

УДК 551.467.3(265.53)

В.М. Пищальник¹, И.Г. Минервин², П.А. Трусков^{3*}¹ Сахалинский государственный университет,
693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290;² СКБ САМИ ДВО РАН,
693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Максима Горького, 25;³ Сахалин Энерджи Инвестмент Компани, Лтд.,
123242, г. Москва, Новинский бульвар, 31**ОЦЕНКА ОБЪЕМА ЛЬДА ОХОТСКОГО МОРЯ
ПО ЕГО ВОЗРАСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ
ЗА ПЕРИОД 2001–2019 ГГ.**

На основе анализа данных, полученных с помощью пассивных и активных микроволновых спектро радиометров с искусственных спутников Земли, с месячной дискретностью определены границы зон льда различного возраста в Охотском море за период с 2001 по 2019 г. Средневзвешенная толщина льда в выделенных зонах рассчитывалась на основе толщины трех основных возрастных характеристик и их весовых соотношений в ледяном покрове без учета деформации льда. Площадь этих зон вычислялась с учетом сплоченности льда. На основе полученных данных рассчитан объем льда в море и в его отдельных регионах. Анализ вариаций средних за сезон значений объемов льда позволил заключить, что в начале XXI века уменьшение объема льда в Охотском море в целом происходило со средней скоростью 32,2 км³/10 лет, при этом ледовитость снижалась на 3,2 %/10 лет, а средневзвешенная толщина льда — на 3,4 см/10 лет. В Охотском море в целом за исследуемый период объем льда сократился на 34,5 %. Изменение объема произошло за счет уменьшения толщины льда и ледовитости соответственно на 60 и 40 %.

Ключевые слова: искусственные спутники Земли, ледовитость, толщина и объем льда, многолетняя изменчивость, Охотское море.

DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-427-444.

Pishchalnik V.M., Minervin I.G., Truskov P.A. Evaluation of ice volume in the Okhotsk Sea by the ice age characteristics for the period of 2001–2019 // *Izv. TINRO*. — 2020. — Vol. 200, Iss. 2. — P. 427–444.

Age of ice in the Okhotsk Sea in 2001–2019 is determined by analysis of satellite data from passive and active microwave spectroradiometers. The areas with certain age composition

* Пищальник Владимир Михайлович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru; Минервин Игорь Георгиевич, кандидат физико-математических наук, врио директора, e-mail: igor@minervin.ru; Трусков Павел Анатольевич, доктор технических наук, начальник отдела, e-mail: pavel.truskov@sakhalinenergy.ru.

Pishchalnik Vladimir M., D.Tech., principal researcher, Sakhalin State University, 290, Lenin Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru; Minervin Igor G., Ph.D., acting director, Special Design Bureau of Marine Research Automation, Far-Eastern branch of Russian Ac. Sci., 25, Maxim Gorky Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia, e-mail: igor@minervin.ru; Truskov Pavel A., D.Tech., head of department, Sakhalin Energy Investment Co., Ltd., 31, Novinsky Blvd, Moscow, 123242, Russia, e-mail: pavel.truskov@sakhalinenergy.ru.

are contoured with monthly discreteness. Mean thickness of ice in these areas is calculated by weighted averaging of thickness for three main forms, neglecting the ice deformation. The ice volume is calculated by these areas, taking into account the ice concentration. The total mean winter ice volume in the Okhotsk Sea decreased in two decades with the rate of 32.2 km³/decade, on average, while the ice cover decreased by 3.2 %/decade and the average ice thickness decreased by 3.4 cm/decade. Total loss of the ice volume in the Okhotsk Sea in 2001–2019 is estimated as 34.5 %. The ice volume decreasing was caused by both ice thickness lowering (60 %) and ice cover reduction (40 %).

Key words: satellite sensing, ice cover, ice thickness, ice volume, long-term variability, Okhotsk Sea.

Введение

Охотское море простирается с юго-запада на северо-восток на 2463 км (от 43°20' до 62°45' с.ш.) и характеризуется специфическими и весьма разнообразными условиями льдообразования [Плотников и др., 1998; Зонн, Костяной, 2009; Минервин и др., 2015]. Большая часть его акватории находится в зоне муссонной циркуляции и располагается к юго-востоку от Полюса холода Северного полушария. Одним из результатов активного воздействия зимнего муссона (с декабря по март) является формирование полыньи над обширным шельфом в северо-западной части моря, которая является самым крупным районом генерации льда в Северном полушарии [Гладышев, 1998; Gladyshev et al., 2000; Гладышев, Хен, 2004; Ohshima et al., 2016]; другим — усиление дрейфа льда в южных направлениях, который формируется общей циклонической циркуляцией вод [Плотников и др., 1998; Алексеев и др., 2001; Kumano et al., 2003]. Такое сочетание природных факторов определяет две отличительные особенности ледового режима Охотского моря: увеличение толщины льда с севера на юг и самое большое по площади южное скопление однолетнего льда в Северном полушарии.

Исследования ледяного покрова Охотского и Японского морей выполняются на грантовой основе в Научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли (НИЛ ДЗЗ) Сахалинского государственного университета (СахГУ) и Российской академии наук (РАН) с 2008 г. Основные результаты работ за последние пять лет представлены в публикациях [Минервин и др., 2015; Моделирование..., 2016; Пищальник и др., 2016, 2017; Романюк и др., 2017; Pishchal'nik et al., 2019; Исследование..., 2020].

В работах ряда исследователей неоднократно подчеркивалось существенное влияние льдообразования на процессы перераспределения тепла, солей и питательных веществ в биогеохимических системах, а также вентиляции вод как в Охотском море, так и в северной части Тихого океана [Talley, 1991; Nihashi et al., 2009; Kanna et al., 2014; Ohshima et al., 2014]. Поэтому вопросам вычисления объема льда всегда уделяется пристальное внимание [Nihashi et al., 2009, 2012, 2018; Ohshima et al., 2016].

Современные расчеты площади ледяного покрова с достаточной степенью точности производятся по данным пассивного микроволнового излучения со спутников AMSR-2 с 1978 г. [Митник и др., 2015; Романюк и др., 2015]. С определением толщины льда дело обстоит значительно сложнее. Спутник ICESat с лазерным высотомером проводил измерения высоты надводного борта (freeboard) ледяного покрова с 2004 по 2009 г. [<https://icesat.gsfc.nasa.gov/>; Fukumachi et al., 2009; Nihashi et al., 2009, 2018]. После девятилетнего перерыва 15 сентября 2018 г. был запущен спутник ICESat-2 с лазерным высотомером нового поколения со счетчиком фотонов, который позволяет с большей точностью выполнять измерения перепада высот.

Прямых инструментальных наблюдений за толщиной льда или его осадкой крайне мало и все они точечные [Астафьев и др., 1997; Алексеев и др., 2001; Fukamachi et al., 2009]. Первые инструментальные измерения толщины дрейфующего льда на шельфе северо-восточного Сахалина были выполнены в марте 1982 г. во время экспедиции на ледоколе «Ермак» [Астафьев и др., 1997; Алексеев и др., 2001]. Затем до 2003 г. толщина льда измерялась во время вертолетных десантов и при помощи UPS-сонаров компании

ASL. В результате измерений было установлено смещение максимума распределения толщины льда в течение ледового сезона в сторону больших градаций от 0,5–1,0 м в январе до 1,5–2,0 м в мае, что не противоречит наблюдениям, выполненным со спутника ICESat [Nihashi et al., 2009, 2018]. В апреле-мае в 54 % случаев наблюдался лед толщиной 0,7–1,2 м, в 18 % — больше 1,2, а в 26 % — 0,3–0,7 м. Также был сделан нетривиальный вывод об увеличении толщины льда в теплые зимы на фоне уменьшения ледовитости моря [Астафьев и др., 1997; Алексеев и др., 2001].

Учитывая особый интерес исследователей к проблеме оценки объема льда в Охотском море и накопленный авторами статьи опыт в проведении прибрежных, судовых и авиационных наблюдений за состоянием ледяного покрова на акватории моря в период с 1975 по 2015 г., к проблеме расчета объема льда было решено подойти следующим образом:

— выделить границы зон льда доминирующего возраста на основе данных спутниковых снимков видимого диапазона начиная с 2001 г. и вычислить площади этих зон с учетом сплоченности льда;

— рассчитать в этих зонах средневзвешенную толщину льда в соответствии с Номенклатурой* без учета его деформации;

— рассчитать вариации объема льда в регионах первого иерархического уровня Охотского моря за период с 2001 по 2019 г. и выполнить анализ полученных результатов.

Такой методологический подход для расчета объема льда в Охотском море применяется впервые. Он позволяет оценить характер многолетней изменчивости объема и толщины льда в море, обеспечивает репрезентативность (в период с 2001 по 2019 г. наблюдались все типы зим) расчетных данных и обоснованность выводов.

