской глубоководной котловине (рис. 3.1.1, белый контур). В выделенной группе станций рассчитывались основные статистические характеристики (среднее, стандартное отклонение, минимальное и максимальное значения) вертикальных профилей температуры и солености. При дальнейшем анализе полученные статистические характеристики сравнивались с климатическими средними и их стандартными отклонениями, рассчитанными в период с 1900 по 2000 г. для этого же района. Область поиска исторических данных (рис. 3.1.1, белый контур) была на 50—100 км шире по сравнению с областью расположения океанографических станций, используемых для анализа в 2021 г. Данные экспедиций

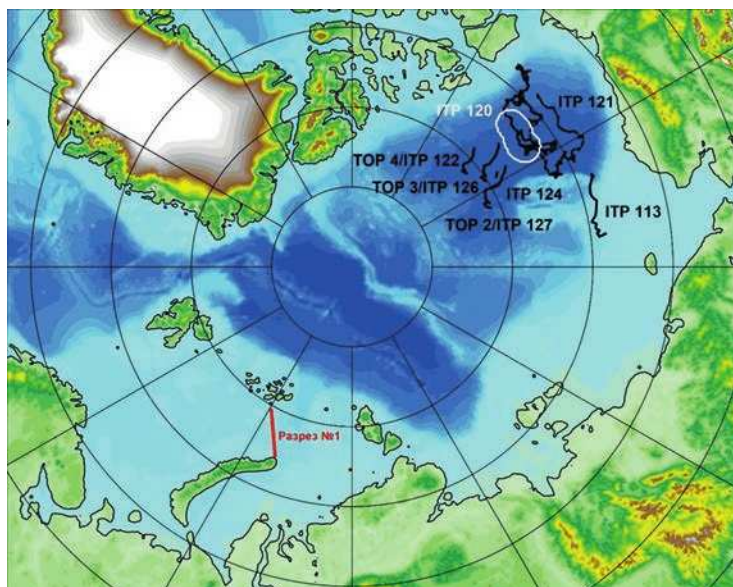


Рис. 3.1.1. Положение океанографических станций, выполненных на акватории СЛО в 2021 г. «Арктический плавучий университет» на НЭС «Михаил Сомов» и «Арктика» на НЭС «Академик Трёшников» использовались для анализа термохалинного режима на границе Баренцева и Карского морей.

Амеразийский суббассейн

В 2021 г. распределение термохалинных характеристик по глубине в Канадской глубоководной котловине по данным ИТР 120 демонстрировало наблюдающееся на протяжении последних нескольких лет аномальное состояние относительно среднего климатического.

В первом квартале 2021 г. поверхностный слой был значительно распреснен (27,4 ‰) в сравнении с климатической нормой (29,9 ‰). Значение отрицательной аномалии поверхностной солёности составило $-2,5$ ‰ (рис. 3.1.2). В аналогичный период 2020 г. аномалия поверхностной солёности составила $-1,5$ ‰, в 2019 г. $-2,3$ ‰, в 2018 г. $-2,0$ ‰, в 2017 г. $-3,1$ ‰. Температура верхнего перемешанного слоя варьировалась около $-1,5$ °C и незначительно превышала климатическое среднее ($-1,6$ °C) вследствие повышения температуры замерзания воды из-за наличия распресненного слоя.

Во втором квартале 2021 г. поверхностный слой также демонстрирует существенное распреснение (27,7 ‰) в сравнении с климатической нормой (30,5 ‰). Значение отрицательной аномалии поверхностной солёности составило $-2,8$ ‰ (рис. 3.1.3). В аналогичный период 2020 г. аномалия поверхностной солёности составила $-1,7$ ‰, в 2019 г. $-3,1$ ‰, в 2018 г. $-2,5$ ‰, в 2017 г. $-2,1$ ‰. Температура верхнего перемешанного слоя варьировала в пределах $-1,4$ °C.

В третьем квартале 2021 г. значение отрицательной аномалии поверхностной солёности составило $-2,1$ ‰ (рис. 3.1.4). В аналогичный период 2020 г. аномалия поверхностной солёности составила $-2,0$ ‰, в 2019 г. $-3,0$ ‰. Температура верхнего перемешанного слоя варьировала в пределах $-1,3$ °C.

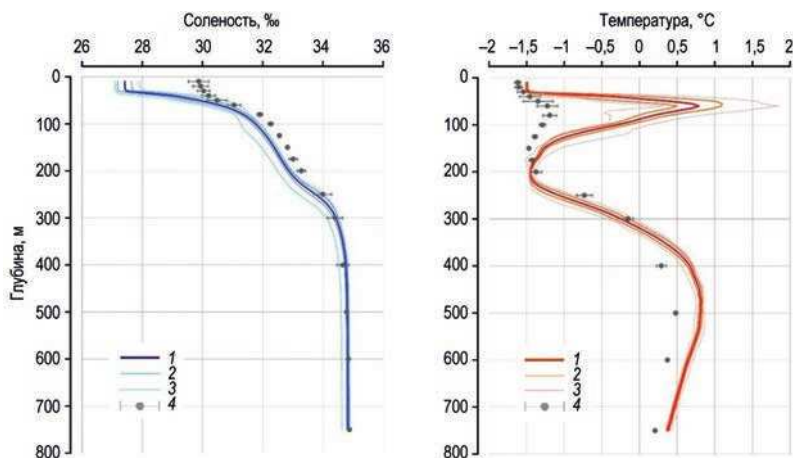


Рис. 3.1.2. Вертикальное распределение солёности и температуры воды в Канадской глубоководной котловине в период январь — март 2021 г. по результатам измерений профилографа ИТР 120.

1 — профиль средних значений; 2 — область стандартного отклонения; 3 — минимальные и максимальные значения наблюдаемых характеристик; 4 — средние климатические значения и их стандартные отклонения, рассчитанные по историческим данным базы термохалинных характеристик СЛО отдела океанологии ААНИИ за те же месяцы в период с 1900 по 2000 г.

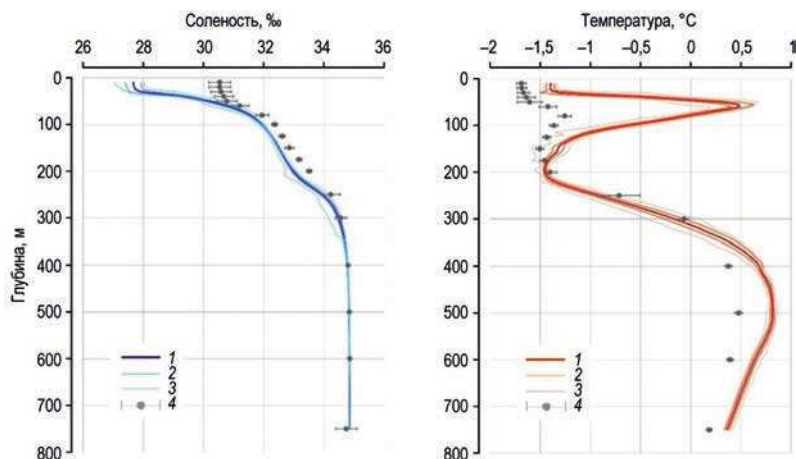


Рис. 3.1.3. Вертикальное распределение солёности и температуры воды в Канадской глубоководной котловине в апреле — июне 2021 г. по результатам измерений профилографа ИТР 120.

Условные обозначения см. рис. 3.1.2.

Под верхним перемешанным слоем на глубине более 35—40 м расположен слой летних тихоокеанских вод (ЛТВ), который является характерной особенностью Американо-Тихоокеанского суббассейна СЛО. Для этого слоя характерно наличие промежуточного максимума температуры воды в слое с солёностью от 31 до 33 ‰.

Максимальное значение температуры слоя ЛТВ по данным ИТР 120 в первом квартале 2021 г. составило 0,79 °C, превысив климатическую норму на 2,0 °C. В 2020 г. аномалия составила +1,61 °C, в 2019 г. +1,58 °C, в 2018 г. +0,74 °C, в 2017 г. +1,5 °C.

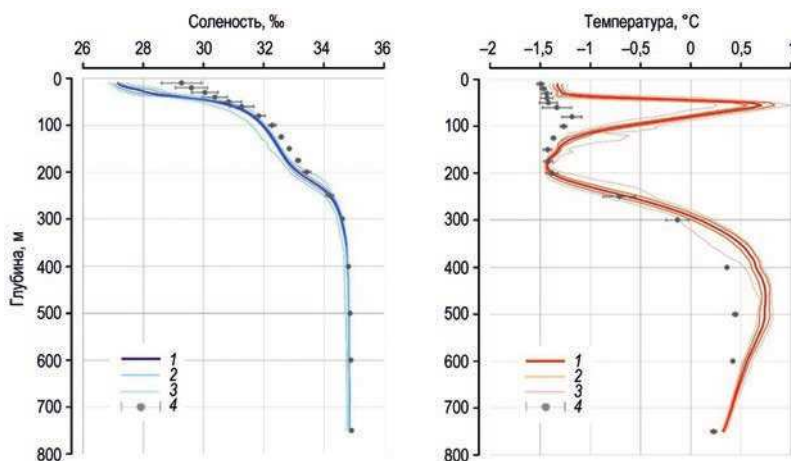


Рис. 3.1.4. Вертикальное распределение солёности и температуры воды в Канадской глубоководной котловине в июле — сентябре 2021 г. по результатам измерений профилографа ИТР 120.

Условные обозначения см. рис. 3.1.2.

Во втором квартале 2021 г. максимальное значение температуры слоя ЛТВ по данным ИТР 120 на горизонте 60 м составило $0,48^{\circ}\text{C}$, превысив климатическую норму на $1,7^{\circ}\text{C}$. В 2020 г. аномалия температуры ядра ЛТВ составила $2,2^{\circ}\text{C}$, в 2019 г. $-1,5^{\circ}\text{C}$, в 2018 г. $-1,2^{\circ}\text{C}$.

В третьем квартале 2021 г. максимальное значение температуры слоя ЛТВ на горизонте 55 м составило $0,7^{\circ}\text{C}$, превышая климатическую норму на $1,9^{\circ}\text{C}$. В 2020 г. аномалия температуры ядра ЛТВ составила $2,2^{\circ}\text{C}$, в 2019 г. $-1,5^{\circ}\text{C}$, в 2018 г. $-1,2^{\circ}\text{C}$.

Так же как и в предыдущие периоды, отмечалось увеличение глубины залегания нижней границы ЛТВ, которая составила 165 — 180 м (130 м согласно климатическим данным).

