

УДК 551.467.312(265.53)

**В.М. Пищальник, В.А. Романюк, И.Г. Минервин, А.С. Батухтина\***  
Сахалинский государственный университет,  
693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290

## **АНАЛИЗ ДИНАМИКИ АНОМАЛИЙ ЛЕДОВИТОСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ В ПЕРИОД С 1882 ПО 2015 Г.**

На основе судовых, авиационных и спутниковых данных наблюдений за ледяным покровом и температурой воздуха на прибрежных гидрометеорологических станциях построен ряд межгодовой изменчивости значений ледовитости Охотского моря с 1882 по 2015 г. Выполнен анализ динамики аномалий ледовитости, вычисленных относительно климатической нормы за период 1961–1990 гг. Выявлены многолетние изменения площади ледяного покрова. Показано, что в конце 1970-х — начале 1980-х гг. произошла смена тенденции изменения ледовитости и температуры воздуха Северного полушария, которые находятся в противофазе.

**Ключевые слова:** аномалии ледовитости, Охотское море, многолетние изменения ледовитости, тенденции, типизация зим по суровости ледовых условий.

**Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batuhina A.S.** Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015 // *Izv. TINRO*. — 2016. — Vol. 185. — P. 228–239.

The time-series for the ice cover dynamics in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015 are reconstructed on the base of shipboard, airborne, and satellite observations and measurements of the air temperature at the coastal meteorological stations. Abnormality of the ice conditions is estimated relative to the “climate norm” determined as the mean seasonal variation for the 1961–1990. Long-term variability of the ice cover is analyzed. Its regime shift with change of trend is revealed in the late 1970s — early 1980s that corresponds to the regime shift of the air temperature variability in the northern hemisphere.

**Key words:** ice cover, Okhotsk Sea, ice cover variability, trend, winters typization by ice conditions.

### **Введение**

Сведения об изменчивости ледового режима Охотского моря основаны на анализе эмпирических данных, полученных с помощью судовых и авиационных наблюдений, и опубликованы в отечественных монографиях в середине и конце прошлого века (Крындин, 1964; Петров и др., 1998). При этом были рассмотрены данные за различные периоды: 1929–1960 и 1960–1991 гг. В настоящее время основным источником ледовой информации являются спутниковые наблюдения, регулярно выполняющиеся с 1971 г.

---

\* Пищальник Владимир Михайлович, доктор технических наук, заведующий лабораторией, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru; Романюк Валерий Анатольевич, научный сотрудник, e-mail: kunashir18@rambler.ru; Минервин Игорь Георгиевич, кандидат физико-математических наук, ректор, e-mail: igor@minervin.ru; Батухтина Алевтина Сергеевна, младший научный сотрудник, e-mail: alka5015@mail.ru.

Pishchalnik Vladimir M., D.Sc., head of laboratory, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru; Romanyuk Valery A., researcher, e-mail: kunashir18@rambler.ru; Minervin Igor G., Ph.D., rector of university, e-mail: igor@minervin.ru; Batuhina Alevtina S., junior researcher, e-mail: alka5015@mail.ru.

Изменчивость ледового режима по данным авиационных и спутниковых наблюдений активно изучается отечественными и зарубежными специалистами (Плотников, 2002; Enomoto et al., 2003; Хен и др., 2006; Пищальник и др., 2011, 2015а; Якунин, 2012; Лобанов и др., 2014; Минервин, Пищальник, 2015; Pishchalnik et al., 2015; Romanyuk, Kozeka, 2015). При этом большинство авторов не выходит за пределы временных периодов, соответствующих определенному способу производства наблюдений. Попытки использования всей имеющейся информации для оценки изменчивости ледовитости в Охотском море до настоящего времени предпринимались весьма ограниченно (Лобанов и др., 2014).

Активизация работ по добыче углеводородов на шельфе Охотского моря в последние десятилетия все острее ставит вопрос о безопасном выполнении морских операций, в том числе транспорта углеводородов в сложных ледовых условиях. Поэтому в настоящее время исследования особенностей развития ледовых процессов как в море в целом, так и в отдельных его частях имеют большую практическую значимость.

Целью работы явилось формирование ряда ледовитости Охотского моря максимально возможной продолжительности для выявления долговременных колебаний и оценки современного состояния развития ледовых процессов.

### Материалы и методы

Охотское море относится к категории замерзающих морей, в которых формируется сезонный ледяной покров. Продолжительность ледового сезона в различных районах моря может варьировать от трех до девяти месяцев. Расчет средней величины ледовитости за сезон производился в период с декабря по март. Искомая величина, по сути, характеризует годовую изменчивость площади ледяного покрова, поэтому понятия сезонной и межгодовой изменчивости в данной работе используются как синонимы.

Весь исторический массив наблюдений за ледовитостью Охотского моря по способам получения информации условно можно разделить на три этапа — судовой, авиационный и спутниковый (Пищальник и др., 2011). В рамках каждого этапа наблюдения производились разными методами и с различной временной дискретностью. Судовые и авиационные наблюдения имеют пропуски, поэтому на подготовительном этапе выполнялись процедуры восстановления пропущенных значений и критического контроля данных с привлечением всей доступной информации с последующим приведением данных к единой дискретности (Романюк и др., 2015; Romanyuk, Kozeka, 2015).