Материалы и методы

В настоящее время основным источником информации о ледяном покрове являются данные спутниковых наблюдений, полученные с помощью пассивных и активных микроволновых устройств, установленных на космических аппаратах, которые на регулярной основе начали выполняться с начала 1970-х гг. Несомненным достоинством микроволновых данных является регулярность наблюдений (как следствие отсутствия зависимости от погодных условий: облачности и освещенности) [Митник и др., 2015]. Для дешифрирования возраста льда на акватории Охотского моря была использована коллекция ежедневных снимков поверхности Земли в видимом диапазоне со спектрорадиометра MODIS (пространственное разрешение в надире 250 м/пикс.) с официального сайта NASA [<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>] и архива НИЛ ДЗЗ (рис. 1). Для расчета площади ледяного покрова использована коллекция пентадных (раз в пять дней) карт-схем ледяного покрова Охотского и Японского морей Japan Meteorological Agency (JMA) (рис. 2).

В процессе дешифрирования спутниковых снимков видимого диапазона (сочетание каналов 1–2–1) в условиях безоблачной или малооблачной погоды ледовым экспертом в ГИС ArcMap по цветовой гамме определялись границы зон доминирующего возраста льда на середину каждого месяца для ледовых сезонов с 2000/01 по 2018/19 г. (см. рис. 1). Каждая зона закрашивалась соответствующей цветовой маской (см. рис. 2). В выделенных зонах согласно международной символике для оперативных морских ледовых карт определялось соотношение (в баллах) трех основных (доминирующих) возрастных характеристик льда*. В каждой выделенной зоне по средней толщине льда трех основных возрастов пропорционально их частной сплоченности в баллах (1/10) рассчитывалась средневзвешенная толщина льда по формуле

$$H_{лз} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{si} \cdot C_{si})}{\sum_{i=1}^n C_{si}}$$

* Номенклатура ВМО по морскому льду. Женева, ВМО-№ 259, 1970. Тр. 145.

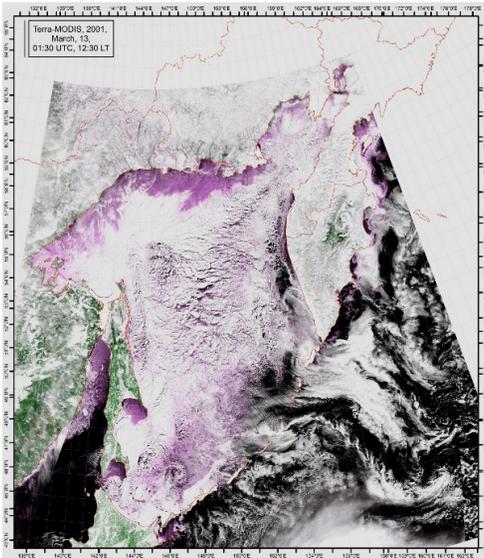


Рис. 1. Пример снимка со спутника TERRA-MODIS для дешифрирования границ зон льда различного возраста за 13 марта 2001 г.

Fig. 1. Example of TERRA-MODIS satellite image used for contouring of the areas with different ice age on March 13, 2001

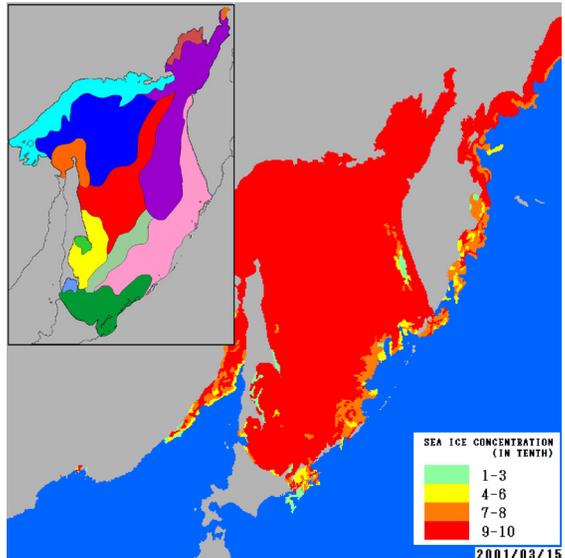


Рис. 2. Пример карты-схемы ледяного покрова Охотского моря из коллекции JMA (спутник AMSR-2) для расчета площади льда. На врезке цветные маски для выделенных зон доминирующего возраста льда

Fig. 2. Example of the ice chart based on AMSR-2 satellite data from JMA collection used for calculating the ice area. Insert: color masks for areas of certain dominant age of ice

где $H_{\text{ЛЗ}}$ — средневзвешенная толщина льда ледовой зоны; H_{si} — средняя толщина льда определенного возраста; C_{si} — частная сплоченность льда определенного возраста в выделенной ледовой зоне; n — количество возрастных стадий в выделенной зоне.

Подготовленная цветовая маска для всех выделенных на акватории моря зон переносилась на карту-схему ледяного покрова JMA за 15-е число для каждого месяца ледового сезона (рис. 2, врезка). Далее с помощью разработанного в СахГУ программного комплекса «ЛЕД», позволяющего рассчитывать площади замкнутых фигур любой конфигурации в пределах акватории моря и с учетом средневзвешенной толщины льда, в выделенных зонах вычислялся его объем для каждого месяца в ледовом сезоне. Средняя за сезон величина объема льда рассчитывалась путем усреднения значений с декабря по май [Романюк и др., 2015; Свидетельство..., 2015].

В расчетах согласно Номенклатуре* принимались следующие опорные значения толщины льда для различного возраста: светлый нилас — 2,5 см; темный нилас — 7,5; серый лед — 12,5; серо-белый лед — 22,5; тонкий однолетний лед — 50,0; тонкий однолетний лед первой стадии — 40,0; тонкий однолетний лед второй стадии — 60,0; однолетний лед средней толщины — 95,0 и толстый однолетний лед — 150,0 см. Толщина доминирующих льдов определялась экспертом для каждого месяца с учетом помесечной типизации каждого региона по суровости его ледовых условий. Коэффициенты наслоенности и торосистости не вводились. Наибольшее количество ледовых зон в массиве (до 15) было выделено на фазе его максимального развития. Площадь зон варьировала от 50 до 100 тыс. км².

Поскольку число сочетаний комбинаций льда различных возрастов ограничено, процесс расчета средневзвешенной толщины льда можно считать в значительной степени формализованным. Пример расчета средневзвешенной толщины для опорных

* Номенклатура... [1970].

Таблица 1
Средневзвешенная толщина ледовых зон для разных возрастных стадий, см
Table 1
Weighted average thickness of ice, by age stages, cm

Зона	Символика ледовой зоны начальных видов	$\frac{10}{19}$ $\frac{21}{X}$	$\frac{10}{37}$ $\frac{21}{X}$	$\frac{10}{55}$ $\frac{21}{X}$	$\frac{10}{73}$ $\frac{21}{X}$
	Толщина зоны	3,0	4,0	5,0	6,0
Молодые льды	Символика ледовой зоны серого льда	$\frac{10}{19}$ $\frac{42}{X}$	$\frac{10}{37}$ $\frac{42}{X}$	$\frac{10}{55}$ $\frac{42}{X}$	$\frac{10}{73}$ $\frac{42}{X}$
	Толщина зоны	8,0	9,0	10,0	11,0
	Символика ледовой зоны серо-белого льда	$\frac{10}{181}$ $\frac{542}{X}$	$\frac{10}{352}$ $\frac{542}{X}$	$\frac{10}{532}$ $\frac{542}{X}$	$\frac{10}{721}$ $\frac{542}{X}$
	Толщина зоны	13,0	14,5	16,5	19,0
Однолетние льды	Символика ледовой зоны однолетнего тонкого льда	$\frac{10}{181}$ $\frac{754}{X}$	$\frac{10}{352}$ $\frac{754}{X}$	$\frac{10}{532}$ $\frac{754}{X}$	$\frac{10}{721}$ $\frac{754}{X}$
	Толщина зоны	24,0	29,0	34,0	41,0
	Символика ледовой зоны однолетнего среднего льда	$\frac{10}{181}$ $\frac{175}{X}$	$\frac{10}{352}$ $\frac{175}{X}$	$\frac{10}{532}$ $\frac{175}{X}$	$\frac{10}{721}$ $\frac{175}{X}$
	Толщина зоны	52,0	58,0	67,0	79,0
	Символика ледовой зоны однолетнего толстого льда	$\frac{10}{181}$ $\frac{417}{X}$	$\frac{10}{352}$ $\frac{417}{X}$	$\frac{10}{532}$ $\frac{417}{X}$	$\frac{10}{721}$ $\frac{417}{X}$
Толщина зоны	96,0	102,5	113,5	129,0	

сочетаний трех доминирующих в зоне возрастов льда приведен в табл. 1. Согласно Руководству по производству ледовых авиационных разведок* ледовый эксперт может определять возрастные характеристики льда с точностью до 1 балла (до 1/10). Анализируя с учетом данного обстоятельства расчетные данные в графе «Толщина зоны», можно заключить, что ошибка вычисления средневзвешенной толщины льда в зоне молодых льдов составит $\pm 1-2$ см. Максимальная ошибка расчета в зоне однолетнего толстого льда может достигать $\pm 5-6$ см. Из практики наблюдений известно, что доля недеформированного однолетнего толстого льда (более 120 см) даже в самые суровые зимы редко превышает 10–15 % площади всего ледяного покрова Охотского моря. Следовательно, ошибка расчета средневзвешенной толщины ледяного покрова не должна превышать $\pm 3-4$ см, что при расчете объема эквивалентно $\pm 3-4$ км³ и соответствует ~1 % от общего объема льда. В процессе будущих исследований для повышения точности вычисления толщины льда следует разработать методическое правило применения коэффициентов торосистости для однолетних льдов и наслоенности для молодого льда, что значительно повысит точность вычисления их объема.