На глубине от 170 до 210 м в Канадской глубоководной котловине залегают так называемые зимние тихоокеанские воды, затекающие через Берингов пролив и смешивающиеся с водами Чукотского моря в холодный период. Эти воды в Арктическом бассейне характеризуются низкими значениями температуры и солёностью, равной $33,1\text{‰}$, наблюдаемой в ядре данной прослойки. Характерной особенностью последних лет является заглубление ядра зимних тихоокеанских вод. По данным ИТР 120, ядро холодных тихоокеанских вод залегало на глубине 190—205 м, в то время как по климатическим средним ядро наблюдалось на глубине 150 м.

Глубже 210—220 м в Канадской глубоководной котловине наблюдается постепенное повышение температуры воды, обусловленное теплоотдачей атлантической водной массы (АВ). Верхняя граница слоя данной прослойки (0°C) по данным за первый квартал 2021 г., как и в предыдущие годы, располагалась на глубине 320 м (в 2020 г. — 320 м, в 2019 г. — 310 м, в 2018 г. — 325 м, в 2017 г. — 295 м). Максимальное значение температуры воды в ядре АВ в первом и втором кварталах 2021 г. составило $0,82^{\circ}\text{C}$ (475—500 м глубины), что на $0,3$ — $0,34^{\circ}\text{C}$ выше климатической нормы. В третьем квартале 2021 г. температура воды в ядре АВ составила $0,75^{\circ}\text{C}$ (440—480 м глубины), что на $0,3^{\circ}\text{C}$ выше климатической нормы.

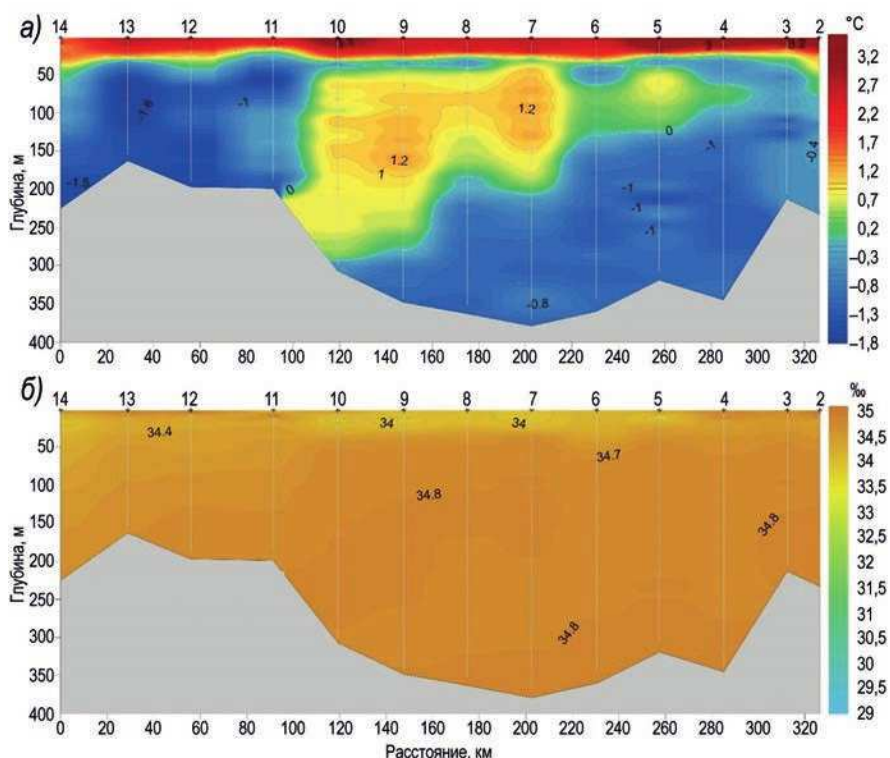


Рис. 3.1.5. Распределение температуры (а) и солёности (б) на океанологическом разрезе № 1, расположенном на границе Баренцева и Карского морей между о-вом Сальм (Земля Франца-Иосифа — слева на разрезе) и м. Желания (Новая Земля — справа на разрезе), по данным экспедиции «Арктика-2021».

Полученные оценки аномалий температуры АВ в 2021 г. полностью соответствуют значениям предшествующего 2020 г., что свидетельствует об отсутствии как положительного, так и отрицательного тренда температуры АВ в Амеразийском суббассейне СЛО.

В ходе проведения в 2021 г. экспедиций «Арктический плавучий университет» на НЭС «Михаил Сомов» и «Арктика-2021» на НЭС «Академик Трёшников» были выполнены океанологические наблюдения в северо-восточной части Баренцева моря на границе с Карским морем.

Разрез № 1 выполнен на границе Баренцева и Карского морей на траверзе о-ва Сальм (Земля Франца-Иосифа) — м. Желания (Новая Земля) и демонстрирует особенности распространения двух ветвей теплой атлантической водной массы (АВ). Со стороны желоба Святой Анны (Карское море) в Баренцево море затекает фрамовская ветвь АВ, которая прослеживается на станциях № 5—10 разреза № 1 (рис. 3.1.5). Максимальные значения температуры и солёности в ядре фрамовской ветви АВ составили 1,3 °C и 34,82 psu соответственно. По данным экспедиции «Арктический плавучий университет» в июне 2021 г. максимальные значения температуры и солёности в ядре фрамовской ветви АВ на данном разрезе составили 1,28 °C и 34,83 psu, в 2013 г. 1,43 °C и 34,9 psu соответственно.

Температура поверхностного слоя вследствие летнего радиационного прогрева имела положительные значения вдоль всего разреза и увеличивалась в юго-восточном направлении от 1,53 °С у ЗФИ до 3,35 °С у м. Желания.

Ниже поверхностного слоя в северо-западной части разреза (станции № 11—14) залегают холодные арктические воды. В юго-восточной части разреза у побережья Новой Земли ниже поверхностного теплого слоя залегают воды со средней температурой около –0,4 ... –0,1 °С и соленостью, возрастающей ко дну до 34,83 psu. Данные воды принадлежат к баренцевоморской ветви АВ, температура которых опустилась ниже 0 °С в результате теплоотдачи в окружающие слои по мере продвижения по Баренцеву морю. Попадая в желоб Святой Анны, баренцевоморская ветвь АВ, обладая большей плотностью по сравнению с окружающими водами за счет более высокой солености и низкой температуры, опускается в придонные слои и вытекает в Арктический бассейн вдоль восточного склона желоба.

3.2. УРОВЕНЬ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

В 2021 г. наблюдения за уровнем моря велись в Карском море на девяти станциях, пять из которых расположены в юго-западной части моря: им. Е.К. Фёдорова (мыс Большой Болванский Нос), Амдерма, Усть-Кара, Новый Порт, им. М.В. Попова (о. Белый), и четыре — в северо-восточной части моря: мыс Стерлегова и ГМО им. Е.К. Фёдорова (мыс Челюскина), остров Диксон и Сопочная Карга, а в море Лаптевых — на четырех станциях (Анабар, мыс Кигилях, пролив Санникова, остров Котельный). Чукотское и Восточно-Сибирское моря наблюдениями за уровнем моря охвачены не были.

На станции им. Е.К. Фёдорова (мыс Большой Болванский Нос) наблюдения велись с февраля по май и с июля по сентябрь, на станции Усть-Кара — с марта по апрель, с июля по декабрь, на станции мыс Стерлегова не было наблюдений за уровнем в июле, октябре и ноябре, на станции ГМО им. Е.К. Фёдорова (м. Челюскина) наблюдения проводились с января по май, а также в августе и декабре. Также стоит отметить, что на станции им. М.В. Попова (о-в Белый) наблюдения проводились только в августе, а на станции Амдерма — только в январе и феврале. На станции Новый Порт наблюдения не проводились с октября по декабрь. На станции Тикси наблюдения, прерванные в конце 2010 г., до сих пор не возобновлены. На станциях о-в Визе, о-ва Известий ЦИК и о-в Голомянный наблюдения, прекращенные ранее, возобновлены также не были.

Относительно полноценные наблюдения в течение года были выполнены только на двух станциях в Карском море (Сопочная Карга и о-в Диксон) и четырех станциях в море Лаптевых.

На протяжении 2021 г. колебания уровня на всех станциях Карского моря, как в его юго-западной, так и в северо-восточной части, происходили на повышенном фоне. Аномалии среднегодовых уровней составили +12 см на станции Усть-Кара, +40 см на станции Новый Порт, +14 см на станции Сопочная Карга, +18 см на станции о-в Диксон, +3 см на станции мыс Стерлегова.

В море Лаптевых, на станциях, расположенных на Новосибирских островах, аномалии среднегодовых уровней составили +8 см на станции м. Кигилях, +6 см на станции пр. Санникова и +5 см на станции о. Котельный. Здесь можно отметить явное понижение уровня моря на станциях пр. Санникова и о-в Котельный по сравнению с 2020 годом.

Для июня данные для этого района отсутствуют. С июля по декабрь колебания уровня в основном происходили в районе отметки +20

На станции Анабар (юго-запад моря Лаптевых) среднегодовая аномалия уровня составила +26 см (в 2020 году +21 см).

Сезонные колебания уровня арктических морей

Как правило, сезонные колебания уровня арктических морей отличаются хорошо выраженным годовым ходом, характеризующимся минимумом весной (март — май) и максимумом осенью (сентябрь — ноябрь). В 2021 г. сезонные колебания уровня в целом были близки к типичным, однако в некоторых случаях отмечались существенные отклонения.

На станциях юго-западной части Карского моря в 2021 г. измерения уровня моря проводились очень нерегулярно, из-за чего оценить сезонную изменчивость уровня моря довольно сложно. В первую очередь необходимо отметить, что с января по май (за исключением марта) на станциях Амдерма, Усть-Кара и им. Е.К. Фёдорова (мыс Большой Болванский Нос) (рис. 3.2.1) среднемесячные значения аномалий уровня моря были ниже средних многолетних или равны им. В марте среднемесячные значения аномалии уровня по данным станций Амдерма, Усть-Кара и им. Е.К. Фёдорова были равны +7, +7 и +8 см соответственно. Для июня данные для этого района отсутствуют. С июля по декабрь колебания уровня в основном происходили в районе отметки +20.

На станции Новый Порт (Обская губа) наибольшие значения уровня, связанные с началом весеннего половодья, обычно наблюдаются в мае — июне. В 2021 г.