Для восстановления пропусков проверялась гипотеза о тесноте связи процессов ледообразования с количеством накопленного за сезон холода (суммой градусо-дней мороза (СГДМ)) по данным гидрометеорологических станций (ГМС), расположенных на побережье. Количество холода, поступающее с материка на акваторию Охотского моря под влиянием зимнего муссона, является одним из основных показателей скорости генерации ледяного покрова. СГДМ рассчитывается как сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха между датами устойчивого перехода температуры через 0 °С осенью и весной\*. Аналогичным образом производится расчет сумм градусо-дней тепла (СГДТ) для теплого периода года.

Регулярные инструментальные наблюдения за температурой воздуха на побережье дальневосточных морей были начаты на ГМС Николаевск-на-Амуре и Александровск-Сахалинский в 1881 г. Спустя десятилетие была открыта ГМС Охотск, в 1895 г. — ГМС Петропавловск-Камчатский, в 1898 г. — ГМС Анадырь. Существенное расширение наблюдательной сети произошло в 1936 г. (ГМС Магадан, Ича и др.). С целью уменьшения случайных ошибок и повышения репрезентативности выборки СГДМ рассчитывались для нескольких прибрежных ГМС: Охотск, Магадан, Александровск-Сахалинский, Поронайск и Николаевск-на-Амуре.

Для оценки связанности ледовитости с СГДМ были рассчитаны коэффициенты корреляции и выделены связи на 95 %-ном уровне значимости. Наибольшие по аб-

---

\* Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1984. Вып. 9, ч. 1. 313 с.

солютной величине значения коэффициентов корреляции между площадью ледяного покрова Охотского моря и СГДМ для отдельных станций получены для ГМС Охотск и Магадан (соответственно  $-0,73$  и  $-0,72$ ) (Романюк и др., 2015; Romanyuk, Kozeka, 2015). Однако общая сумма градусо-дней мороза для всех перечисленных ранее ГМС имеет более тесную взаимосвязь с площадью ледяного покрова и выражается коэффициентом корреляции ( $-0,87$ ) (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции площади ледяного покрова Охотского моря с СГДМ  
на прибрежных ГМС

Table 1

Correlation coefficients between the ice cover in the Okhotsk Sea and the sum of degree-days  
of frost at the coastal meteorological stations

Показатель	Охотск	Магадан	Поронайск	Алекс.-Сах.	Нкл-на-Амуре	Все ГМС
Коэф. кор.	$-0,73$	$-0,72$	$-0,69$	$-0,69$	$-0,71$	$-0,87$
Доверител. интервал	$-0,61/-0,82$	$-0,60/-0,81$	$-0,56/-0,79$	$-0,56/-0,79$	$-0,59/-0,80$	$-0,81/-0,91$

Исходными данными для формирования ряда ежемесячных значений площади ледяного покрова в период с 1929 по 1960 г. являлись материалы попутных судовых наблюдений, приведенные к середине каждого зимнего месяца (Крындин, 1964). Для восстановления пропущенных значений ледовитости Охотского моря использовались уравнения регрессии, связывающие ледовитость с СГДМ на всех ГМС. С целью повышения точности восстановления уравнения регрессии рассчитывались для различных стадий развития массива льда: I — интенсивного ледообразования (декабрь-январь), II — максимального развития (февраль-март) и III — разрушения массива льда (апрель-май). Далее с учетом восстановленных значений вычислялась средняя ледовитость для полного ледового сезона с декабря по май. Качество восстановления отсутствовавших значений ледовитости контролировалось путем анализа всей доступной дополнительной информации (архивы снимков в видимом диапазоне, полученных с ИСЗ серий «Космос» и «Метеор», начиная с 1967 г. архивы снимков с ИСЗ в микроволновых диапазонах, полетные карты ледовых авиаразведок на конкретные даты и др.).

Второй этап наблюдений (с 1957 по 1992 г.) — авиационный (Петров и др., 1998; Плотников, 2002). В этот период времени две группы ледовых наблюдателей из аэропортов Магадан и Южно-Сахалинск в течение ледового сезона 1, 11 и 21-го числа каждого месяца начинали выполнение регулярных облетов акваторий дальневосточных морей по стандартным маршрутам, которые обычно продолжались 4–6 дней (рис. 1). Данные наблюдений сводились в объединённые карты ледовой обстановки для моря в целом и с учетом результатов дополнительных полетов по отдельным районам приводились к середине декады. Полученные карты являлись основой для выполнения дальнейшего анализа и статистических расчетов (Петров и др., 1998; Плотников, 2002; Якунин, 2012). В работе для вычисления сезонных аномалий ледовитости в указанный период использовались значения площади ледяного покрова на середину второй декады каждого зимнего месяца.

Третий (современный) этап наблюдений — спутниковый (1971–2015 гг.). Площадь ледяного покрова рассчитывалась на основе данных наблюдений с искусственных спутников Земли (ИСЗ), осуществляющих дистанционное зондирование Земли пассивными микроволновыми приборами, основным преимуществом которых является независимость выполнения съемок от погодных условий и освещенности. Исходные данные в виде цветокодированных по стандартным градациям сплоченности льда карт-схем находятся в свободном доступе на официальном сайте Japan Meteorological Agency (JMA) (<http://www.data.jma.go.jp>). Площадь ледяного покрова как для отдельных районов Охотского моря, так и для всего моря, рассчитывалась один раз в пентаду с помощью разработанного в Сахалинском государственном университете программного комплекса «ЛЁД» (Минервин и др., 2015а; Пищальник и др., 2015б). Для повышения устойчивости среднемесячные значения ледовитости определялись усреднением её расчетных величин на 10, 15 и 20-е число каждого месяца.