Результаты и их обсуждение

По результатам предыдущих исследований [Моделирование..., 2016; Пищальник и др., 2016; Исследование..., 2020] было установлено, что абсолютный максимум ледовитости в период с 2001 по 2019 г. в Охотском море наблюдался в ледовом сезоне

* Руководство по производству ледовой авиационной разведки. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 240 с.

2000/01 г. с 28 февраля по 15 марта. Задержка наступления холодов в начале сезона 2000/01 г. обусловила меньшие значения средней за сезон ледовитости (60,9 %) по сравнению с сезонами 1978/79 и 1980/81 гг., когда она составляла соответственно 64,9 и 65,1 % [Пищальник и др., 2017]. Поэтому расчетные данные сезона 2000/01 г. привлекались только для оценки размаха анализируемых параметров и при расчете статистик ледовых характеристик не учитывались, поскольку значение его ледовитости выходит за пределы 3σ в исследуемый период.

Анализ многолетних вариаций средних за сезон величин объемов льда, его ледовитости и средневзвешенной толщины (далее толщина) для Охотского моря в целом позволяет заключить, что ход кривых у них схожий по тенденциям (рис. 3, 4, табл. 2).

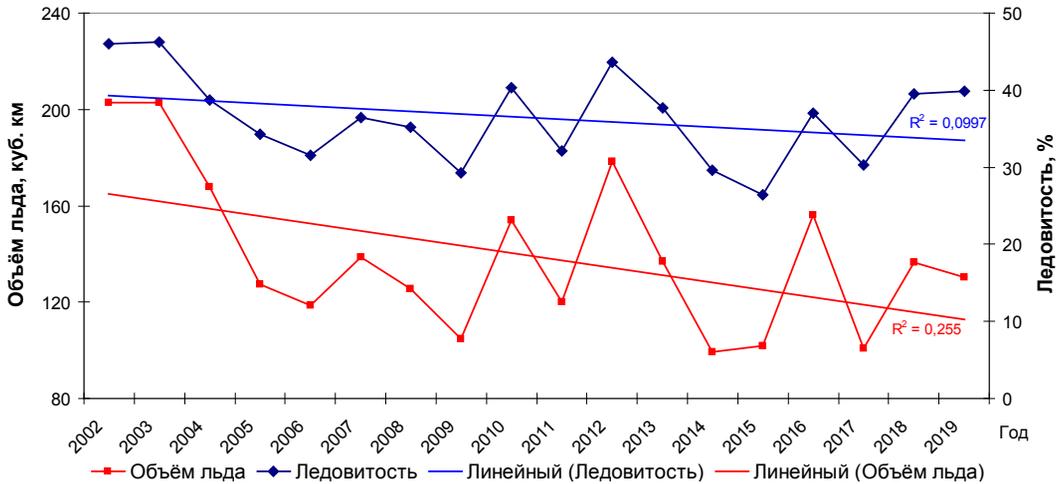


Рис. 3. Вариации средних за сезон величин ледовитости и объемов льда и их тренды в Охотском море за период с 2002 по 2019 г.

Fig. 3. Variations of mean winter ice cover and ice volume in the Okhotsk Sea in 2002–2019 and their trends

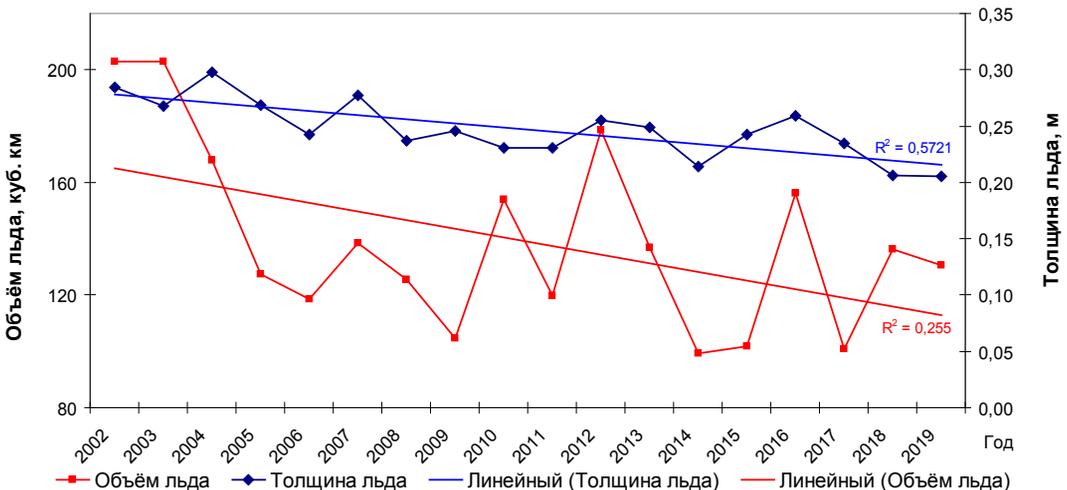


Рис. 4. Вариации средних за сезон величин толщины и объемов льда и их тренды в Охотском море за период с 2002 по 2019 г.

Fig. 4. Variations of mean winter ice thickness and ice volume in the Okhotsk Sea in 2002–2019 and their trends

Коэффициент корреляции объема льда и ледовитости составляет 0,89, объема льда и его толщины — 0,86 (табл. 2). С одной стороны, это обуславливается линейной зависимостью объема от искомым величин, с другой — большей скоростью изменения

ледовитости по сравнению с приростом толщины льда для одних и тех же пространственно-временных масштабов. Вместе с тем значение коэффициента корреляции объема льда с одним из наиболее значимых предикторов, обуславливающих льдообразование, — суммой градусо-дней мороза (СГДМ) — составляет 0,57, а значение коэффициента корреляции СГДМ с ледовитостью — 0,63 (СГДМ рассчитывалась как среднее для пяти прибрежных гидрометеорологических станций [Пищальник и др., 2016]). Минимальный коэффициент корреляции (–0,35) зафиксирован между СГДМ и толщиной льда, что не противоречит полученным ранее выводам [Астафьев и др., 1997; Алексеев и др., 2001].

Таблица 2
Корреляционная матрица характеристик ледового режима Охотского моря за период с 2002 по 2019 г.

Table 2
Correlation matrix of the ice regime parameters for the Okhotsk Sea in 2002–2019

Переменная	Среднее	Станд. откл.	Объем, км ³	Ледовитость, %	Толщина, м	СГДМ
Объем, км ³	145,88	38,92	1,00	0,89	0,86	–0,57
Ледовитость, %	36,51	5,82	0,89	1,00	0,53	–0,63
Толщина, м	0,25	0,03	0,86	0,53	1,00	–0,35
СГДМ	–2075,86	163,70	–0,57	–0,63	–0,35	1,00

Вариации средних за сезон объемов льда находятся в основном в противофазе с колебаниями СГДМ, что хорошо видно на рис. 5. Нарушения синхронности колебаний в период с 2004 по 2009 г. объясняются разнонаправленными изменениями величин СГДМ, толщины льда и ледовитости в разных регионах Охотского моря. Так, например, при уменьшении средних за сезон 2006/07 г. значений СГДМ увеличение объема льда произошло за счет резкого увеличения толщины льда в регионах I и III на фазе максимального развития ледяного покрова (февраль-март). Вполне вероятно, что это обусловлено повышенной циклонической активностью в северной части моря, где в течение этих двух месяцев было зафиксировано 9 глубоких циклонов (для сравнения в 2019 г. — только 1). Данный вопрос требует детального анализа, который планируется выполнить на следующем этапе исследований.

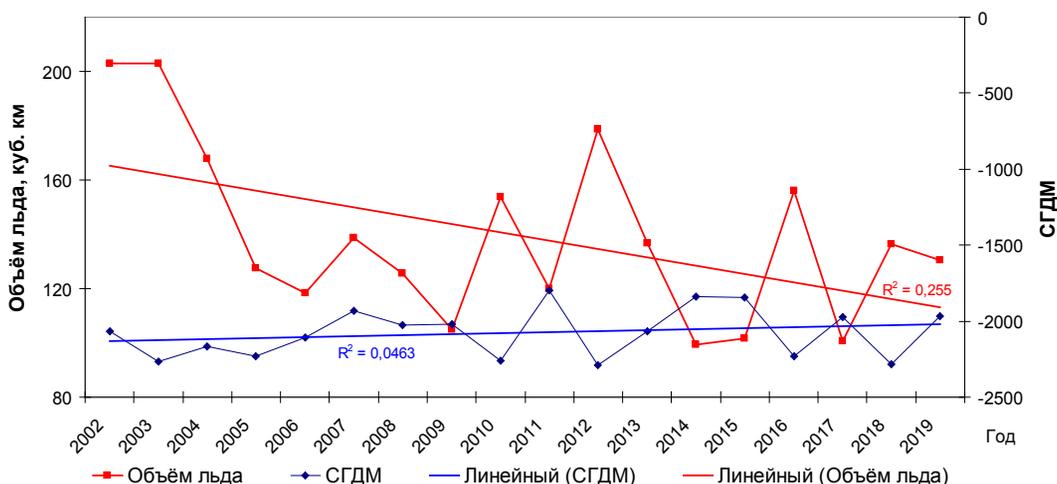


Рис. 5. Вариации средних за сезон объемов льда в Охотском море и СГДМ за период с 2002 по 2019 г.