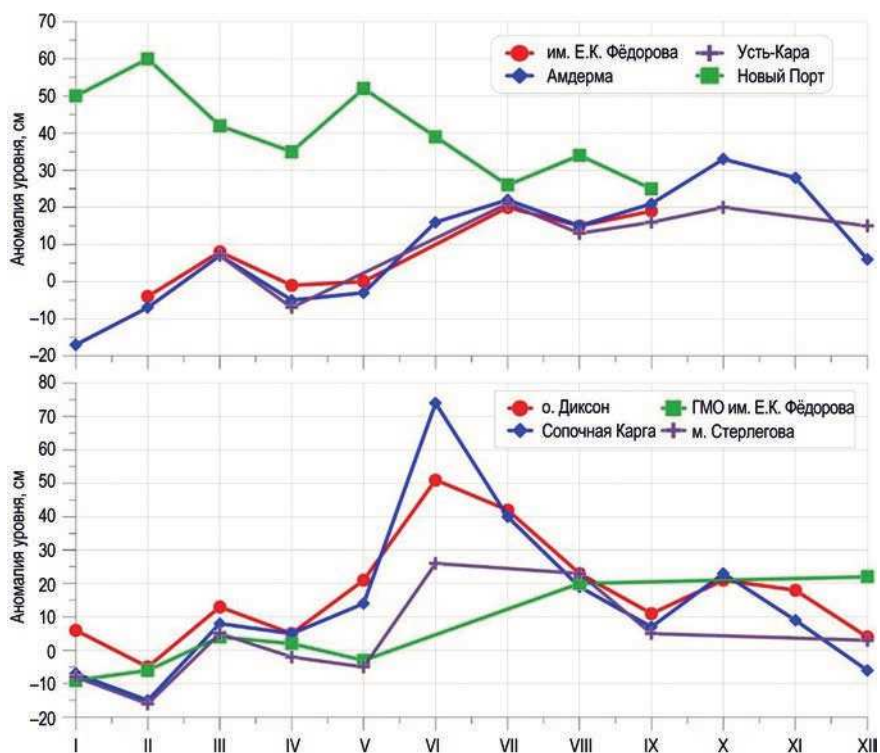


Рис. 3.2.1. Изменения среднемесячного значения уровня на станциях Карского моря в 2021 г.

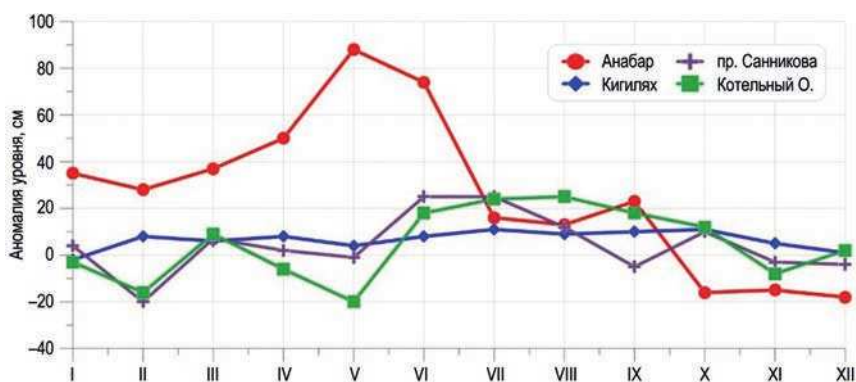


Рис. 3.2.2. Изменения среднемесячного уровня на станциях моря Лаптевых в 2021 г.

самый высокий уровень был зафиксирован в феврале, когда аномалия среднемесячного уровня моря здесь достигла +60 см. В период половодья среднемесячный уровень моря здесь поднялся только до +52 см. В остальное время значения аномалии среднемесячного уровня моря здесь не опускались ниже +25 см.

На востоке Карского моря, по данным станций о-в Диксон, Сопочная Карга, ГМО им. Е.К. Фёдорова и м. Стерлегова наиболее ярко выражен типичный сезонный ход уровня арктических морей выражен более ярко, чем на юго-западе. Здесь в период с января по май колебания среднемесячных аномалий уровня моря происходили в диапазоне от –20 до +20 см. В июне произошел явный сезонный подъем уровня моря до +26 см на станции м. Стерлегова, до +50 см на станции о-в Диксон и до +74 на станции Сопочная Карга. Позднее, во второй половине года, уровень моря упал до отметок, близких к средним многолетним, но оставался на повышенном фоне.

В юго-западной части моря Лаптевых на станции Анабар (рис. 3.2.2) в мае было зафиксировано довольно высокое значение среднемесячной аномалии уровня моря, которое составило +88 см. Это значение на 11 см выше, чем наблюдалось здесь год назад. Также в 2020 г. на станции Анабар в ноябре среднемесячный уровень моря поднялся до аномально высокой отметки +54 см, тогда как в 2021 г. осенью здесь наблюдались значения уровня моря ниже средних многолетних.

Для станций, расположенных на Новосибирских островах (пролив Санникова и о-в Котельный), в первые пять месяцев 2021 г. (за исключением марта) отмечались значения уровня моря ниже средних многолетних. Самый низкий среднемесячный уровень моря здесь наблюдался в феврале и составил около –20 см. С июня по октябрь колебания происходили на повышенном фоне, но средний уровень моря не поднимался выше +30 см. Колебания уровня моря на станции Кигилях не отличались сильными перепадами. Уровенная поверхность здесь в течение года находилась в пределах от –2 до +11 см.

Сгонно-нагонные колебания уровня

Так же как в и последние несколько лет, в 2021 г. отмечены существенные изменения в режиме сгонно-нагонных колебаний уровня арктических морей. Ранее наиболее значительные анемобарические изменения уровня отмечались преимущественно в сентябре — октябре, реже в августе и ноябре и весьма редко в остальные месяцы года. В 2014 г. значительные сгонно-нагонные колебания наблюдались

преимущественно в августе — сентябре. В 2015 г. наиболее существенные сгонно-нагонные колебания наблюдались преимущественно в ноябре — январе или июле — августе. В 2016 и 2017 гг. наиболее значительные сгонно-нагонные колебания наблюдались в январе — апреле. В 2018 г. особо стоит отметить значительные сгонно-нагонные колебания в начале и в конце года. В 2019 и 2020 гг. для Карского моря максимумы сгонно-нагонных колебаний наблюдались в различные периоды времени в зависимости от района, где размещена та или иная станция.

В 2021 г. в юго-западной части Карского моря довольно сложно провести оценку сгонно-нагонных колебаний уровня для всего района в связи с тем, что полный набор данных за весь год здесь не имеется ни для одной из станций. По имеющимся данным самые сильные сгоны наблюдались в январе и феврале, когда уровень моря понижался до -63 см на станции Амдерма и до -40 см на станции им. Е.К. Фёдорова (мыс Большой Болванский Нос). Довольно сильные нагоны отмечались в марте (Усть-Кара — до $+59$ см, им. Е.К. Фёдорова (мыс Большой Болванский Нос) — до $+55$ см) в июле (Усть-Кара — до $+71$ см, им. Е.К. Фёдорова (мыс Большой Болванский Нос) — до $+80$ см) и в октябре, когда на станции Усть-Кара уровень поднимался до $+74$ см..

Как уже отмечалось выше, в Обской губе, по данным станции Новый Порт, наибольший нагон наблюдался в феврале, когда уровень повысился до $+79$ см. В июле и сентябре наблюдались сгоны, когда уровень понижался до -21 и -5 см соответственно. Необходимо отметить, что на протяжении всего года, кроме июня, июля и сентября, на станции Новый Порт при сгонах уровень моря не опускался ниже среднего многолетнего.

На востоке Карского моря, по данным всех четырех станций, максимальный сгон наблюдался в феврале. 1—2 февраля на станции Сопочная Карга уровень понизился до -73 см, на станции м. Стерлегова — до -81 см, на станции ГМО им. Е.К. Фёдорова — до -51 см и на станции о-в Диксон — до -71 см. Также стоит отметить падение уровня воды на станциях Сопочная Карга и о-в Диксон в конце декабря до -75 и до -41 см соответственно. Сильный нагон на востоке Карского моря отмечался 13 марта. В этот день на станции Сопочная Карга уровень моря поднялся до $+91$ см, на станции о-в Диксон — до $+83$ см, на станции м. Стерлегова — до $+96$ см, а на станции ГМО им. Е.К. Фёдорова — до $+62$ см. По данным станций Сопочная Карга и о-в Диксон сильный нагон также наблюдался 7 октября, когда уровень моря поднялся до $+91$ и $+83$ см.

На западе моря Лаптевых по данным станции Анабар наибольшие сгоны наблюдались с июля по декабрь, когда уровень моря опускался на 81 см ниже средней многолетней отметки. Наибольший нагон здесь наблюдался 12 марта, когда аномалия уровня моря возросла до $+134$ см.

На станциях, расположенных на Новосибирских островах, самое заметное падение уровня моря было зафиксировано в начале февраля, когда на станции пр. Санникова он понизился до -49 см, а на станции о. Котельный — до -75 см. На станции мыс Кигилях максимальный сгон наблюдался 24 сентября, когда уровень моря понизился до -27 см. Максимальный нагон на станции мыс Кигилях зафиксирован 10 июля (до $+41$ см), на станции пролив Санникова — 7 июня (до $+51$ см) и 17 октября (до $+59$ см), а на станции остров Котельный — 18 июля (до $+74$ см) и 13 августа (до $+70$ см).

Многолетние изменения уровня арктических морей

Практически во всех районах арктических морей колебания уровня моря до 1985 г. носили стационарный характер и линейный тренд уровня в этот период был

Таблица 3.2.1

**Линейный тренд уровня моря (см/год) по районам арктических морей,
определенный для трех периодов**

Район	Станция	Период, годы		
		1950—2021	1950—1985	1985—2021
ЮЗ Карского моря	Усть-Кара	0,250	−0,041	0,354
	Диксон	0,205	−0,017	0,161
Восток Карского моря	Стерлегова	0,160	0,061	0,081
	Сопочная Карга	0,234	−0,160	0,219
Новосибирские острова	Санникова	0,181	−0,076	0,239
	Кигилях	0,110	−0,193	0,245
Среднее		0,190	−0,071	0,217

близок к нулю или вовсе отрицательным (табл. 3.2.1). Его значение для разных станций составляло от −0,193 до 0,061 см/год при среднем значении −0,071 см/год.