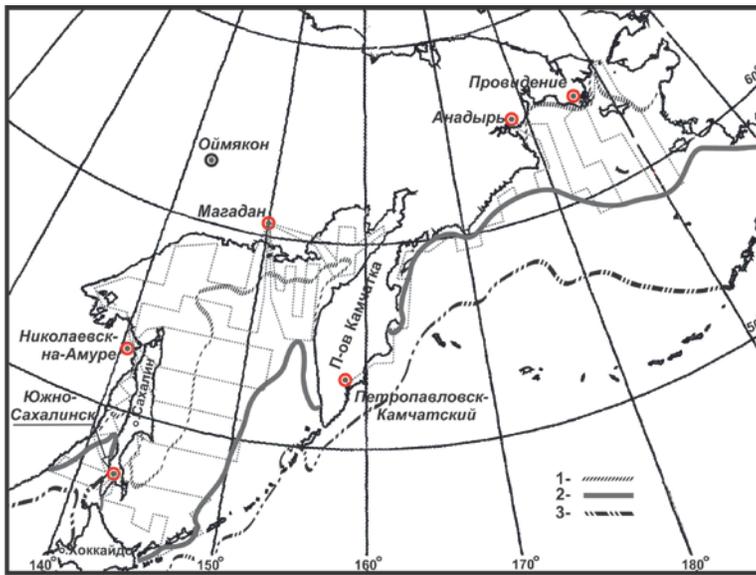


Рис. 1. Схема стандартных маршрутов в период производства регулярных авиационных наблюдений за ледяным покровом на дальневосточных морях с 1955 по 1992 г.: 1 — граница наименьшего распространения льда; 2 — среднее многолетнее положение кромки льда; 3 — граница наибольшего распространения льда по Л.П. Якунину (2012)

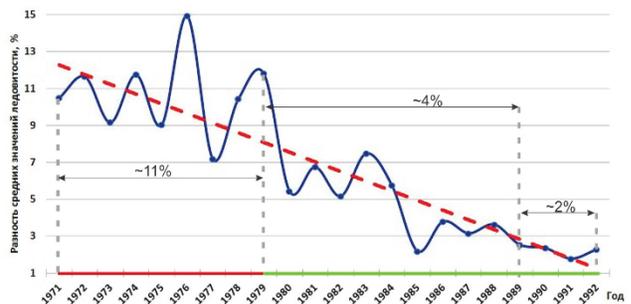
Fig. 1. Scheme of usual routes of airborne observations on the sea ice in the Fra-Eastern Seas in the times of regular flights (1955-1992): 1 — the minimum ice spreading; 2 — mean position of the sea ice edge; 3 — the maximum ice spreading (from: Якунин, 2012)

Оценка точности расчетных данных, полученных с помощью различных технологий, производилась за периоды совместного выполнения судовых и авиационных (1957–1960 гг.) и авиационных и спутниковых наблюдений (1971–1992 гг.). Размах ошибки вычисления ледовитости по судовым и авиационным наблюдениям составлял 4,9 % при средней величине 1,3 %, что соответствует 20,8 тыс. км<sup>2</sup> площади Охотского моря (площадь моря 1 602,3 тыс. км<sup>2</sup> (Петров и др., 1998)).

Результаты анализа точности расчетов площади ледяного покрова, выполненных на основе авиационных и спутниковых наблюдений, представлены на рис. 2. Величина разности средних значений площади льда, полученных с помощью различных технологий, за весь исследуемый период составляет 108,4 тыс. км<sup>2</sup>, что соответствует 6,8 % площади Охотского моря. Наибольшие разности (от 7 до 15 %) характерны для периода с 1971 по 1978 г., при этом их средняя величина составила ~11 %. После 1978 г. величина разностей уменьшается до 4,2 % площади моря (~64 тыс. км<sup>2</sup>). По нашему мнению, это обусловлено улучшением технических характеристик спектрорадиометров, устанавливаемых на ИСЗ. Начиная с 1990 г. по настоящее время погрешность определения площади ледяного покрова с помощью ИСЗ не превышала 1–2 % площади моря (Минервин и др., 2015а). Следовательно, точность расчетов площади ледяного покрова по данным ИСЗ в последние десятилетия вполне сопоставима с точностью расчетов

Рис. 2. Разность средних за сезон значений ледовитости Охотского моря, рассчитанных на основе спутниковых и авиационных данных за период 1971–1992 гг.

Fig. 2. Difference between the mean-seasonal values of the ice cover in the Okhotsk Sea calculated on the data of satellite and airborne observations in 1971–1992



по судовым и авиационным наблюдениям. Несомненным достоинством спутниковых данных является тот факт, что они не имеют искажений, обусловленных приведением результатов отдельных наблюдений к определенной дате для моря в целом, так как съемка производится в режиме реального времени.