Fig. 5. Variations of mean winter ice volume in the Okhotsk Sea and accumulated temperature below 0 °C in 2002–2019

Как было установлено ранее [Романюк, 2019], относительно стандартного опорного периода (1961–1990 г.) для климатической стандартной нормы

(1981–2010 гг.)* запаздывание средних сроков достижения одинаковых значений ледовитости на фазе развития составляет 10 сут, а фаза разрушения ледяного покрова наступает на 15 сут раньше. При этом различия в сроках начала активизации процессов льдообразования и разрушения льда от сезона к сезону могут достигать одного календарного месяца.

Совокупность перечисленных выше факторов, определяющих вариации объема льда, представлена в виде поверхностей второго порядка зависимости объема льда от двух переменных: СГДМ и ледовитости (рис. 6) и СГДМ и толщины льда (рис. 7). На поверхностях окружностями выделены соответствующие значения объема льда для конкретного года в исследуемый период. На рис. 6 и 7 хорошо прослеживается нелинейная зависимость объема льда от исследуемых переменных.

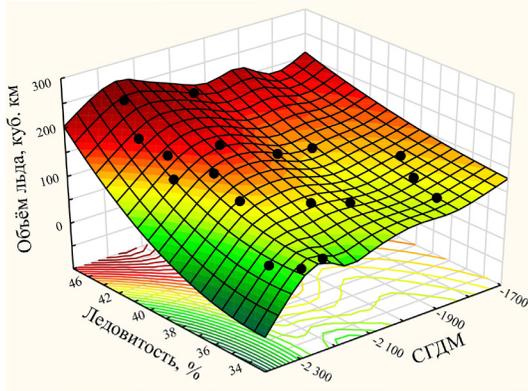


Рис. 6. 3D-модель зависимости объема льда от СГДМ и ледовитости
Fig. 6. The ice volume relationship on ice cover and accumulated temperature below 0 °C

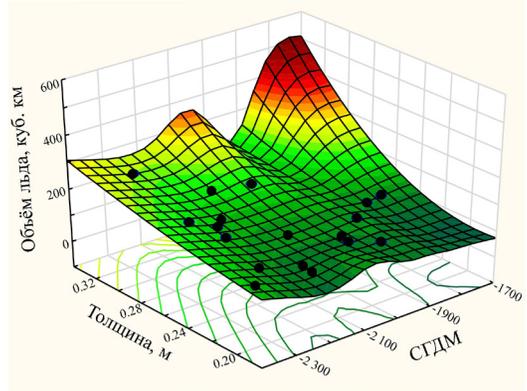


Рис. 7. 3D-модель зависимости объема льда от СГДМ и его толщины
Fig 7. The ice volume relationship on ice thickness and accumulated temperature below 0 °C

На основе детального анализа процесса льдообразования следует, что на акватории моря формируются три основные зоны ледяного покрова с характерными толщинами. Первая — зона активной генерации льда с его постоянным дрейфом в южном направлении, что обуславливает минимальный прирост толщины льда за счет температурного роста (толщина 5–15 см). Вторая — зона преобладания равномерно распределенной толщины льда (20–40 см) на значительно большей площади. Третья — наиболее динамичная по приросту толщины за счет процессов деформации ледяного покрова и максимально подверженная влиянию гидрометеорологических факторов (характерная толщина 60–100 см).

Многолетняя изменчивость средней за сезон толщины льда в Охотском море в целом и в регионах первого иерархического уровня показана на рис. 8. Хорошо видно, что общие колебания толщины льда в море в основном определяются колебаниями толщины ледяного покрова в регионе его основной генерации (на врезке рис. 8 обозначен цифрой I). Наиболее толстый ледяной покров наблюдается в регионах I и III. Как уже отмечалось ранее, регион I расположен максимально близко к Полюсу холода Северного полушария и является основным районом генерации льда в море. Значительная толщина льда в регионе III обусловлена его возрастом: здесь накапливаются льды, дрейфующие из региона I, т.е. возраст которых достигает 3 мес. и более.

Толщина льда во все типы зим неравномерно возрастает от начала льдообразования в ноябре до разрушения льда в мае (рис. 9). Происходит это потому, что на фазе разрушения ледяного покрова процессы льдообразования прекращаются, а начальные и молодые льды разрушаются намного быстрее однолетних льдов. В результате в процент-

* Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. ВМО-№ 1203. Женева, 2017. 21 с.

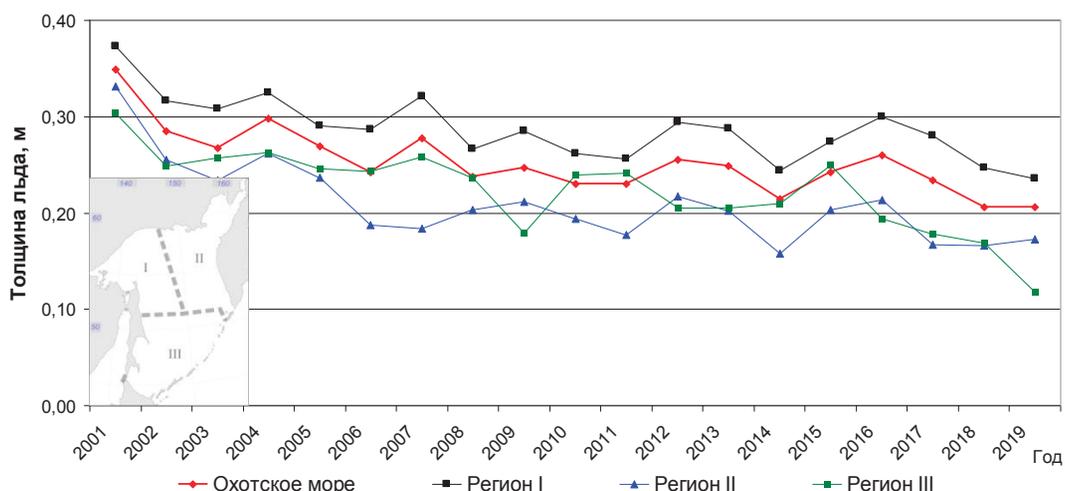


Рис. 8. Многолетняя изменчивость средней за сезон толщины льда в Охотском море и его регионах первого иерархического уровня за период с 2001 по 2019 г.

Fig. 8. Year-to-year changes of mean winter ice thickness in the Okhotsk Sea and its regions in 2001–2019

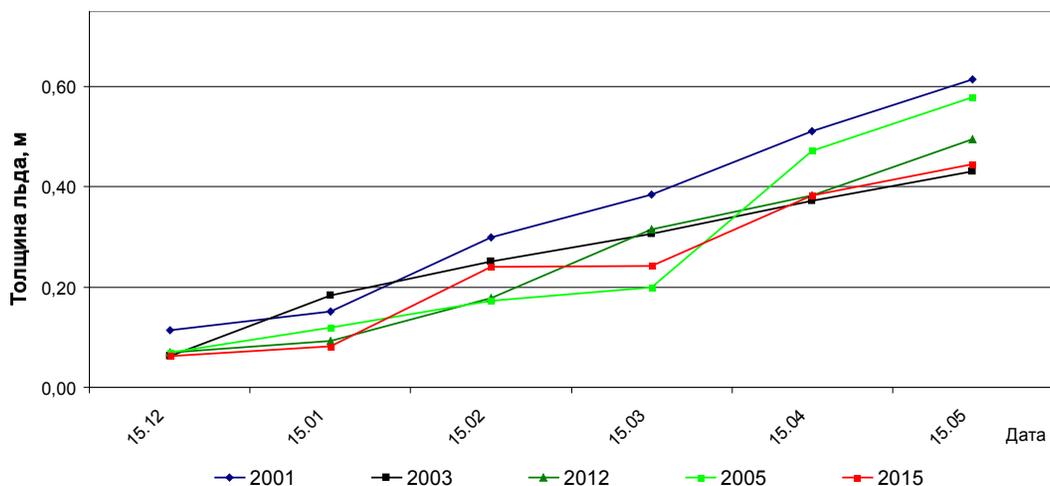


Рис. 9. Сезонная изменчивость толщины льда в Охотском море в различные типы зим

Fig. 9. Seasonal variability of ice thickness in the Okhotsk Sea, by types of winter

ном соотношении доля молодых льдов сокращается, а однолетних — увеличивается. Поэтому расчетная средневзвешенная толщина льда возрастает, что, соответственно, обуславливает увеличение объема льда при равном значении площади льда в начале и конце ледового сезона. В мае максимальная толщина льда наблюдалась в экстремально суровую зиму (2000/01 г.) и составляла 0,62 м, а минимальная толщина льда в суровую (2002/03 г.) и экстремально мягкую (2014/15 г.) зимы была соизмерима (соответственно 0,43 и 0,45 м), что не противоречит выводу об увеличении толщины льда в теплые зимы на фоне уменьшения ледовитости моря [Астафьев и др., 1997; Алексеев и др., 2001].