После 1985 г. характер колебаний уровня на станциях арктических морей существенно образом изменился (рис. 3.2.3): в 1985 г. началось резкое повышение уровня моря, и в конце 1980-х — начале 1990-х годов его колебания происходили на повышенном фоне. Затем наблюдалось понижение уровня моря, и во многих районах арктических морей он даже вернулся к средним значениям. Однако в конце 1990-х — начале 2000-х годов уровень моря вновь стал повышаться и в 2005—2009 гг. достиг наблюдавшихся ранее максимумов и даже превысил их. В 2010 г. уровень моря снова понизился до отме-

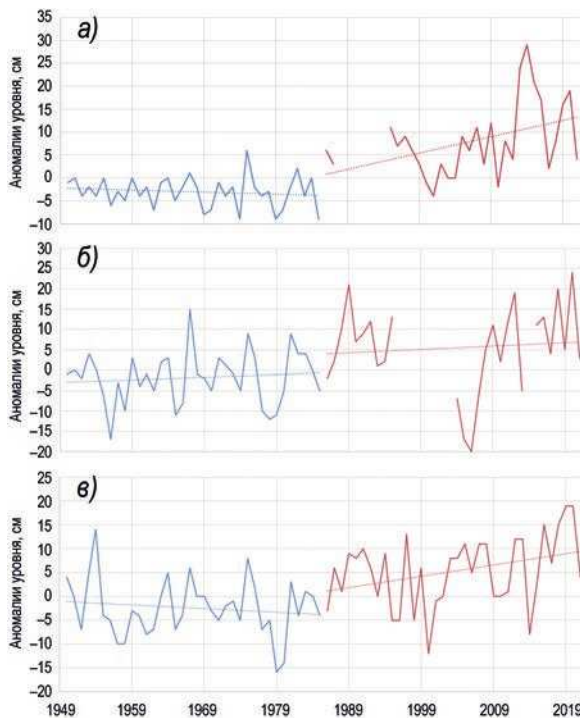


Рис. 3.2.3. Аномалия среднегодового уровня моря.

а — в юго-западной части Карского моря на станции Усть-Кара, *б* — в восточной части Карского моря на станции мыс Стерлегова, *в* — в районе Новосибирских островов на станции пролив Санникова.

ток, близких к средним значениям, после чего вновь началось его повышение, носившее в период 2011—2021 гг. в разных районах арктических морей различный характер.

В юго-западной части Карского моря наблюдалось хорошо выраженное повышение уровня с возвратом к максимумам 2005—2009 гг. В 2013 г. в этом районе был зафиксирован исторический максимум уровня, перекрытый в 2016 г. Затем в 2017 г. уровень незначительно понизился, оставаясь на повышенном фоне. В 2018 и 2019 гг. уровень немного возрос по сравнению с 2017 г. В восточной части Карского моря тенденции к повышению уровня были выражены слабо и носили, скорее, характер слабых колебаний на повышенном фоне. А в районе Новосибирских островов после подъема уровня моря с максимумом в 2012 г. произошло резкое понижение уровня с минимумом в 2014 г. В 2015 г. средний уровень моря несколько повысился, и в 2016 и 2017 гг. это повышение продолжилось. В 2018 г. среднегодовой уровень достиг максимального за последние годы значения, а в 2019 г. вновь несколько понизился.

Значение тренда за период 1985—2021 гг. для различных станций, расположенных на побережье арктических морей, составило от 0,081 до 0,354 см/год при среднем значении тренда 0,217 см/год. При этом наиболее значительный тренд был зафиксирован, как и ранее, в юго-западной части Карского моря.

Стоит отметить, что практически во всех рассматриваемых районах величина тренда уменьшилась, что связано с уменьшением среднегодового уровня моря в 2021 г. на многих станциях арктических морей. Например, на станции Усть-Кара настолько низко уровень не понижался с 2017 г., на станции мыс Стерлегова — с 2013 г., на станциях пролив Санникова и мыс Кигилях — с 2014 г. Это отчетливо проявляется на рис. 3.2.3.

3.3. ОБЗОР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Гидрохимические исследования в 2021 г. проводились с борта НЭС «Академик Трёшников» в августе — сентябре в рамках экспедиции «Арктика-2021» и в сентябре — октябре в рамках экспедиции НАБОС-2021.

Основной целью гидрохимической части работ было изучение пространственной изменчивости гидрохимической структуры вод и получение информации о состоянии природной среды морей Баренцева, Карского, Лаптевых, Евразийского суббассейна, котловины Макарова и континентального склона в районе Восточно-Сибирского моря.

Полученные данные включают 1941 определение содержания растворенного кислорода, 876 определений pH и общей щелочности, 2494 определения содержания силикатов, фосфатов и минеральных форм азота (нитратов, нитритов, аммония). Схема станций, на которых производился отбор проб для гидрохимических анализов, представлен на рисунках 3.3.1 и 3.3.2.

Общая характеристика распределения гидрохимических параметров

Содержание растворенного кислорода на акватории шельфовых морей изменялось в диапазоне 6,75—10 мл/л, или 82—124 % насыщения. Максимальные значения концентрации наблюдались на поверхности. В отдельных районах, чаще вне зоны влияния речного стока, максимум содержания кислорода наблюдался в промежуточных слоях, приуроченных, как правило, к пикноклину, что свидетельствует о смещении зоны фотосинтеза в глубь водной толщи по причине практи-

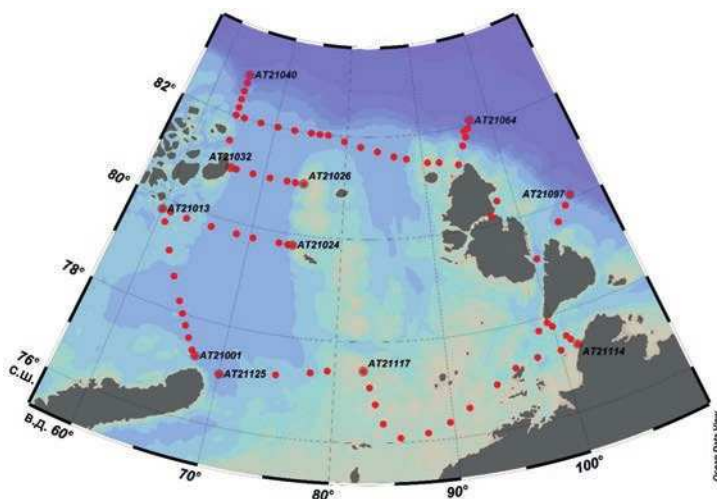


Рис. 3.3.1. Схема океанографических станций, на которых производился отбор проб на гидрохимические определения в рейсе «Арктика-2021».

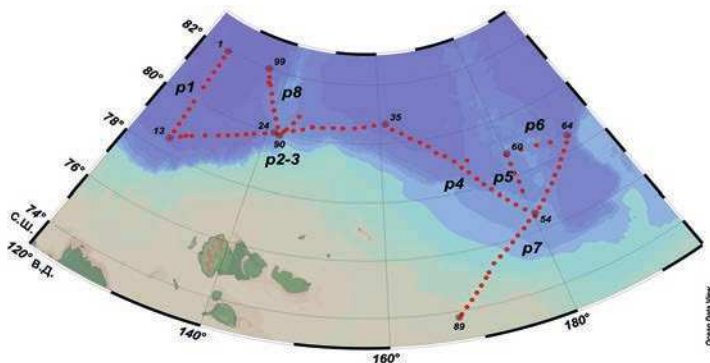


Рис. 3.3.2. Схема океанографических станций и разрезов, на которых производился отбор проб на гидрохимические определения в экспедиции НАБОС-2021.

чески полного потребления фитопланктоном биогенных элементов в поверхностном слое. Наибольшее насыщение кислородом (более 110 %) отмечено в районе шельфового склона к северо-востоку от ЗФИ и к северу от арх. Северная Земля, что говорит о интенсивном фотосинтезе в данных районах на момент ведения работ. Минимальные значения концентрации зафиксированы в мелководной шельфовой части Восточно-Сибирского моря в придонном слое. В поверхностном слое СЛЮ содержание кислорода изменялось от 7,6 до 8,8 мл/л (от 92 до 100 %). В глубинных слоях Арктического бассейна его концентрация изменялась незначительно (от 6,4 до 7,1 мл/л), что соответствует средним многолетним данным.

Водородный показатель на исследуемой акватории изменялся от 7,2 до 8,3. Максимальные значения pH были отмечены на поверхности в местах интенсивного фотосинтеза и в целом совпадали с максимумами растворенного кислорода. Наименьшие значения pH отмечались в придонных горизонтах и промежуточных горизонтах в районе шельфового склона. В глубинных водах Арктического бассейна значение pH составляло около 7,7—7,9.

Максимальные значения общей щелочности были отмечены в центральной части желоба Св. Анны (около 2,5 ммоль/л), но в целом ее изменчивость на большей части акватории незначительна. Средняя величина (в том числе и для глубинных вод СЛО) около 2,3 ммоль/л. Наименьшие значения общей щелочности наблюдались в юго-восточной части Карского моря в поверхностном слое в зоне воздействия материкового стока (менее 1,5 ммоль/л). Здесь же отмечены максимальные значения отношения щелочность / соленость (0,08—0,11), что служит дополнительным маркером вод материкового стока. Диапазон значений общей щелочности на акватории СЛО составил 1,86—2,44 ммоль/л. Минимальные значения наблюдались в поверхностном слое к северу от Восточно-Сибирского моря. В глубинных водах щелочность изменялась от 2,2 до 2,35 ммоль/л.

На большей части акватории морей и бассейна СЛО значения концентрации растворенного кремния крайне невелики (1—2 мкмоль/л) и меняются мало. В северо-западной части Карского моря толщина поверхностного слоя обедненного кремнием около 40 м. В глубинных слоях бассейна СЛО концентрации кремния достигают 10—11 мкмоль/л, что соответствует средним многолетним значениям. Более высокое содержание кремния наблюдается в поверхностном слое юго-восточной части Карского моря (20—48 мкмоль/л), что связано с воздействием материкового стока. Повышенные концентрации кремния прослеживаются к востоку до пролива Вилькицкого. Наблюдаемые концентрации кремния превышают описанные в работе Пивоварова. Полученные данные позволяют говорить о том, что воды материкового стока рек Оби и Енисей могут распространяться в восточном направлении вплоть до пролива Вилькицкого и далее. Эти выводы согласуются также с ранее полученными результатами. Максимальные концентрации кремния (до 44 мкмоль/л) отмечались в районе Восточно-Сибирского моря в слое тихоокеанских вод на глубине 80—120 м. Содержание кремния в глубинных водах Арктического бассейна западнее хребта Ломоносова составило 10,6—11,1 мкмоль/л, а восточнее — до 13,5 мкмоль/л, что соответствует средним многолетним данным.