С помощью рассмотренных технологий построен ряд ледовитости Охотского моря с месячной дискретностью с 1929 по 2015 г. (Романюк и др., 2015; Romanyuk, Kozeka, 2015). Как уже отмечалось ранее, величина ледовитости за ледовый сезон рассчитывалась усреднением месячных значений площадей ледяного массива с декабря по май. Для корректного проведения сравнительного анализа ледовитость вычислялась как отношение площади, занятой льдом, к площади моря в процентах.

Поскольку наблюдения за температурой воздуха на отдельных ГМС были начаты в 1881 г. (Разуваев, 1993), была предпринята попытка реконструировать ряд ледовитости Охотского моря за период с 1882 по 1928 г. по рассчитанным для них СГДМ. Оценить точность рассчитанных таким образом данных в настоящее время весьма затруднительно, поэтому восстановление значений ледовитости за период с 1882 по 1928 г. следует квалифицировать как качественное.

Сравнительный анализ сформированного ряда ледовитости с данными аномалий глобальной температуры воздуха, представленными Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США ([http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v3/](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/)) за 1880–2014 гг., показывает хорошее совпадение характера изменчивости полиномиальных трендов, находящихся в противофазе, что подтверждает полученные ранее результаты и свидетельствует о достоверности построенного нами ряда ледовитости Охотского моря (рис. 3) (Лобанов и др., 2014).

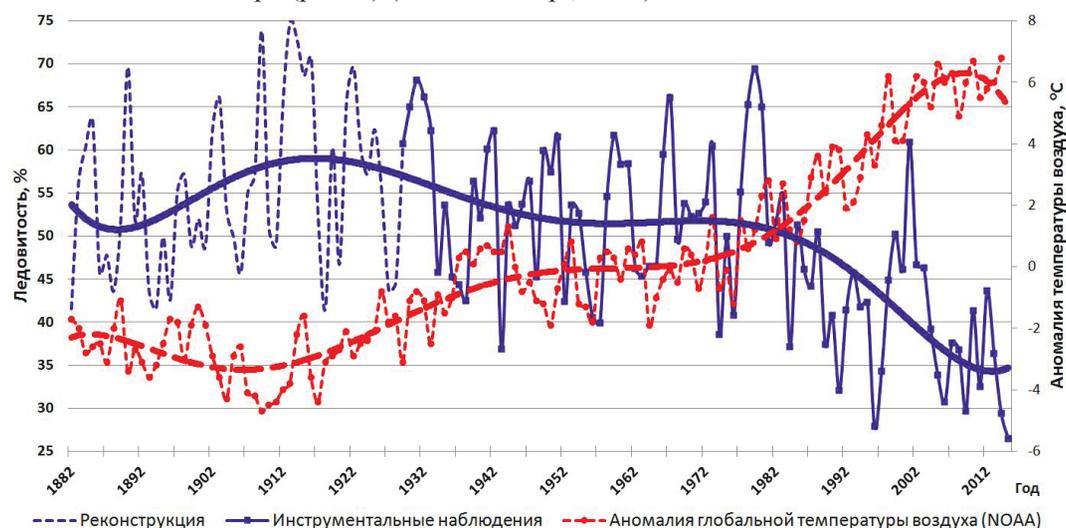


Рис. 3. Многолетние изменения значений ледовитости Охотского моря и аномалий глобальной температуры воздуха и их полиномиальные аппроксимации

Fig. 3. Long-term changes of the ice cover in the Okhotsk Sea and anomaly of the global air temperature. Polynomial approximations are shown

### Результаты и их обсуждение

В сформированном ряду межгодовых колебаний ледовитости выделяются многолетние периоды с положительной (1902–1922 и 1958–1979 гг.) и отрицательной (1882–1901, 1923–1957 и 1980–2015 гг.) тенденциями ее изменения, продолжительность которых варьирует от 20 до 36 лет (рис. 4). С помощью спектрального анализа исследуемого ряда значимо выделяются периоды с колебаниями 6, 9 и 17–18 лет. Начало последнего периода уменьшения площади морского льда (с 1980 г. по настоящее время) по времени хорошо совпадает со сменой тенденций изменения некоторых характеристик центров действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом,

а также с формированием однонаправленных многолетних трендов изменений температуры воды и воздуха в отдельных районах Дальнего Востока, которые были отмечены рядом исследователей (Шатилина и др., 2014, 2016; Pishchalnik et al., 2015; Romanyuk, Kozeka, 2015; и др.).