Значения средневзвешенной за сезон толщины льда в Охотском море в исследуемый период изменялись на 40 % (от 0,35 м в 2000/01 г. до 0,21 м в 2013/14, 2017/18 и в 2018/19 гг.) (табл. 3). Наибольшие колебания толщины льда (63,3 %) наблюдались в южной части моря (регион III), наименьшие (35,1 %) — в регионе I. Значительные колебания толщины льда (51,5 %) характерны и для региона II.

Максимальная изменчивость средних за сезон значений объема льда зафиксирована в регионе II — от 118,1 (2000/01 г.) до 17,2 км³ (2016/17 г.), наименьшая — в

Средние за сезон расчетные значения объема и толщины ледяного покрова в регионах первого иерархического уровня и в Охотском море в целом за период с 2001 по 2019 г.

Table 3

Mean winter volume and thickness of ice in the Okhotsk Sea and its regions averaged for 2001–2019

Год	Тип зимы*	Объем льда, км ³				Толщина ледяного покрова, м			
		Регион I	Регион II	Регион III	Охотское море	Регион I	Регион II	Регион III	Охотское море
2001	ЭС	143,0	118,1	89,1	350,2	0,37	0,33	0,30	0,35
2002	С	103,7	66,1	39,8	209,6	0,32	0,26	0,25	0,28
2003	С	84,2	62,0	57,5	203,6	0,31	0,23	0,26	0,27
2004	У	87,3	38,5	42,1	167,9	0,32	0,26	0,26	0,30
2005	М	70,1	30,5	26,2	126,8	0,29	0,24	0,25	0,27
2006	ЭМ	57,7	37,2	23,3	118,1	0,29	0,19	0,24	0,24
2007	М	81,6	29,7	30,2	141,4	0,32	0,18	0,26	0,28
2008	М	68,4	37,2	19,9	125,5	0,27	0,20	0,24	0,24
2009	ЭМ	57,2	31,6	16,0	104,5	0,28	0,21	0,18	0,25
2010	У	78,2	49,9	25,7	153,8	0,26	0,19	0,24	0,23
2011	М	68,6	29,5	21,9	120,0	0,26	0,18	0,24	0,23
2012	У	93,3	49,6	37,8	180,7	0,29	0,22	0,20	0,26
2013	М	72,6	31,8	31,9	136,3	0,29	0,20	0,21	0,25
2014	ЭМ	47,8	19,4	26,9	94,1	0,24	0,16	0,13	0,21
2015	ЭМ	53,2	36,3	13,6	103,0	0,27	0,20	0,25	0,24
2016	М	76,8	56,9	22,4	156,0	0,30	0,21	0,19	0,26
2017	М	58,8	17,2	20,5	96,5	0,28	0,17	0,18	0,23
2018	У	76,2	24,6	35,5	136,3	0,25	0,17	0,17	0,21
2019	У	64,4	31,7	28,6	124,7	0,24	0,18	0,11	0,21

* Тип зимы для Охотского моря в целом: ЭС — экстремально суровая, С — суровая, У — умеренная, М — мягкая, ЭМ — экстремально мягкая. Типы зим во всех регионах совпадают не более чем в 19 % случаев [Пищальник и др., 2017].

регионе I — от 143,0 (2000/01 г.) до 47,8 км³ (2013/14 г.). Всего за исследуемое время в Охотском море произошло уменьшение объема льда на 34,5 %, при этом ледовитость уменьшилась на ~40 %, а толщина — на ~60 %. Следует отметить, что если абсолютный максимум значений характеристик ледового режима зафиксирован во всех регионах в 2001 г., то минимальные величины наблюдаются в отдельных регионах в разные годы. Данный факт подтверждает вывод, сделанный ранее на основе анализа изменчивости типов зим, о том, что условия формирования ледяного покрова в регионах первого иерархического уровня могут существенно различаться в течение одного ледового сезона [Пищальник и др., 2016, 2017].

Из результатов анализа линейных трендов толщины льда следует, что максимальная скорость уменьшения толщины ледяного покрова (6,1 см/10 лет) наблюдается на юге моря (регион III). Она почти в два раза превышает среднюю скорость уменьшения толщины льда в Охотском море, которая равна 3,4 см/10 лет. Минимальная скорость изменения толщины ледяного покрова — 3,1 см/10 лет — наблюдается в регионе I (рис. 10, табл. 4).

С учетом экстремальных характеристик сезона 2000/01 г. изменчивость средних за сезон значений объема льда в Охотском море в целом составила 73,2 %. В регионах I, II и III размах искомым значений достигал соответственно 66,6, 85,4 и 84,7 %. Расчет статистических характеристик в табл. 4 произведен без учета экстремумов сезона 2000/01 г. Анализ приведенных в таблице данных позволяет сделать вывод, что в начале XXI века наибольшее уменьшение объемов льда (на ~43 %) произошло в регионах II и III. На северо-западе Охотского моря (регионе I) этот процесс происходил почти в

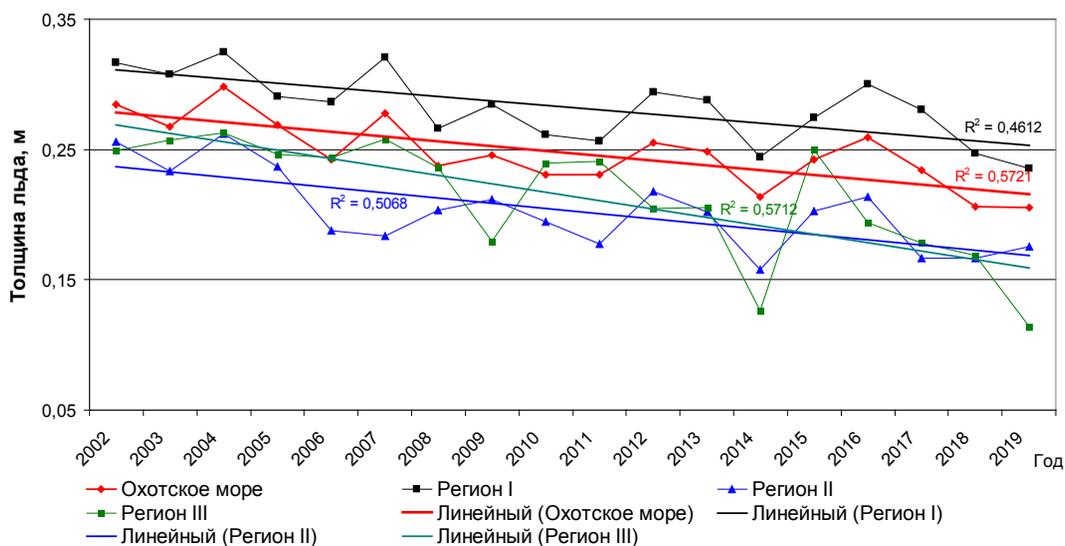


Рис. 10. Многолетняя изменчивость средней за сезон толщины льда в Охотском море и его регионах первого иерархического уровня за период с 2002 по 2019 г.

Fig. 10. Year-to-year changes of mean winter ice thickness in the Okhotsk Sea and its regions in 2002–2019

Таблица 4

Скорость изменения ледовитости, толщины и объема льда за 10 лет и изменчивость характеристик за период наблюдений с 2002 по 2019 г. в Охотском море в целом и в регионах первого иерархического уровня

Table 4

Rate of ice cover, ice thickness, and ice volume decadal changes in the Okhotsk Sea and its regions and their variability in 2002–2019

Регион	Ледовитость, %		Толщина льда, см		Объем льда, км ³	
	За 10 лет	За период	За 10 лет	За период, %	За 10 лет	За период, %
Охотское море	3,2	14,8	3,4	21,9	32,2	34,5
Регион I	1,5	15,3	3,1	17,7	12,2	26,5
Регион II	1,7	23,1	3,7	28,7	11,7	42,9
Регион III	0,2	4,8	6,1	40,5	8,9	43,2

равной степени за счет уменьшения как толщины льда (17,7 %), так и ледовитости (15,3 %). Уменьшение объема льда в южной части Охотского моря (регион III) произошло в основном вследствие сокращения толщины льда: скорость уменьшения толщины льда здесь почти в два раза выше (6,1 см/10 лет), чем в других регионах, при минимальном (4,8 %) сокращении ледовитости. Минимальные изменения толщины и объема льда отмечались в регионе I.

Существенное влияние на толщину ледяного покрова в регионе III оказывает лед, скапливающийся в «ледовой ловушке» на акватории Сахалинского залива и в районе Шантарских островов. Холодные воздушные массы, перемещаясь от Полюса холода Северного полушария в юго-восточном направлении (зимний муссон), одновременно обуславливают развитие интенсивных процессов льдообразования и дрейфа ледяного покрова. Береговая черта Сахалинского залива является естественной преградой, в которую упираются дрейфующие молодые льды. Здесь они многократно наслаиваются и быстро смерзаются, формируя к середине сезона ледяной покров залива, состоящий преимущественно из тонкого однолетнего льда второй стадии (50–70 см) и однолетнего льда средней толщины (70–120 см)*. При этом средняя высота торосов

* Номенклатура... [1978].