Содержание минерального фосфора в поверхностном слое СЛО севернее ЗФИ, в северной части желобов Св. Анны и Воронина крайне низкое, около аналитического нуля. В слое тихоокеанских вод содержание минерального фосфора достигало 2,1—2,2 мкмоль/л. В глубинных слоях Арктического бассейна концентрация фосфора составляет около 1,0 мкмоль/л, что соответствует средним многолетним значениям.

Практически повсеместно на шельфе и на акватории бассейна СЛО содержание нитратного азота близко к аналитическому нулю, что характерно для этого времени года, когда все запасы нитратов в поверхностном слое утилизированы фитопланктоном. Толщина поверхностного слоя, бедного нитратами, составляет 30—40 м, и его нижняя граница практически совпадает с положением пикноклина. Максимальные концентрации нитратного азота отмечались в глубинных водах Арктического бассейна (14—15,5 мкмоль/л). В ядре атлантической водной массы содержание нитратов составило 10—12 мкмоль/л. Такие значения соответствуют средним многолетним. Максимум содержания нитратов отмечался в слое тихоокеанских вод (20 мкмоль/л), совпадая с максимумом содержания фосфатов.

Содержание нитритного азота в глубинных водах Арктического бассейна (глубже 500 м) почти повсеместно не превышает 0,1 мкмоль/л. Максимальные значения содержания нитритов обычно приурочены к пикноклину. Наибольших зна-

чений концентрации нитритов достигли к северу от о-ва Большевик. Наблюденный максимум содержания нитритов (0,68 мкмоль/л) отмечен на глубине 50 м в районе с максимальным насыщением вод кислородом. Это хорошо иллюстрирует тот факт, что нитритный максимум в пикноклине может быть маркером протекающего в поверхностном слое фотосинтеза и продукции органического вещества. В подавляющем большинстве случаев подповерхностный максимум содержания нитритов не превышал 0,4 мкмоль/л и наблюдался на горизонтах 20—50 м. Повышенное содержание нитритов (до 0,4—0,6 мкмоль/л) также отмечено у дна в мелководных районах Восточно-Сибирского моря.

Для аммонийного азота, как и для нитритов, минимальные концентрации отмечались в глубинных водах Арктического бассейна (менее 0,1 мкмоль/л). Поверхностный слой также обычно не содержит этой формы азота. Максимальные концентрации на поверхности (около 0,3—0,5 мкмоль/л), отмечались на прибрежных станциях у архипелага Северная Земля и в юго-восточной части Карского моря, в области воздействия материкового стока. Как правило, наблюдался промежуточный максимум содержания аммонийного азота на глубине от 20 до 100 м (до 0,5 мкмоль/л). Повышенные концентрации аммонийного азота отмечались в подповерхностном или придонном слоях восточного склона желоба Св. Анны (до 1,5—2 мкмоль/л). Как первоначальный продукт распада органического азота аммонийный азот может свидетельствовать об активном разложении органического вещества, синтезированного в первую очередь за счет продукции и отмирания фитопланктона.

Высокие значения содержания аммонийного азота (0,6—0,8 мкмоль/л) отмечались в придонном слое мелководного шельфа Восточно-Сибирского моря, а также на горизонтах 40—50 м в Арктическом бассейне. В районах со значительной ледовитостью максимум аммонийного азота приходился на поверхностный слой.

На разрезе между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа (рис. 3.3.3) толщина поверхностной структурной зоны составляет около 35—40 м, что хорошо совпадает с глубиной пикноклина.

Слой характеризуется содержанием растворенного кислорода около 8 мл/л, высоким его насыщением (100—110 %) и низким содержанием биогенных элементов. Содержание фосфатов составляет менее 0,3 мкмоль/л, а в северной части — менее 0,05 мкмоль/л. Концентрация силикатов составляет около 1 мкмоль/л, нитритного, нитратного и аммонийного азота — до нулевых значений. К краям разреза нижняя граница поверхностного слоя опускается до 50 м. Перенасыщение воды кислородом свидетельствуют о продолжающемся процессе фотосинтеза в этом районе. Также это подтверждается повышенными значениями pH.

Ниже пикноклина распределение растворенного кислорода довольно однородно (от 6,8 до 7,5 мл/л, 82—90 % насыщения). Содержание силикатов составляет 4—5 мкмоль/л, максимальное — до 6 мкмоль/л в придонном слое наиболее глубоких участков желоба Св. Анны, а также в ядре атлантической воды, поступающей с севера. Среднее содержание фосфатов равняется 0,7—0,8 мкмоль/л. Область максимальных значений нитратного азота (11—12 мкмоль/л) приурочена к западному склону желоба Св. Анны, где находятся воды атлантического происхождения. Вдоль восточного склона, где распространяется баренцевоморская водная масса, содержание нитратов не превышает 5 мкмоль/л. В восточной части стехиометрическое соотношение азот / фосфор существенно ниже характерного для вод СЛО (от 1:16 до

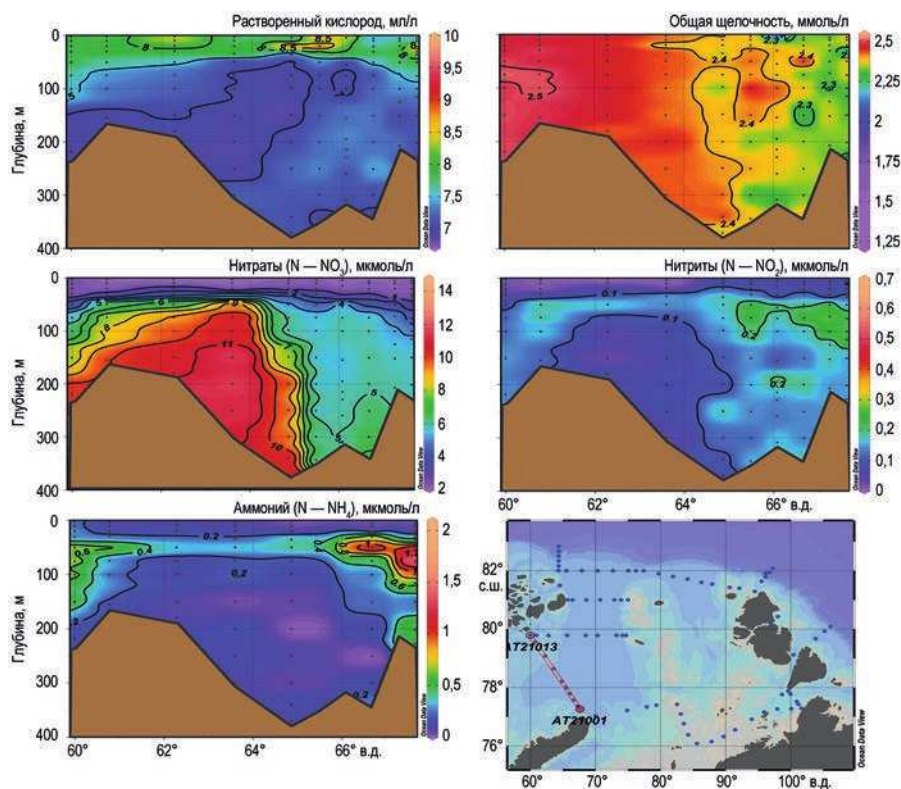


Рис. 3.3.3. Вертикальное распределение содержания растворенного кислорода (мл/л), общей щелочности (ммоль/л), нитратов ($\text{N} - \text{NO}_3$, ммоль/л), нитритов ($\text{N} - \text{NO}_2$, ммоль/л), аммонийного азота ($\text{N} - \text{NH}_4$, ммоль/л) и схема расположения разреза.

1:14). На глубине 50—100 м вблизи берегов Новой Земли содержание нитритов превышает 0,2 ммоль/л. Распределение аммонийного азота схоже с распределением нитритов. У побережья Новой Земли в слое 35—115 м отмечается максимум аммонийного азота (до 1,4 ммоль/л). Севернее в сторону ЗФИ этот максимум ослабевает, а у берегов ЗФИ снова проявляется. Такие особенности в распределении форм азота могут быть следствием процессов весеннего цветения фитопланктона. Судя по проникновению водных масс, обедненных нитратами, в придонные слои желоба Св. Анны, интенсивное потребление нитратов за счет фотосинтеза начинается еще в период зимнего конвективного перемешивания, когда формируется баренцевоморская водная масса.

В восточной части разреза отмечаются также пониженные значения общей щелочности (менее 2,4 ммоль/л) по сравнению с западной частью (более 2,4 ммоль/л), что может говорить о достижении этого района трансформированными водами речного стока.

Наиболее интересной особенностью вертикального распределения гидрохимических характеристик в районе континентального склона к северу от арх. Северная Земля является присутствие вдоль склона трансформированной на шельфе Карского моря и в желобе Воронина атлантической водной массы. В первую очередь она характеризуется пониженной температурой. По гидрохимическим параметрам эта во-

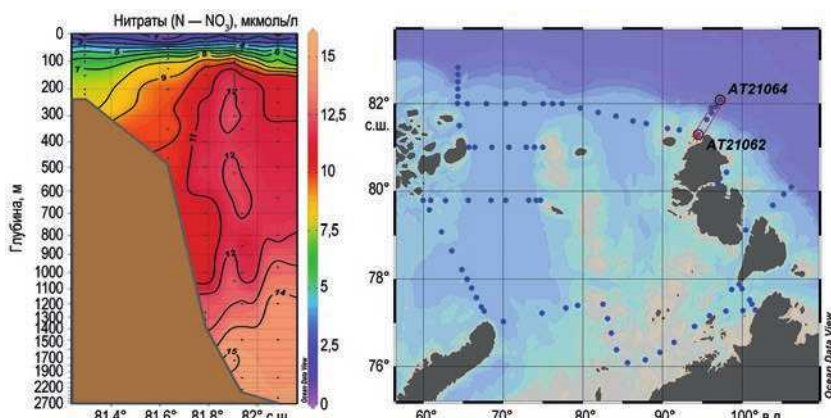


Рис. 3.3.4. Вертикальное распределение содержания нитратного азота ($N - NO_3$, мкмоль/л) в районе континентального склона к северу от арх. Северная Земля и схема расположения разреза.