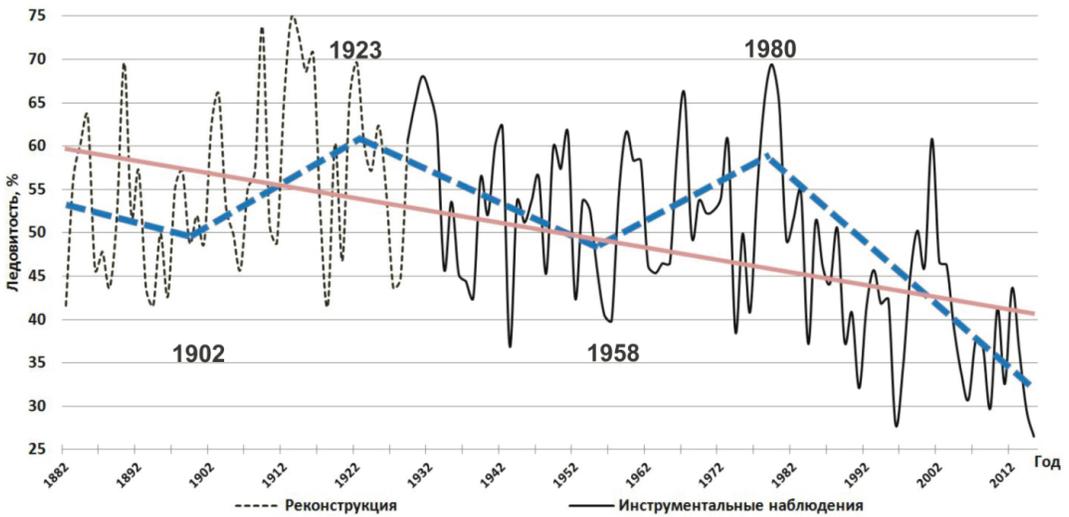


Рис. 4. Многолетние изменения ледовитости Охотского моря и значимый на 95 %-ном уровне линейный тренд за период 1882–2015 гг.

Fig. 4. Long-term changes in the ice cover in the Okhotsk Sea in 1882–2015 and its linear trend with 95 % level of significance

Следует также отметить, что выделенные нами циклические колебания ледовитости на фоне отрицательного линейного тренда по временным параметрам соответствуют долговременным циклическим колебаниям температуры воздуха в Арктике и ледовитости арктических морей продолжительностью около 60, 20, 10 лет и менее: за теплым периодом 1922–1956 гг. в Арктике последовал холодный период 1957–1984 гг., а с середины 1980-х гг. начался очередной теплый период (Frolov et al., 2009).

При анализе временных рядов была проведена аппроксимация выделенных периодов линейными функциями вида:  $y^* = at + b$ , с использованием условия метода наименьших квадратов (Смирнов и др., 1992):

$$\sqrt{\sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} (y_i^* - y_i)^2} \rightarrow \min,$$

т.е. расчёт линейных трендов и количественная оценка сходства временных изменений для пар рядов методом линейной регрессии с использованием коэффициентов корреляции:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}.$$

Статистическая значимость тренда оценивалась исходя из величины коэффициента корреляции и длины сравниваемых рядов путём статистической проверки нулевой гипотезы ( $r = 0$ ) с помощью отношения величины коэффициента корреляции для реального ряда к его критической величине при уровне доверительной вероятности 95 %.

Установлено, что временные ряды за периоды 1923–1957, 1980–2015 гг. и за весь исследуемый ряд с 1882 по 2015 г. характеризуются значимыми (на уровне > 95 %) отрицательными трендами (коэффициенты корреляции выше критических значений соответственно  $0,36 > 0,31$ ,  $0,57 > 0,30$  и  $0,47 > 0,12$ ). Статистическая значимость трендов за периоды 1882–1901, 1902–1922 и 1958–1979 гг. мала, так как их коэффициенты корреляции ниже критических значений (соответственно  $0,12 < 0,31$ ,  $0,12 < 0,32$  и  $0,07 < 0,29$ ).

Изменения ледовитости Охотского моря в различные временные периоды имеют свои особенности. Так, в 1882–1901 гг. уменьшение ледовитости происходило со ско-

ростью 1,5 % за 10 лет (средняя ледовитость для всего периода составляет 52 %). В 1902–1922 гг. наблюдалось интенсивное увеличение ледовитости моря на 2,4 % за 10 лет. При средней для этого периода времени величине ледовитости, равной 60 %, её максимальные значения в 1913 и 1914 гг. достигали соответственно 75 и 73 %, только в 1906 и 1918 гг. ледовитость уменьшалась до 46 и 42 %. На фоне значительной ледовитости периода 1923–1957 гг. сокращение площади ледяного покрова происходило со скоростью 2,9 % за 10 лет. Средняя ледовитость для указанного временного промежутка составила 53 %. С 1958 по 1979 г. ледовитость вновь увеличивалась на 1,9 % за 10 лет. Средняя ледовитость при этом достигла 54 %. Как было отмечено ранее, с 1980 г. и по настоящее время в Охотском море наблюдается устойчивая тенденция уменьшения ледовитости на 4,7 % за 10 лет, а средняя ледовитость уменьшилась до 42 %.

Сокращение ледовитости Охотского моря в течение всего исследуемого периода (1882–2015 гг.) происходило со скоростью 1,3 % за 10 лет, в результате её среднее значение уменьшилось на 17 %. Максимальные значения ледовитости наблюдались в 1890, 1909, 1913–1916, 1922, 1931, 1967 и 1979 гг., минимальные — в сезоны 1996 и 2015 гг. Размах колебаний ледовитости составлял более 50 %, при этом в ледовый сезон 2015 г. ледовитость была наименьшей (26,5 %) за всю историю ледовых наблюдений с 1929 г., а с учетом данных ретроспективного анализа — за последние 134 года. Следует отметить, что среднее значение ледовитости в начале XXI в. по отношению к климатической норме, рассчитанной для периода 1961–1990 гг., уменьшилась на 16 % (рис. 4).