составляет 1,5 м (максимальная до 5,0 м), а толщина отдельных ледяных образований может достигать 28,0 м и более [Тамбовский, Пищальник, 1993; Астафьев и др., 1997; Алексеев и др., 2001].

При переполнении льдом «ледовой ловушки» начинается его вынос за пределы акватории залива. В декабре-январе этот лед дрейфует в южном направлении в форме языка льда на некотором удалении от побережья восточного Сахалина. Впоследствии (февраль-март) язык льда трансформируется в пояс тяжелого льда шириной 10–30 миль, который простирается от мыса Елизаветы до мыса Терпения [Минервин и др., 2015]. Во время дрейфа толщина ледяного покрова постоянно увеличивается. Естественной преградой для дрейфующего в южном направлении льда являются острова на западной, южной и восточной границах моря (акватория региона III), где он и накапливается с января по март (до начала его разрушения под воздействием солнечной радиации). Различия величин площади дрейфующего льда и его толщины (а следовательно, объема) определяются в каждом конкретном ледовом сезоне интенсивностью циркуляции атмосферы и преобладающей направленностью движения потоков воздушных масс, а также СГДМ.

Характер колебаний объема льда в отдельных регионах первого иерархического уровня наглядно показывает вклад каждого из них в изменчивость объема льда в море в целом (рис. 11). Как и в случае с ледовитостью, общие колебания объема льда в море определяются преимущественно колебаниями его объема в регионе I. Ледяной покров региона II и формируется, и разрушается в пределах только одной акватории, поэтому анализ его состояния всегда надо проводить отдельно от других регионов. В южной части Охотского моря (регион III) скорость генерации льда в разы ниже по сравнению с регионами I и II. Фактически весь лед в этом регионе является приносным. В результате генерального дрейфа он поступает сюда из региона I, где и накапливается [Fukumachi et al., 2009; Simizu et al., 2014; Ohshima et al., 2016; Пищальник и др., 2017]. Резкие колебания величины объема льда наблюдаются в Охотском море, когда изменения объема льда происходят синфазно в любых двух или во всех трех регионах, как это отмечалось, например, соответственно в 2003, 2010, 2011, 2016 и 2001, 2002, 2009, 2012 гг.

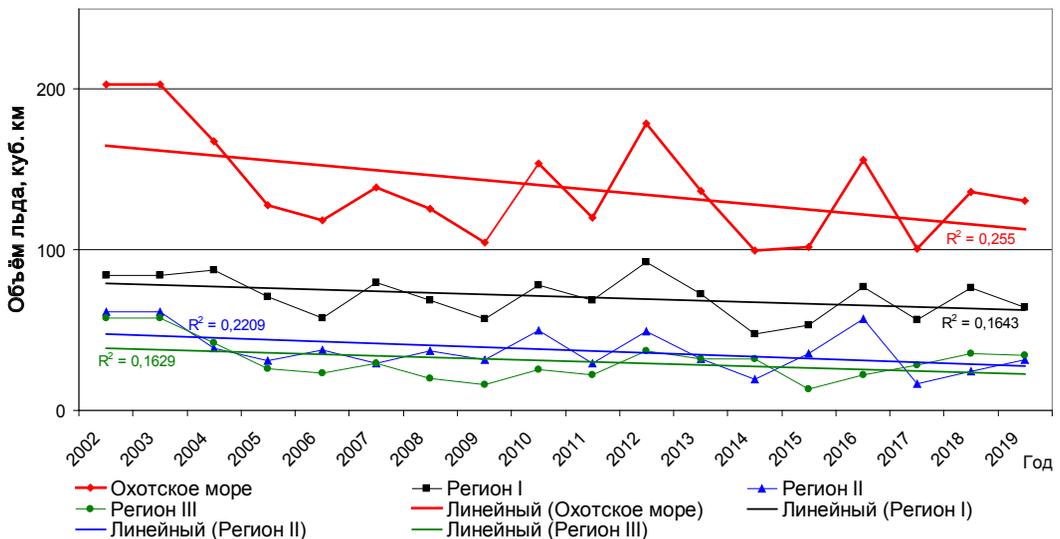


Рис. 11. Вариации средней за сезон величины объема льда в Охотском море в целом и в регионах первого иерархического уровня за период с 2001 по 2019 г.

Fig. 11. Variations of mean winter ice volume in the Okhotsk Sea and its regions in 2001–2019

Особый интерес представляет сравнительный анализ расчетных величин объема и толщины льда, выполненных по предложенной методике дешифрирования спутниковых снимков видимого диапазона, с результатами расчетов этих характеристик,

полученных тоже по спутниковым наблюдениям, но с применением других методов обработки данных [Nihashi et al., 2009, 2018], а также прямых измерений толщины льда [Fukumachi et al., 2006, 2009].

Японские исследователи рассчитывали толщину по высоте надводного борта (freeboard) льда методом гидростатического баланса по данным спутника ICESat с учетом высоты снежного покрова. Расчеты выполнялись на фазе максимального развития ледяного покрова (средняя величина за февраль и март) для периода с 2004 по 2008 г. Подспутниковые наблюдения за толщиной льда с ледокола выполнялись только в 2004, 2005 и 2008 гг. примерно один раз в декаду в квадрате, ограниченном координатами 44°30' и 45°30' с.ш. и 143°30' и 144°30' в.д. С учетом высоты снежного покрова общая толщина льда варьировала от 77,5 (2008 г.) до 110,4 см (2005 г.). Искомая толщина льда колебалась от 50–60 см в 2007 и 2008 гг. до 70–80 см в 2005 г. Вычисленные соотношения высоты надводного борта и толщины льда в исследуемом квадрате были использованы для расчетов на всей акватории Охотского моря [Nihashi et al., 2018]. По выполненным ранее расчетам [Пищальник и др., 2017] ледовые условия в южной части Охотского моря, где производились контрольные измерения толщины льда, в феврале-марте 2004 г. соответствовали суровому типу зимы, в 2005 и 2007 гг. — мягкому, в 2006 г. — экстремально мягкому, а в 2008 г. — умеренному. Таким образом, результаты этих независимых исследований не противоречат друг другу.

Однако прямое сопоставление результатов российских и японских исследований недостаточно корректно по двум причинам. Во-первых, несмотря на то что мы используем одни и те же данные со спутника AMSR-2, искомые результаты расчетов площади ледяного покрова различаются более чем на 10 %. При этом расчетные значения многолетних тенденций достаточно близки по абсолютным величинам [Cavaliere, Parkinson, 2012]. Вероятно, это связано с тем, что границы Охотского моря по русской и японской версиям не совпадают. Во-вторых, нами представлены в работе расчеты толщины ровного льда без учета его деформации. Это обстоятельство предопределило различия абсолютных величин значений толщины и объема льда. По толщине данные различаются более чем в два раза, а по объему — более чем в три раза. Задача расчета искомой толщины льда может быть решена путем разработки методики расчета коэффициентов его деформации в отдельных регионах с учетом пространственно-временного масштаба. По нашему мнению, полученные японскими исследователями результаты расчетов объема льда представляются завышенными по следующим причинам: совместного учета толщины льда и снежного покрова, а также использования для критического контроля расчетной толщины льда результатов инструментальных наблюдений, выполненных только в южной части Охотского моря (район 45° с.ш.) [Nihashi et al., 2018]. Возможно, это связано и с некорректным применением соотношения 1/9 высоты надводной и подводной частей льда для всей акватории Охотского моря. В цитируемой работе исследователи сами признают, что ледовитость не всегда адекватно отображает его объем.

Представленные в нашей работе расчетные данные о толщине ледяного покрова хорошо согласуются с результатами видео и визуальных наблюдений с борта судна за толщиной недеформированного льда и колеблются в пределах от 0,19 до 0,55 м (в среднем 0,33 м) [Toyota et al., 2004]. Несомненным достоинством приведенных в настоящей работе исследований являются результаты анализа многолетних вариаций ледовых характеристик и оценка вклада изменчивости ледовитости и толщины льда в отдельных регионах первого иерархического уровня в формирование величины объема льда для Охотского моря в целом. Эти данные могут быть весьма полезны как для интерпретации результатов спутниковых наблюдений за толщиной ледяного покрова, так и для планирования выбора места для проведения точечных экспериментов прямого измерения толщины льда.

Выводы

Объем льда в Охотском море в целом в начале XXI века сократился на 34,5 %. Изменение объема происходило в большей мере за счет уменьшения толщины льда (~60 %) и в меньшей степени за счет уменьшения ледовитости (~40 %).

Наиболее стабильным регионом Охотского моря является его северо-западная часть (регион I). В этом регионе отмечаются наименьшие расчетные величины уменьшения ледовитости (15,3 %), толщины льда (17,7 %) и его объема (26,5 %).

Наибольшая изменчивость ледовых параметров характерна для северо-восточной части Охотского моря (регион II). За исследуемый период ледовитость в нем уменьшилась на 23,1 %, толщина льда — на 28,7, а объем льда — на 42,9 %.

Максимальная скорость уменьшения толщины льда (6,0 см/10 лет) наблюдалась в южной части Охотского моря (регион III), в результате чего за исследуемый период она уменьшилась на 40,5 %, при минимальном (на 4,8 %) изменении ледовитости региона.