дная масса выделяется по опусканию изолиний пониженных концентраций биогенных элементов на сотни метров вблизи континентального склона (рис. 3.3.4).

Содержание силикатов в этих водах составляет 4,2—4,5 мкмоль/л, фосфатов — 0,5—0,65 мкмоль/л, нитратов — около 10 мкмоль/л. В нижней части склона, на глубине 800—1000 м, эти характеристики чуть выше — около 4,5; 0,65 и 10,5 мкмоль/л соответственно. Данная водная масса вследствие нахождения на шельфе несколько более насыщена кислородом, чем окружающие воды. Она наблюдалась в этом районе и ранее, а также в ходе экспедиции «Арктика-2018».

Наибольшее разнообразие в пространственном распределении гидрохимических характеристик наблюдается на разрезе, проходящем через шельф, центральную часть континентального склона Восточно-Сибирского моря и прилегающую часть Арктического бассейна (рис. 3.3.5).

Верхний 30—40-метровый слой на протяжении всего разреза отличается максимальными значениями концентрации растворенного кислорода (9—10 мл/л). На глубине 20—25 м наблюдается характерный промежуточный максимум кислорода. Механизм его формирования связан с активностью фитопланктона. Содержание кремния в северной части разреза в поверхностном слое наименьшее (менее 6 мкмоль/л), над склоном оно увеличивается до 8—9 мкмоль/л и на шельфе вновь уменьшается. Содержание нитратов на поверхности незначительно (1,5 мкмоль/л), содержание фосфатов превышает 0,7 мкмоль/л. Поверхностный слой почти повсеместно подстилается прослойкой вод тихоокеанского происхождения с очень высоким содержанием биогенных элементов и низким содержанием кислорода. Содержание кремния здесь увеличивается до более чем 40 мкмоль/л, фосфатов — до 2,2 мкмоль/л, нитратного азота — до 20 мкмоль/л, а содержание кислорода уменьшается до 5,5—6,5 мл/л (65—80 % насыщения). В северной части разреза мощность этой прослойки максимальна. Здесь она располагается на глубине 50—150 м. Далее в направлении склона ее средняя толщина постепенно уменьшается за счет поднятия нижней границы. Отмечаются локальные колебания толщины слоя тихоокеанских вод, совпадающие с колебаниями изогалин. В районе континентального склона (глубина 200—350 м) прослойка обогащенных биогенными элементами вод прерывается. При этом здесь наблюдается поднятие нижележащих вод, относительно обедненных

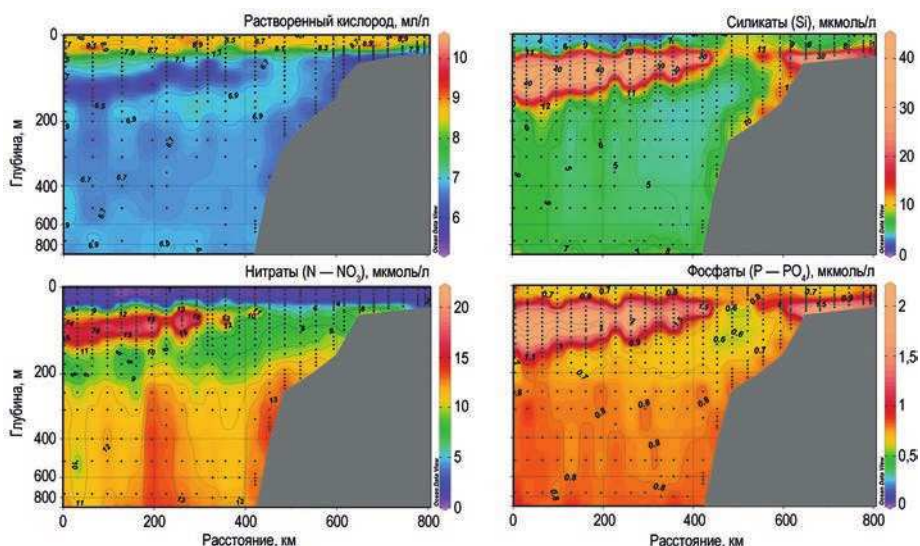


Рис. 3.3.5. Вертикальное распределение растворенного кислорода, мл/л, силикатов (Si, мкмоль/л), нитратного азота ($N - NO_3$, мкмоль/л) и фосфатов ($P - PO_4$, мкмоль/л) на разрезе через центральную часть шельфа и континентальный склон Восточно-Сибирского моря.

биогенными элементами и лучше насыщенных кислородом, а на поверхности наблюдается увеличение содержания кремния, что может говорить о вытеснении тихоокеанских вод к поверхности за счет подъема галоклина. В шельфовой мелководной части разреза придонные воды Восточно-Сибирского моря значительно обогащены биогеогенными элементами (содержание силикатов более 30 мкмоль/л, фосфатов более 1,7 мкмоль/л) и обесбужены кислородом. В целом по результатам анализа гидрохимических данных насыщенность поверхностного слоя морей и бассейна СЛО растворенным кислородом превышала 100 %, что свидетельствует о продолжавшихся процессах фотосинтеза.

По высоким концентрациям силикатов и повышенным значениям удельной щелочности было зафиксировано продвижение вод материкового стока рек Оби и Енисей в восточном направлении вплоть до пролива Вилькицкого и частично в западную часть моря Лаптевых.

Характер распределения нитратного азота в районе желоба Св. Анны, в южной части восточного склона и в северной части западного может свидетельствовать о начале потребления нитратов за счет фотосинтеза еще в период зимней конвекции, за счет чего воды с низким содержанием нитратов способны погружаться в придонные слои желоба Св. Анны.

В районе континентального склона, к северу от арх. Северная Земля, по вертикальному распределению биогеогенных элементов, пониженной температуре воды и повышенному содержанию кислорода зафиксировано присутствие ранее наблюдавшихся трансформированных на шельфе атлантических водных масс.

Тихоокеанские водные массы, выделяющиеся по повышенным концентрациям биогеогенных элементов, и в первую очередь кремния, прослеживаются в районе Восточно-Сибирского моря (от 175° в.д.) в слое от 30 до 100 м. В районе континентального склона прослойка тихоокеанских вод прерывается за счет взаимодействия с шельфовым склоном и поднятия глубинных вод.

3.4. ВЕТРОВОЕ ВОЛНЕНИЕ

Ввиду отсутствия продолжительных инструментальных измерений волнения в арктических морях России обзор ветрового волнения основывается на результатах модельных расчетов и прогнозов. Мониторинг ветро-волновых условий осуществляется ежедневным использованием авторской спектрально-параметрической модели AARI-PD2, разработанной в ЛО ГОИН и модифицированной в ААНИИ. Район Российской Арктики аппроксимируется двумя большими расчетными областями с шагом 1,0° по долготе и 0,5° по широте. Первая расчетная область включает в себя Баренцево и Карское моря (западный сектор), а вторая – моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское (восточный сектор). Основными исходными данными модели являлись поля атмосферного давления на уровне моря (или поля составляющих скорости ветра на высоте 10 м), температура воздуха на высоте 2 м, а также батиметрические данные в узлах расчетной сетки. Исходные данные оперативно поступают из метеорологического центра Брекнелл (Великобритания, EGRR) в ААНИИ в центр коммутации сообщений (ЦКС UNIMAS) автоматизированной системы передачи данных (АСПД) Росгидромета (формат данных GRIB1). Положение кромки льда при расчетах задавалось по ежедневным спутниковым многоканальным микроволновым данным (SSM/I) и уточнялось по данным реанализа сплоченности льда ААНИИ.

По результатам модельных расчетов была выполнена оценка повторяемости значений максимумов значительных высот волн (H_s – significant wave height), обеспеченностью 13 % на акватории арктических морей России для отдельных месяцев года. Сведения о распределении величины H_s для Баренцева моря приведены в табл. 3.4.1, для Карского моря — в табл. 3.4.2, для акватории морей восточной части Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского) — в табл. 3.4.3 – 3.4.5.

Баренцево море

Из табл. 3.4.1 видно, что на акватории Баренцева моря в 2021 г. преобладало волнение с высотой волн от 2 до 4 м (59 % случаев). Число случаев, когда высота максимумов значительных волн на акватории Баренцева моря превышала 5 м, со-

Таблица 3.4.1

Повторяемость (число дней) различных градаций высоты волн (H_s) в Баренцевом море в 2021 г.

Месяц	Высота волн, м										
	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8	8—9	9—10	10—11
Январь	—	—	—	12	14	3	1	1	—	—	—
Февраль	—	2	8	8	6	1	3	—	—	—	—
Март	—	—	8	12	3	1	5	—	—	1	1
Апрель	—	—	10	11	4	4	1	—	—	—	—
Май	—	6	11	13	1	—	—	—	—	—	—
Июнь	—	5	15	9	1	—	—	—	—	—	—
Июль	—	10	11	6	2	2	—	—	—	—	—
Август	—	14	11	5	1	—	—	—	—	—	—
Сентябрь	—	6	9	9	3	3	—	—	—	—	—
Октябрь	—	1	6	10	8	4	2	—	—	—	—
Ноябрь	—	—	7	9	9	5	—	—	—	—	—
Декабрь	—	4	9	8	8	2	—	—	—	—	—
Итого за год	—	48	105	112	60	25	12	1	—	1	1

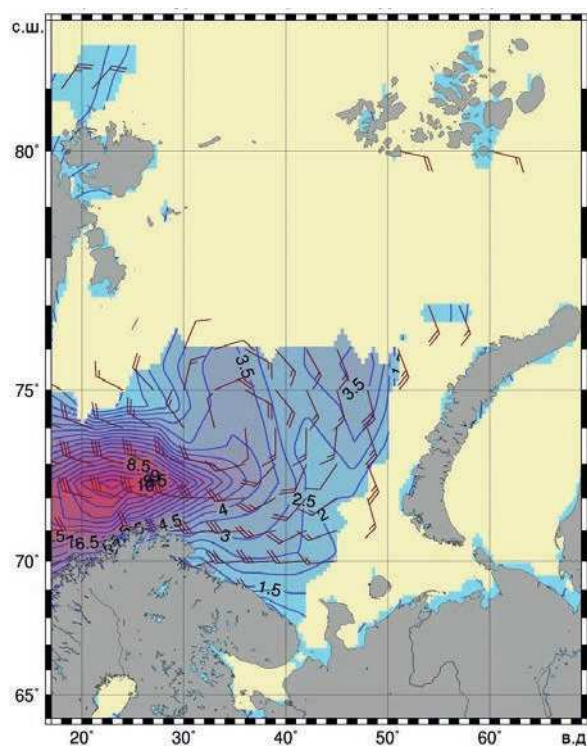


Рис. 3.4.1. Поле ветра и высоты волн (H_s , м) в Баренцевом море на 00 ч UTC 24 марта 2021 г.