В табл. 2 представлены суммы градусо-дней мороза и тепла на прибрежных ГМС за разные временные периоды. Для корректного сравнения данных расчеты выполнены для промежутка 1936–2015 гг., в котором практически отсутствуют пропуски в наблюдениях. Установлено, что в 1958–1980 гг. по сравнению с 1936–1957 гг. наблюдалось увеличение СГДМ в северо-западной части Охотского моря (ГМС Охотск, Магадан), но для ГМС, расположенных в южной части моря, характерно уменьшение её значений. С 1980 г. отмечается значительное уменьшение количества холода на всех ГМС (в среднем на 177 градусо-дней). Аналогичные изменения характерны и для СГДТ: по сравнению с 1936–1957 гг. в 1958–1980 гг. произошло уменьшение тепла на ГМС Охотск, Магадан, Николаевск-на-Амуре и его увеличение на ГМС Поронайск и Александровск-Сахалинский. При этом с 1980 по 2015 г. количество тепла увеличилось на всех ГМС в среднем на 91 градусо-день. Уменьшение СГДМ за последние 30 лет в северном, центральном и южном районах моря отмечают и другие исследователи (Думанская, 2015).

Таблица 2  
Динамика значений СГДМ и СГДТ на прибрежных ГМС в периоды различной направленности развития ледовых процессов в Охотском море

Table 2  
Dynamics of the sums of degree-days of frost (СГДМ) and degree-days of warm (СГДТ) at the coastal meteorological stations for the periods of increasing and decreasing of the ice cover in the Okhotsk Sea

Период	Охотск	Магадан	Поронайск	Алекс.-Сах.	Нкл-на-Амуре	Все ГМС
СГДМ (TADDF)						
1936–2015	–2880	–2353	–1717	–1796	–2670	–2283
1936–1957	–2941	–2400	–1831	–1898	–2797	–2374
1958–1979	–3022	–2482	–1710	–1856	–2724	–2359
1980–2015	–2756	–2246	–1652	–1697	–2559	–2182
СГДТ (TADDH)						
1936–2015	1371	1248	1904	2070	1949	1708
1936–1957	1342	1208	1881	2080	1927	1687
1958–1979	1302	1191	1894	2009	1902	1660
1980–2015	1430	1307	1924	2102	1991	1751

Выявленные особенности свидетельствуют о сложном и неравномерном характере поступления холода и тепла на различные участки поверхности моря, что указывает

на необходимость обязательного выполнения процедуры районирования при изучении ледового режима Охотского моря (Минервин и др., 2015б).

Для анализа изменчивости временного ряда рассчитаны аномалии ледовитости, вычисленные относительно климатической нормы 1961–1990 гг.\* Анализ многолетнего хода аномалий ледовитости осуществлялся с помощью метода интегральных кривых (рис. 5), которые рассчитывались путем последовательного алгебраического суммирования их величин (Шатилина и др., 2014). Фактически интегральная кривая аномалий исследуемого параметра характеризует изменения его многолетнего хода (Гирс, Кондратович, 1978).

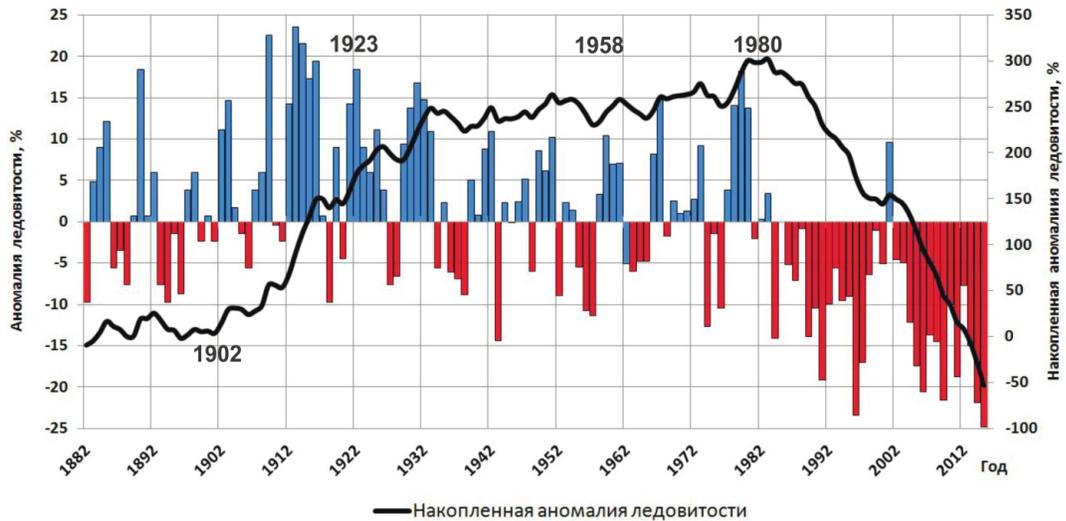


Рис. 5. Интегральная кривая аномалий ледовитости Охотского моря, вычисленных относительно климатической нормы 1961–1990 гг.