Для повышения репрезентативности вычисления искомым величин толщины и объема льда по предложенной методике необходимо разработать правило расчета поправочных коэффициентов, которые позволяли бы учитывать степень деформации ледяного покрова в его отдельных регионах в соответствующих пространственно-временных масштабах.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук В.В. Иванову (МГУ им. М.В. Ломоносова), руководителю группы ледовых технологий В.А. Романюку (ООО «РН-СахалинНИПИморнефть») за конструктивные замечания, высказанные ими в процессе подготовки работы, и помощь в подготовке рукописи к публикации, а также аспиранту Сахалинского государственного университета И.В. Шумилову за модернизацию ПК «ЛЕД» для выполнения расчетов объема льда.

Финансирование работы

Результаты настоящего исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (номер для публикаций: 5.9510.2017/8.9).

Соблюдение этических стандартов

Авторы заявляют, что статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов. Библиографические ссылки на все использованные в обзоре данные других авторов оформлены в соответствии с ГОСТом. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Информация о вкладе авторов

Постановка проблемы, написание первой версии статьи, дешифрирование спутниковых снимков — В.М. Пищальник; математический анализ — И.Г. Минервин; обсуждение результатов, внесение поправок и редактирование — весь коллектив авторов.

Список литературы

- Алексеев Ю.Н., Астафьев В.Н., Литонов О.Е. и др. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа : моногр. — СПб. : Гидрометеоздат, 2001. — 360 с.
- Астафьев В.Н., Сурков Г.А., Трусков П.А. Торосы и стамухи Охотского моря : моногр. — СПб. : Прогресс-Погода, 1997. — 197 с.
- Гладышев С.В. Термохалинная структура придонного слоя на северном шельфе Охотского моря // Метеорол. и гидрол. — 1998. — № 3. — С. 183–187.
- Гладышев С.В., Хен Г.В. Распространение плотных шельфовых вод в глубоководной части Охотского моря // Докл. РАН. — 2004. — Т. 398, № 1. — С. 113–117.

Зонн И.С., Костяной А.Г. Охотское море. Энциклопедия. — М. : Международные отношения, 2009. — 256 с.

Исследование особенностей ледового режима Охотского и Японского морей с применением ГИС-технологий : отчет о НИР (заключительный, за 2017–2019 годы) / рук. раб. д-р техн. наук В.М. Пищальник / СахГУ. № ГР АААА-А17-117042810046-6. — Южно-Сахалинск, 2020. — 98 с.

Минервин И.Г., Романюк В.А., Пищальник В.М. и др. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей // Вестн. РАН. — 2015. — Т. 85, № 3. — С. 209–217. DOI: 10.7868/S0869587315010119.

Митник Л.М., Трусенкова О.О., Лобанов В.Б. Дистанционное радиофизическое зондирование океана из атмосферы и космоса: достижения и перспективы (обзор) // Вестн. ДВО РАН. — 2015. — № 6(184). — С. 5–20.

Моделирование динамики природных процессов в Охотском и Японском морях в целях обеспечения безопасности обустройства и эксплуатации месторождений углеводородов на шельфе о. Сахалин : отчет о НИР (заключительный) / рук. раб. д-р техн. наук В.М. Пищальник / СахГУ. № ГР 114042140017. — Южно-Сахалинск, 2016. — 66 с.

Пищальник В.М., Минервин И.Г., Романюк В.А. Анализ изменений ледового режима в отдельных районах Охотского моря в период потепления // Вестн. РАН. — 2017. — Т. 87, № 5. — С. 429–440. DOI: 10.7868/S0869587317050024.

Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 185. — С. 228–239. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-185-228-239.

Плотников В.В., Якунин Л.П., Петров В.А. Ледовые условия и методы их прогнозирования // Гидрология и гидрохимия морей. Т. 9 : Охотское море, вып. 1 : Гидротермические условия. — СПб. : Гидрометеиздат, 1998. — С. 291–340.

Романюк В.А. Ледовый режим Охотского моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Южно-Сахалинск, 2019. — 23 с.

Романюк В.А., Еременко И.В., Пищальник В.М. Анализ межгодовой и сезонной изменчивости ледовитости в заливе Анива и проливе Лаперуза по данным дистанционного зондирования Земли // ИнтерКарто. ИнтерГИС : мат-лы Междунар. конф. — 2017. — Т. 23, № 3. — С. 81–92. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-81-92.

Романюк В.А., Пищальник В.М., Бобков А.О., Минервин И.Г. Основные принципы работы программного комплекса «ЛЕД» // Физика геосфер : мат-лы докл. 9-го Всерос. симпоз. — Владивосток : Дальнаука, 2015. — С. 556–561.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660472. Программный комплекс для расчета площади ледяного покрова в Охотском и Японском морях по данным ДЗЗ (ПК «ЛЕД») / Пищальник В.М., Бобков А.О., Романюк В.А. Дата гос. регистрации в Росреестре программ для ЭВМ 01 октября 2015 г.

Тамбовский В.С., Пищальник В.М. Атлас льдов Японского и Охотского морей. Иллюстрированное справочное пособие. — Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 1993. — 195 с.

Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // Cryosphere. — 2012. — № 6(4). — P. 881–889. DOI: 10.5194/ tc-6-881-2012.

Fukumachi Y., Mizuta G., Ohshima K.I. et al. Sea-ice thickness in the southwestern Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar // J. Geophys. Res. — 2006. — Vol. 111. — C09018. DOI: 10.1029/2005JC003327.

Fukumachi Y., Shirasawa K., Polomoshnov A.M. et al. Direct observations of sea-ice thickness and brine rejection off Sakhalin in the Sea of Okhotsk // Cont. Shelf Res. — 2009. — Vol. 29. — P. 1541–1548.

Gladyshev S.V., Martin S., Riser S., Figurkin A. Dense water production on the northern Okhotsk shelves: Comparison of ship-based spring-summer observations for 1996 and 1997 with satellite observations // J. Geophys. Res. — 2000. — Vol. 105. — P. 26,281–26,299.

Kanna N., Toyota T. and Nishioka J. Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea // Prog. Ocean. — 2014. — Vol. 126. — P. 44–57. DOI: 10.1016/j.pcean.2014.04.012.

Kumano T., Enomoto H., Kimura N. et al. Sea-ice motion in the Okhotsk Sea derived by microwave sensors // Proc. 13th International Offshore and Polar Engineering Conference. — Honolulu, Hawaii, 2003. — P. 518–522.

Nihashi S., Kurtz N.T., Markus T. et al. Estimation of sea-ice thickness and volume in the Sea of Okhotsk based on ICESat data // *Annals of Glaciology*. — 2018. — Vol. 59(76pt2). — P. 101–111. DOI: 10.1017/aog.2018.8.

Nihashi S., Ohshima K.I., Kimura N. Creation of a heat and salt flux dataset associated with sea-ice production and melting the Sea of Okhotsk // *J. Clim.* — 2012. — Vol. 25. — P. 2261–2278. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00022.1.

Nihashi S., Ohshima K.I., Tamura T. et al. Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E // *J. Geophys. Res.* — 2009. — Vol. 114. — C10025. DOI: 10.1029/2008JC005222.

Ohshima K.I., Nakanowatari T., Riser S. et al. Freshening and dense shelf water reduction in the Okhotsk Sea linked with sea ice decline // *Prog. Oceanogr.* — 2014. — Vol. 126. — P. 71–79. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.04.020.

Ohshima K.I., Nihashi S., Iwamoto K. Global view of sea-ice production in polynyas and its linkage to dense/bottom water formation // *Geosci. Lett.* — 2016. — № 3(13). DOI: 10.1186/s40562-016-0045-4.

Pishchal'nik V.M., Truskov P.A., Solomatin S.V. et al. Analysis of the condition in the formation of open water spaces behind offshore platforms for the elimination of oil spills // *Океанол. исслед.* — 2019. — Т. 47, № 4. — С. 88–105. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(4).6.

Simizu D., Ohshima K.I., Ono J. et al. What drives southward drift of sea ice in the sea of Okhotsk? // *Prog. Oceanogr.* — 2014. — Vol. 126. — P. 33–43. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.013.

Talley L.D. An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific // *Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res.* — 1991. — Vol. 38, Supp. 1. — P. S171–S190. DOI: 10.1016/S0198-0149(12)80009-4.

Toyota T., Kawamura T., Ohshima K.I. et al. Thickness distribution, texture and stratigraphy, and a simple probabilistic model for dynamical thickening of sea ice in the southern Sea of Okhotsk // *J. Geophys. Res.* — 2004. — Vol. 109. — C06001. DOI: 10.1029/2003JC002090.

References

Alekseev, Yu.N., Astafyev, V.N., Litonov, O.E., Mansurov, M.N., Panov, V.V., and Truskov, P.A., *Ledotekhnicheskiye aspekty osvoyeniya morskikh mestorozhdeniy nefi i gaza* (Ice Engineering Aspects of Offshore Oil and Gas Development), St. Peteresburg: Gidrometeoizdat, 2001.