ставило в 2021 году 11 %. Это значение ниже по сравнению с 2020 годом (2007 г. — 30 %, 2008 г. — 27 %, 2009 г. — 24 %, 2010 г. — 23 %, 2011 г. — 16 %, 2012 г. — 13 %, 2013 г. — 10 %, 2014 г. — 8 %, 2015 г. — 15 %, 2016 г. — 11 %, 2017 г. — 13 %, 2018 г. — 13 %, 2019 г. — 9 %, 2020 г. — 17 %).

Самым штормовым месяцем в Баренцевом море в 2021 году стал март (8 штормовых дней с высотой волн более 5 м). Наибольшая продолжительность штормовых периодов в марте составляла 3 дня (с 19 по 21 марта и с 23 по 25 марта).

Максимальная значительная высота волн (более 10 м) была рассчитана в пограничной с Норвежским морем западной части Баренцева моря 24 марта 2021 г. на 00 ч UTC. Это значение на 2 м выше, чем в марте 2020 г.

На рисунке 3.4.1, в качестве примера, приведено поле ветра и высот волн H_s на акватории Баренцева моря на 00 ч UTC 24 марта 2021 г.

Карское море

В Карском море в начале января 2021 г. два небольших участка моря еще оставались открытыми. К середине января Карское море полностью покрылось льдом. Открываться море стало лишь в конце мая — начале июня. Как видно из табл. 3.4.2 в Карском море в 2021 г. в большинстве случаев развивалось волнение в диапазоне высот от 1 до 3 м (72 % случаев). Наиболее штормовыми месяцами стали ноябрь и октябрь. Наибольшая расчетная высота волн в октябре составила более 3,5 м (25 октября на 12 и 18 ч), а в ноябре максимальное значение превышало 4,0 м (4 ноября на 00 и 06 ч), что на 3 м ниже по сравнению с 2020 г.

**Повторяемость (число дней) различных градаций высоты волн (H_s)
в Карском море в 2021 г.**

Месяц	Высота волн, м				
	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5
Январь (до 16 января)	2	6	5	2	1
Июнь	13	12	5	—	—
Июль	2	14	12	3	—
Август	2	16	13	—	—
Сентябрь	1	10	11	8	—
Октябрь	—	8	14	9	—
Ноябрь	3	10	9	7	1
Декабрь (до 19 декабря)	3	6	6	4	—
Итого	26	82	75	33	2

Карское море почти полностью очистилось ото льда к концу сентября, граница области чистой воды доходила в это время до 84° с.ш. В начале октября Карское море стало быстро закрываться (что на месяц раньше по сравнению с 2020 г.), и к началу ноября больше половины моря было покрыто льдом. Закрылось Карское море во второй декаде декабря.

На рисунке 3.4.2, в качестве примера, приведено поле ветра и высот волн H_s на акватории Карского моря на 18 ч UTC 25 октября 2021 г.

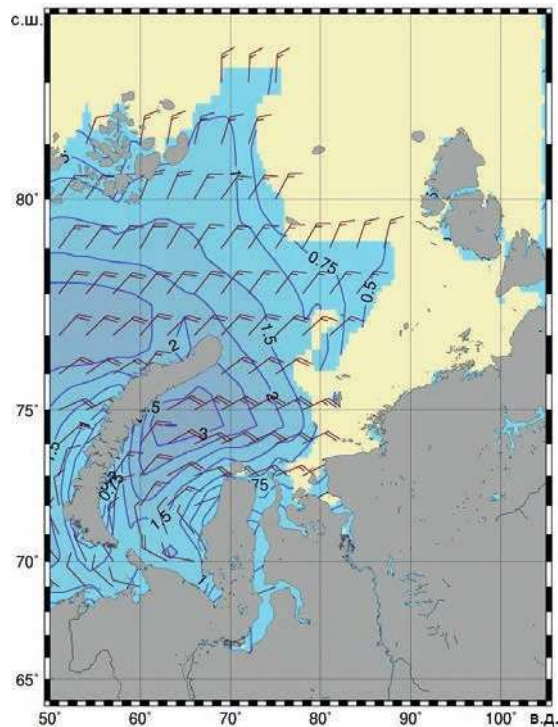


Рис. 3.4.2. Поле ветра и высот волн (H_s , м) в Карском море на 18 ч UTC 25 октября 2021 г.

Моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское

Поскольку большую часть года моря восточной части Арктики покрыты льдом, то в табл. 3.4.3–3.4.5 приведено распределение значительных высот волн только для тех месяцев, когда площадь свободных ото льда акваторий позволяла выполнить оценки основных характеристик волнения. В таблицах учтены случаи ветрового волнения на акваториях морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского на открытой воде до кромки льда.

Таблица 3.4.3

**Повторяемость (число дней) различных градаций высоты волн (Hs)
в море Лаптевых в 2021 г.**

Месяц	Высота волн, м			
	0—1	1—2	2—3	3—4
Июнь	9	18	3	—
Июль	—	12	15	4
Август	—	15	13	3
Сентябрь	—	9	14	7
Октябрь (до 28 октября)	1	9	11	6
Итого	10	63	56	20

Таблица 3.4.4

**Повторяемость (число дней) различных градаций высоты волн (Hs)
на акватории Восточно-Сибирского моря в 2021 г.**

Месяц	Высота волн, м				
	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5
Июнь	17	12	1	—	—
Июль	—	22	9	—	—
Август	1	13	17	—	—
Сентябрь	—	13	12	3	2
Октябрь (до 24 октября)	3	14	5	2	—
Итого	21	74	44	5	2

Таблица 3.4.5

**Повторяемость (число дней) различных градаций высоты волн (Hs)
в Чукотском море в 2021 г.**

Месяц	Высота волн, м					
	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6
Июнь	8	16	6	—	—	—
Июль	3	16	11	1	—	—
Август	1	14	11	5	—	—
Сентябрь	1	15	11	3	—	—
Октябрь	—	4	22	3	1	1
Ноябрь (до 19 ноября)	5	7	3	4	—	—
Итого	13	72	64	16	1	1

Как видно из таблиц 3.4.3 – 3.4.5, в море Лаптевых и Чукотском море в 2021 г. преобладало волнение с высотами от 1 до 3 м, а в Восточно-Сибирском море преобладало волнение с высотами волн от 1 до 2 м.

Наиболее штормовым месяцем для морей Лаптевых стали сентябрь и октябрь, для Восточно-Сибирского — сентябрь, а для Чукотского моря — октябрь.

Наибольшая расчетная высота волн в море Лаптевых составила более 3,5 м (25 июля, 13 августа, с 5 по 8 сентября, 9 октября и с 15 по 17 октября). Это значение на 4 м ниже по сравнению с 2020 г.

Наибольшая расчетная высота волн в Восточно-Сибирском море составила более 4,5 м (7 сентября на 12 и 18 ч UTC), что на 3,0 м ниже, чем в 2020 г.

Наибольшая расчетная высота волн в Чукотском море составила более 5,0 м (20 октября на 12 ч UTC), что на 2 м ниже, чем в 2020 г.

Море Лаптевых стало открываться в конце мая - начале июня. Граница области чистой воды в море Лаптевых дошла в августе до 83°с.ш. и сохранялась на этой широте до середины сентября. Закрылось море Лаптевых в конце октября.

Восточно-Сибирское море стало открываться в конце мая - начале июня. В это время появилась небольшая область чистой воды севернее Новосибирских о-вов, которая расширилась в течение июня месяца от 75 — 76° до 77° с.ш. Далее (в июле и августе) Восточно-Сибирское море открывалось очень медленно, и даже в конце сентября в восточной части моря еще оставался лед. Граница области чистой воды в начале сентября в Восточно-Сибирском море доходила до 78° с.ш.

Чукотское море стало открываться в конце мая — начале июня. К концу июня область чистой воды доходила до 71° с.ш., к концу августа Чукотское море было открыто до 72°с.ш., а в течение сентября граница области чистой воды менялась от 72 до 75° с.ш.

На рисунке 3.4.3, в качестве примера, приведено поле ветра и высот волн H_s для морей восточной Арктики на 12 ч UTC 07 сентября 2021 г.

Анализ результатов модельных расчетов значительных высот волн ветрового волнения (H_s) за 2021 г. на акватории арктических морей России позволяет сделать следующие выводы.

В Баренцевом море преобладало волнение с высотой волн от 2 до 4 м. Число случаев, когда высота максимумов значительных волн на акватории Баренцева моря

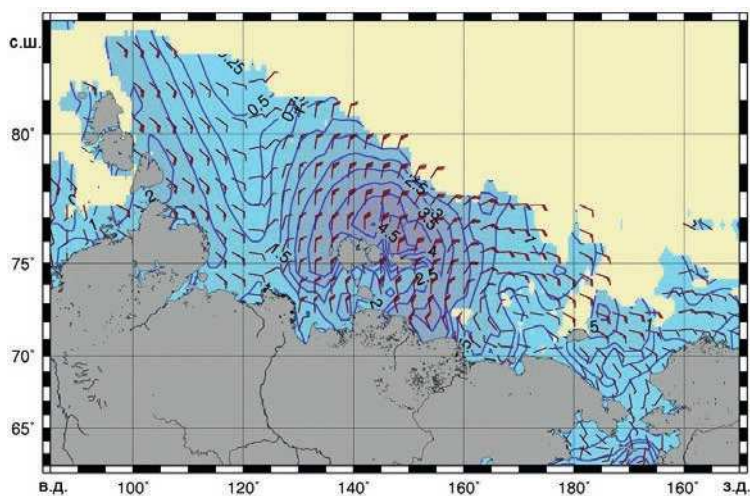


Рис. 3.4.3. Поле ветра и высот волн (H_s , м) в морях восточной Арктики на 12 ч UTC 07 сентября 2021 г.

превышала 5 м, составило в 2021 г. 11 %. Самым штормовым месяцем в Баренцевом море в 2021 г. стал март. Максимальная значительная высота волн (более 10 м) была рассчитана в пограничной с Норвежским морем западной части Баренцева моря 24 марта 2021 г. на 00 ч UTC. Это значение на 2 м выше, чем в 2020 г.