Fig. 5. Cumulative curve of the ice cover anomaly in the Okhotsk Sea (relative to the mean ice cover for the 1961–1990)

На интегральной кривой отчетливо выделяются периоды накопления положительных (с 1882 по 1901 г. и с 1923 по 1979 г.), резкого повышения (с 1902 по 1922 г.) и понижения (с 1980 по 2015 г.) аномалий ледовитости, которые совпадают с выделенными ранее многолетними колебаниями (см. рис. 4). Для периодов относительно стабильного состояния ледяного покрова характерно чередование 3–4-летних периодов повышения и понижения аномалий ледовитости с преобладанием абсолютных значений до 10 %. В периоды резких изменений интегральной кривой наблюдалось двукратное увеличение абсолютных значений аномалий и увеличение периодов их колебаний до 5–6 лет. На этом фоне выделяются экстремально ледовитые зимы 1909, 1913, 1914 гг. и экстремально малоледовитые зимы 1996, 2006, 2009, 2014 и 2015 гг., когда аномалии ледовитости превышали 20 %. С 1984 г. наблюдается период преобладания отрицательных аномалий ледовитости, в котором выделяется только один ледовый сезон (2000–2001 гг.) с положительной аномалией 9,6 %.

Сглаживание ряда аномалий ледовитости Охотского моря скользящим осреднением с интервалом фильтрации, равным 24 годам (выбор интервала фильтрации определялся наличием в исходном анализируемом ряде долговременных колебаний с близким периодом), позволяет наглядно увидеть крупномасштабную перестройку в развитии ледовых процессов в море (рис. 6).

Всемирная метеорологическая организация (WMO) рекомендует для оценки климатических изменений рассчитывать средние характеристики параметров за 30-летние периоды начиная с 1901 г.\* Очевидно, что норма ледовитости, вычисленная для 1961–1990 гг., наиболее близка к среднему значению ледовитости для всего исследуемого

\* WMO Sea-Ice Nomenclature. Geneva, 1970. P. 1.

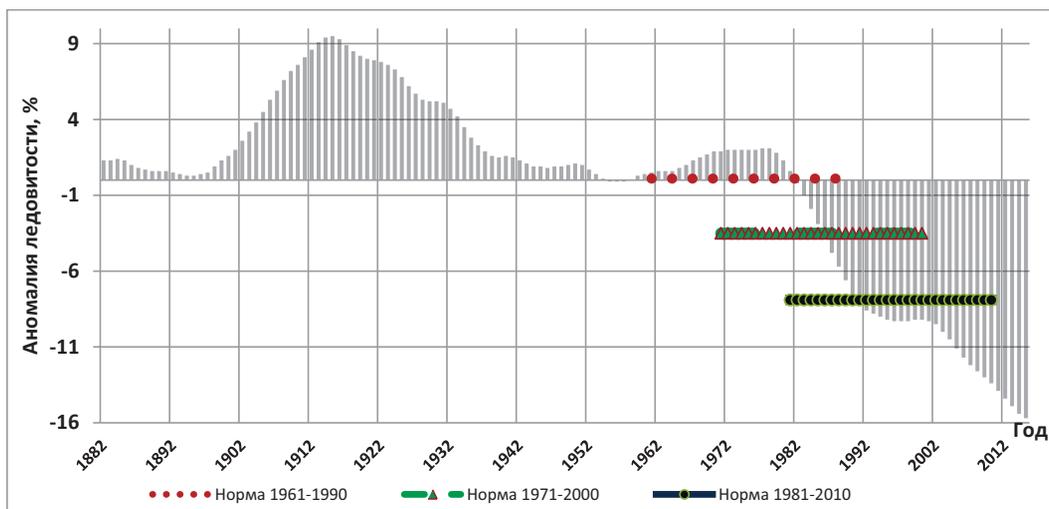


Рис. 6. Сглаженный по 24 годам многолетний ход аномалий ледовитости Охотского моря и климатические нормы ледовитости за различные временные периоды

Fig. 6. Long-term changes of the ice cover in the Okhotsk Sea smoothed by 24-year running smoothing and mean levels of the ice cover for certain periods of averaging

ряда. Значения оперативных норм, рассчитанных для 1971–2000 и 1981–2010 гг., существенно отличаются от стандартной величины. Это свидетельствует о своевременности решения, принятого ВМО в 2015 г., об обновлении климатических норм каждые 10 лет, что особенно важно в периоды продолжительных изменений исследуемого параметра с однонаправленной тенденцией (как, например, фаза уменьшения ледовитости с 1980 г.), так как последние более достоверно отражают его современное состояние ([https://www.wmo.int/pages/index\\_ru.html](https://www.wmo.int/pages/index_ru.html)).

Одним из эффективных приемов анализа ледового режима является выполнение типизации зим по суровости ледовых условий. Ранжирование выполнялось для пяти интервалов — экстремально суровые (ЭС), суровые (С), умеренные (У), мягкие (М) и экстремально мягкие (ЭМ).

В качестве критерия типизации использовался диапазон изменения значений ледовитости, рассчитанный по формуле (Плотников, Вакульская, 2012):

$$\Delta L = \frac{L_{max} - L_{min}}{k}, \quad (1)$$

где  $L_{max}$ ,  $L_{min}$  — максимальное и минимальное значения ледовитости за сезон;  $k$  — количество типов.