Astafiev, V.N., Surkov, G.A., and Truskov, P.A., *Torosy i stamukhi Okhotskogo morya* (Hummocks and hamlets of the Sea of Okhotsk), St. Peteresburg: Progress-Pogoda, 1997.

Gladyshev, S.V., Thermohaline structure of bottom water on the northern Okhotsk Sea shelf, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 1998, no. 3, pp. 39–46.

Gladyshev, S.V. and Khen, G.V., Spreading of dense shelf water in the deep sea of Okhotsk, *Doklady Earth Sciences*, 2004, vol. 398, no. 7, pp. 953–956.

Zonn, I.S. and Kostyanov, A.G., *Okhotskoye more. Entsiklopediya* (Sea of Okhotsk. Encyclopedia), Moscow: Mezhdunarodnyye otnosheniya, 2009.

Issledovaniye osobennostey ledovogo rezhima Okhotskogo i Yaponskogo morey s primeneni- yem GIS-tehnologiy: otchet o NIR (Study of the features of the ice regime of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan using GIS technologies: Report on Research Work (final, for 2017–2019)), performance Manager Dr. Tech. sciences Pischelnik, V.M., Available from Sakhsu, 2020, Yuzhno-Sakhalinsk, no. AAAA-A17-117042810046-6.

Minervin, I.G., Romanyuk, V.A., Pishchalnik, V.M., Truskov, P.A., and Pokrashenko, S.A., Zoning of the ice cover of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan, *Vestn. RAN*, 2015, vol. 85, no. 3, pp. 209–217. doi 10.7868/S0869587315010119

Mitnik, L.M., Trusenkova, O.O., and Lobanov, V.B., Microwave remote sensing of ocean and atmosphere from space: achievements and prospects (review), *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2015, no. 6(184), pp. 5–20.

Modelirovaniye dinamiki prirodnykh protsessov v Okhotskom i Yaponskom moryakh v tselyakh obespecheniya bezopasnosti obustroystva i ekspluatatsii mestorozhdeniy uglevodorodov na shel'fe o. Sakhalin: otchet o NIR (Modeling the dynamics of natural processes in the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan in order to ensure the safety of the arrangement and exploitation of hydrocarbon deposits on the shelf of Sakhalin: Report on Research Work (final)), performance Manager Dr. Tech. sciences Pischelnik, V.M., Available from Sakhsu, 2016, Yuzhno-Sakhalinsk, no. 114042140017.

Pischalnik, V.M., Minervin, I.G., and Romanyuk, V.A., Analysis of changes in the ice regime in certain areas of the Sea of Okhotsk during the warming period, *Vestn. RAN*, 2017, vol. 87, no. 5, pp. 429–440. doi 10.7868/S0869587317050024

Pischalnik, V.M., Romanyuk, V.A., Minervin, I.G., and Batuhina, A.S., Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 185, pp. 228–239, doi 10.26428/1606-9919-2016-185-228-239

Plotnikov, V.V., Yakunin, L.P., and Petrov, V.A., Ice conditions and methods for their prediction, in *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei. T. 9: Okhotskoye more* (Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas, vol 9: Sea of Okhotsk, no. 1: Hydrometeorological conditions), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998, pp. 291–340.

Romanyuk, V.A., The ice regime of the Sea of Okhotsk under the global trend of increasing air temperature, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*, Yuzhno-Sakhalinsk, 2019.

Romanyuk, V., Eremenko, I., and Pishchal'nik, V., Analysis of interannual and seasonal variability of ice cover in Aniva Bay and La Perouse Strait according to Earth remote sensing data, *InterCarto. InterGIS*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 81–92. doi 10.24057/2414-9179-2017-3-23-81-92

Romanyuk, V.A., Pischalnik, V.M., Bobkov, A.O., and Minervin, I.G., The basic principles of the software package «ICE», in *Fizika geosfer* (Physics of the geospheres: materials dokl. 9th All-Russian Symposium), Vladivostok: Dal'nauka, 2015, pp. 556–561.

Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM No 2015660472. Programmnyy kompleks dlya rascheta ploshchadi ledyanogo pokrova v Okhotskom i Yaponskom moryakh po dannym DZZ (PK «LYOD») (Certificate of state registration of computer programs No. 2015660472. Software complex for calculating the ice cover in the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan according to remote sensing data (LYOD PC), Pischal'nik, V.M., Bobkov, A.O., and Romanyuk, V.A. State date registration in the Register of computer programs October 1, 2015.

Tambovsky, V.S. and Pishchelnik, V.M., *Atlas l'dov Yaponskogo i Okhotskogo morey. Illyustrirovannoye spravochnoye posobiye* (Atlas of ice of the Sea of Japan and Okhotsk. Illustrated reference guide), Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 1993.

Cavalieri, D.J. and Parkinson, C.L., Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010, *Cryosphere*, 2012, № 6(4), pp. 881–889. doi 10.5194/tc-6-881-2012

Fukumachi, Y., Mizuta, G., Ohshima, K.I., Toyota, T., Kimura, N., and Wakatsuchi, M., Sea-ice thickness in the southwestern Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar, *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, C09018. doi 10.1029/2005JC003327

Fukumachi, Y., Shirasawa, K., Polomoshnov, A., Ohshima, K., Kalinin, E., Nihashi, S., Melling, H., Mizuta, G., and Wakatsuchi, M., Direct observations of sea ice thickness and brine rejection off Sakhalin in the Sea of Okhotsk, *Cont. Shelf Res.*, 2009, vol. 29, pp. 1541–1548. doi 10.1016/j.csr.2009.04.005

Gladyshev, S.V., Martin, S., Riser, S., and Figurkin, A., Dense water production on the northern Okhotsk shelves: Comparison of ship-based spring-summer observations for 1996 and 1997 with satellite observations, *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, pp. 26,281–26,299.

Kanna, N., Toyota, T., and Nishioka, J., Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea, *Prog. Ocean.*, 2014, vol. 126, pp. 44–57. doi 10.1016/j.pcean.2014.04.012

Kumano, T., Enomoto, H., Kimura, N., Tateyama, K., Shirasawa, K., and Uratsuka, S., Sea-ice motion in the Okhotsk Sea derived by microwave sensors, in *Proc. 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, 2003, pp. 518–522.

Nihashi, S., Kurtz, N.T., Markus, T., Ohshima, K.I., Toyota, T., and Tateyama, K., Estimation of sea-ice thickness and volume in the Sea of Okhotsk based on ICESat data, *Annals of Glaciology*, 2018, vol. 59(76pt2), pp. 101–111. doi 10.1017/aog.2018.8

Nihashi, S., Ohshima, K.I., and Kimura, N., Creation of a heat and salt flux dataset associated with sea-ice production and melting the Sea of Okhotsk. *J. Clim.*, 2012, vol. 25, pp. 2261–2278. doi 10.1175/JCLI-D-11-00022.1

Nihashi, S., Ohshima, K.I., Tamura, T., Fukamachi, Y., and Saitoh, S., Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E, *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, C10025. doi 10.1029/2008JC005222

Ohshima, K.I., Nakanowatari, T., Riser, S., Volkov, Y., and Wakatsuchi, M., Freshening and dense shelf water reduction in the Okhotsk Sea linked with sea ice decline, *Prog. Oceanogr.*, 2014, vol. 126, pp. 71–79. doi 10.1016/j.pcean.2014.04.020

Ohshima, K.I., Nihashi, S., and Iwamoto, K., Global view of sea-ice production in polynyas and its linkage to dense/bottom water formation, *Geosci. Lett.*, 2016, no. 3(13). doi 10.1186/s40562-016-0045-4

Pishchal'nik, V.M., Truskov, P.A., Solomatina, S.V., Romanyuk, V.A., and Leonov, A.V., Analysis of the condition in the formation of open water spaces behind offshore platforms for the elimination of oil spills, *Okeanologicheskiye issledovaniya* (Oceanological research), 2019, vol. 47, no. 4, pp. 88–105. doi 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(4).6

Simizu, D., Ohshima, K.I., Ono, J., Fukamachi, Y., and Mizuta, G., What drives southward drift of sea ice in the sea of Okhotsk?, *Prog. Oceanogr.*, 2014, vol. 126, pp. 33–43. doi 10.1016/j.pcean.2014.05.013

Talley, L.D., An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific, *Deep Sea Res. Part A. Oceanographic Research*, 1991, vol. 38, Supp. 1, pp. S171–S190. doi 10.1016/S0198-0149(12)80009-4

Toyota, T., Kawamura, T., Ohshima, K.I., Shimoda, H., and Wakatsuchi, M., Thickness distribution, texture and stratigraphy, and a simple probabilistic model for dynamical thickening of sea ice in the southern Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, C06001. doi 10.1029/2003JC002090

Nomenklatura VMO po morskomu l'du (WMO nomenclature for sea ice), Geneva, WMO-no. 259, 1970, Tr. 145.

Rukovodstvo po proizvodstvu ledovoy aviatsionnoy razvedki (Guide to the production of ice aviation reconnaissance), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981.

Rukovodyashchiye ukazaniya VMO po raschetu klimaticheskikh norm (WMO Guidelines for the calculation of climate standards), WMO-no. 1203, Geneva, 2017.

Поступила в редакцию 19.02.2020 г.

После доработки 7.04.2020 г.

Принята к публикации 20.05.2020 г.