В Карском море в большинстве случаев развивалось волнение в диапазоне высот от 1 до 3 м. Наиболее штормовыми месяцами стали ноябрь и октябрь. Наибольшая расчетная высота волн в октябре составила более 3,5 м (25 октября на 12 и 18 ч), а в ноябре максимальное значение превышало 4,0 м (4 ноября на 00 и 06 ч). Это значение на 3,0 м ниже по сравнению с 2020 г. В Карском море в начале января 2021 г. два небольших участка моря еще оставались открытыми. К середине января Карское море полностью покрылось льдом. Открываться море стало лишь в конце мая – начале июня. Карское море почти полностью очистилось ото льда к концу сентября, граница области чистой воды доходила в это время до 84° с.ш. В начале октября Карское море стало быстро зарываться (что на месяц раньше по сравнению с 2020 г.), и к ноябрю больше половины моря было покрыто льдом. Закрылось Карское море во второй декаде декабря.

В море Лаптевых преобладало волнение с высотами от 1 до 3 м, наиболее штормовыми месяцами для моря Лаптевых стали сентябрь и октябрь, максимальная расчетная высота волны составила в октябре более 3,5 м, что на 4,0 м ниже по сравнению с 2020 г.

В Восточно-Сибирском море преобладало волнение с высотами волн от 1 до 2 м. Наиболее штормовым месяцем для Восточно-Сибирского моря стал сентябрь, максимальная расчетная высота волны составила в октябре более 4,5 м, что на 3,0 м ниже, чем в 2020 г.

В Чукотском море преобладало волнение от 1 до 3 м. Наиболее штормовым месяцем для Чукотского моря стал октябрь, а наибольшая расчетная высота волн в Чукотском море составила более 5,0 м, что на 2 м ниже, чем в 2020 г.

Море Лаптевых стало открываться в конце мая — начале июня. Граница области чистой воды в море Лаптевых дошла в августе до 83° с.ш. и сохранялась на этой широте до середины сентября. Закрылось море Лаптевых в конце октября.

Восточно-Сибирское море стало открываться в конце мая — начале июня. В это время появилась небольшая область чистой воды севернее Новосибирских о-вов, которая расширилась в течение июня месяца от 75-76° до 77° с.ш. Далее (в июле и августе) Восточно-Сибирское море открывалось очень медленно, и даже в конце сентября в восточной части моря еще оставался лед. Граница области чистой воды в начале сентября в Восточно-Сибирском море доходила до 78° с.ш.

Чукотское море стало открываться в конце мая — начале июня. К концу июня область чистой воды доходила до 71° с.ш., к концу августа Чукотское море было открыто до 72° с.ш., а в течение сентября граница области чистой воды менялась от 72 до 75° с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщив данные мониторинга развития и перестройки крупномасштабных атмосферных процессов и характера их проявления в метеорологических условиях полярного района за период январь — декабрь 2021 г., можно сделать следующие основные выводы.

1. В атлантико-евразийском секторе Северного полушария произошла перестройка в направленности крупномасштабных атмосферных процессов: от преобладания западной (W) формы циркуляции в 2020 г. к преобладанию восточной (E) формы циркуляции в 2021 г. В тихоокеано-американском секторе сохранилась аномально высокая повторяемость меридиональных процессов типа M1.

2. При усилении арктического антициклона циклоны в системе исландского и алеутского минимумов смещались по более низкоширотным траекториям чаще, чем в 2020 г. Под влиянием арктического антициклона фон атмосферного давления в полярном районе повысился на 4,7 гПа: от отрицательной аномалии $-2,9$ гПа в 2020 г. до положительной аномалии $+1,8$ гПа в 2021 г.

3. Во всех месяцах 2021 г. в полярном районе преобладали адвекция теплых воздушных масс и положительные средние месячные аномалии температуры воздуха. Средняя годовая аномалия температуры воздуха в полярном районе была выше нормы на $2,9$ °C, что на $1,1$ °C ниже, чем в 2020 г.

4. На трассе СМП арктических морей России в 2021 г. во всех месяцах преобладали положительные аномалии температуры воздуха. Наиболее значительные аномалии температуры воздуха отмечались на акватории морей Лаптевых и Карского, а наиболее низкие — на акватории морей Чукотского и Восточно-Сибирского. По сравнению с 2020 г. в 2021 г. в среднем по трассовой части от моря Карского до Чукотского значения аномалии температуры воздуха понизились на $2,9$ °C: от $4,9$ °C в 2020 г. до $2,0$ °C в 2021 г.

Результаты мониторинга состояния приземной атмосферы в Северной полярной области позволяют сделать вывод о сохранении в последние годы тенденции к потеплению в высоких широтах.

Развитие ледовых условий характеризовалось следующими особенностями.

Характерной чертой осеннего ледообразования 2020 г. являются его позднее начало и медленное развитие в морях российского сектора Арктики в начале осеннего периода (сентябрь — октябрь) и значительное увеличение интенсивности развития ледяного покрова в период с ноября по декабрь.

Позднее начало ледообразования в осенний период, но вместе с тем большая интенсивность его развития в ноябре — декабре 2020 г. привели к быстрому увеличению площади ледяного покрова, но медленному нарастанию его толщины. В январе все арктические моря были покрыты дрейфующими и припайными льдами разного возрастного состава. В середине января в Баренцевом море, юго-западной части Карского моря и Чукотском море преобладали молодые льды. В остальных морях российской Арктики — северо-восточной части Карского, морях Лаптевых и Восточно-Сибирском — преобладали однолетние тонкие льды (диапазон толщины 30—70 см).

В январе были хорошо развиты основные структуры дрейфа льда в Северном Ледовитом океане — Трансарктический перенос льда и Канадский антициклонический круговорот.

Развитие припая в морях в течение первых зимних месяцев проходило с малой интенсивностью. Площадь припая была меньше средних многолетних значений на акватории всех российских арктических морей за исключением западной части Восточно-Сибирского моря. Припай в западной части Восточно-Сибирского моря был развит на 25 % больше нормы и сохранялся весь квартал. В середине марта суммарная площадь припая в российских арктических морях составила 500 тыс. км² при норме 586 тыс. км², что на 15 % меньше средних многолетних значений. Небольшое развитие припая наблюдалось во всех российских арктических морях, кроме района Новосибирских островов.

В весенний период интенсивность нарастания льда по толщине была близка к норме во всех морях российского сектора Арктики, что привело к некоторому сокращению отрицательных аномалий толщины льда, сформировавшихся в зимние месяцы. Во всех морях наблюдалось уменьшение отрицательной аномалии от –20...–40 до –10...–30 см. В некоторых районах побережья, таких как амдерминское побережье в юго-западной части Карского моря, район Новосибирских островов, прибрежная центральная часть Восточно-Сибирского моря, толщина льда в припаях приблизилась к средним многолетним значениям.

Площадь льда по расчетам на начало мая и начало октября составила 13,5 и 5,1 млн км², соответственно. Вычисленные объемы льда в СЛО на эти даты составили 24,0 и 5,8 тыс. км³. Таким образом, уменьшение объема льдов за летний сезон составило 18,2 тыс. км³.

Основной особенностью ледообразования в осенний сезон 2021 г. было его начало в близкие к средним многолетним сроки в тех районах, в которых сохранились остаточные льды (северо-восточной части Карского моря и восточной части Восточно-Сибирского моря, северной части моря Бофорта), и позднее начало в тех районах, которые были полностью свободны ото льда.

В первой декаде октября волна ледообразования подошла к северной границе российских арктических морей. Одновременно с подходом волны ледообразования с севера наблюдалось его начало в прибрежных районах морей.

Гидрологический режим СЛО и его морей характеризовался следующими особенностями.

Согласно результатам наблюдений, выполненных в 2021 г., гидрологический режим СЛО в районе Канадской глубоководной котловины продолжает характеризоваться аномальным состоянием по отношению к климатическому среднему.

Распределение поверхностной солености характеризуется наличием выраженной отрицательной аномалии в Амеразийском суббассейне, которая в течении года изменялась от –2,5 ‰ в первом квартале до –2,8 ‰ во втором и до –2,1 ‰ третьем.

Сохраняется положительная аномалия температуры ядра атлантических вод (АВ), значение которой в Канадской глубоководной котловине составило +0,3 °С.

Так же как и АВ, летние тихоокеанские воды характеризуются повышенной температурой, превышающей климатическое среднее на 1,7—2,0 °С. Как и в предыдущие периоды, отмечалось увеличение глубины залегания нижней границы ЛТВ, которая составила 165—180 м (130 м согласно климатическим данным).

Полученные оценки аномалий температуры АВ в 2021 г. полностью соответствуют значениям за предшествующий 2020 г., что свидетельствует об отсутствии как положительного, так и отрицательного тренда температуры АВ в Амеразийском суббассейне СЛО.

Иная ситуация сложилась в западном секторе Арктики. По данным экспедиций «Арктика-2021» в сентябре и «Арктический плавучий университет» в июне 2021 г., самые высокие значения температуры теплых атлантических вод в северо-восточной части Баренцева моря на границе с Карским море были ниже по сравнению с данными экспедиционных наблюдений за 2013 г. на 0,13 °С. Выявленное понижение максимальной температуры АВ в 2021 г. зафиксировано впервые за последние годы.

Проведенный анализ данных наблюдений за колебаниями уровня на станциях арктических морей показал следующее:

- в 2021 г. можно отметить большое число пропусков данных для станций юго-западной части Карского моря. С марта прекратилось поступление постоянных данных со станции Амдерма;

- на протяжении 2021 г. колебания уровня арктических морей в основном происходили на фоне, превышающем средние многолетние значения, но в целом по сравнению с 2020 г. уровень моря во всех районах понизился;

- можно отметить, что сезонные колебания уровня были не совсем типичными для юго-запада Карского моря, а также для Обской губы. В остальных районах изменения уровня отличались хорошо выраженным годовым ходом с минимумом в весенний период и максимумами в летний;

- в 2021 г. наиболее существенные сгонно-нагонные колебания уровня наблюдались в разное время в зависимости от района наблюдений: в Карском море сильные нагоны зафиксированы в марте и октябре, а сгоны — в январе и феврале; в море Лаптевых максимальные нагоны наблюдались в летние месяцы и в октябре, а сгоны — в феврале и сентябре;

- в межгодовой изменчивости уровня сохраняется положительная тенденция на всех станциях морей Карского и Лаптевых, хотя величина тренда несколько уменьшилась из-за понижения среднегодового уровня на всех станциях.