Интервалы изменчивости ледовитости для каждого типа определялись следующим образом:

$$\text{— экстремально суровый: } L_{min} + 4\Delta L \leq L_5 \leq L_{max}; \quad (2)$$

$$\text{— суровый: } L_{min} + 3\Delta L \leq L_4 \leq L_{min} + 4\Delta L; \quad (3)$$

$$\text{— умеренный: } L_{min} + 2\Delta L \leq L_3 \leq L_{min} + 3\Delta L; \quad (4)$$

$$\text{— мягкий: } L_{min} + \Delta L \leq L_2 \leq L_{min} + 2\Delta L; \quad (5)$$

$$\text{— экстремально мягкий: } L_{min} \leq L_1 \leq L_{min} + \Delta L. \quad (6)$$

Результаты типизации зим по суровости ледовых условий приводятся в табл. 3 и на рис. 7.

За весь исследуемый период (1882–2015 гг.) типы зим по суровости ледовых условий распределились следующим образом: ЭС — 13 %, С — 18 %, У — 34 %, М — 28 % и ЭМ — 7 %. Доля ЭС и С типов зим в сумме составила 31 %, М и ЭМ — 35 %. Таким образом, при объединении типов экстремально суровых и суровых зим, равно как и экстремально мягких и мягких зим в один тип, мы получаем примерно равную повторяемость основных типов.

Таблица 3  
Типизация зим по суровости ледовых условий в Охотском море с 1882 по 2015 г.

Table 3

Winters typization for 1882–2015 by ice conditions in the Okhotsk Sea

Тип зимы	Годы
Экстремально суровый	1885, 1890, 1903, 1909, 1912–1916, 1921, 1922, 1930–1932, 1967, 1978–1980
Суровый	1883, 1884, 1892, 1898, 1902, 1908, 1919, 1923–1925, 1929, 1933, 1939, 1941, 1942, 1947, 1949–1951, 1959–1961, 1973, 2001
Умеренный	1887, 1889, 1891, 1895, 1897, 1899–1901, 1904, 1905, 1907, 1910, 1911, 1917, 1920, 1926, 1935, 1940, 1944–1946, 1953–1955, 1958, 1962, 1964–1966, 1968–1972, 1975, 1977, 1981–1983, 1985, 1986, 1988, 1999, 2000, 2002, 2003
Мягкий	1882, 1886, 1888, 1893, 1894, 1896, 1906, 1918, 1927, 1928, 1934, 1936–1938, 1943, 1948, 1952, 1956, 1957, 1963, 1974, 1976, 1984, 1987, 1989, 1990, 1992–1995, 1998, 2004, 2007, 2008, 2010, 2012, 2013
Экстремально мягкий	1991, 1996, 1997, 2005, 2006, 2009, 2011, 2014, 2015

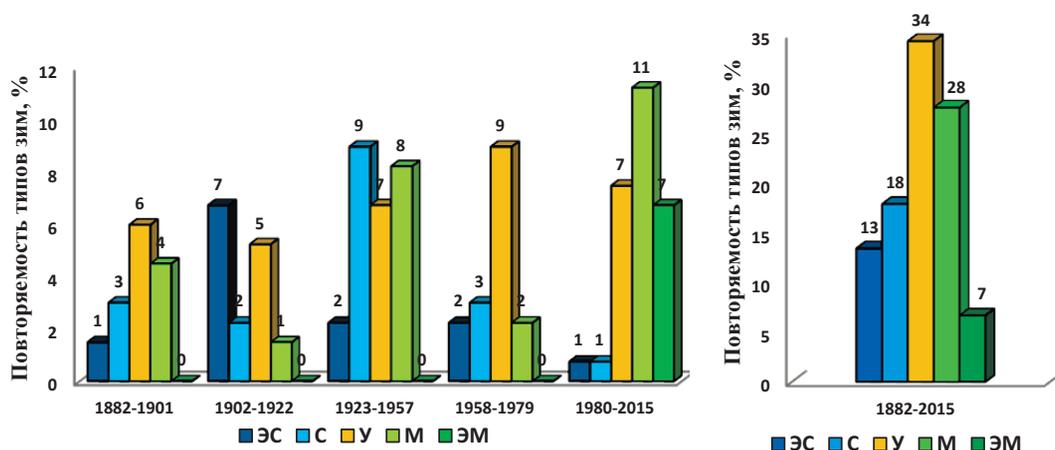


Рис. 7. Повторяемость типов зим по суровости ледовых условий в Охотском море для различных временных периодов

Fig. 7. Frequency of the winter types by ice conditions in the Okhotsk Sea for different time periods

Детальное ранжирование зим по суровости ледовых условий в рамках выделенных многолетних колебаний площади ледяного покрова (см. рис. 4) позволяет заключить, что максимальная повторяемость С и ЭС зим отмечалась в период резкого повышения ледовитости в 1902–1922 гг. (9 %) и в последующий период повышенной ледовитости 1923–1957 гг. (11 %) (см. рис. 5). Повторяемость М зим в указанные периоды колебалась от 1 до 8 %. Следует отметить, что ЭМ зимы как самостоятельный тип начали наблюдаться только в период потепления с 1991 г. С 1980-х гг. повторяемость М и ЭМ зим возросла более чем вдвое — до 18 %, а С и ЭС понизилась до 2 %, что является следствием глобальных климатических изменений, происходящих в атмосфере и гидросфере.

## Выводы

Впервые сформирован ряд ледовитости Охотского моря с месячной дискретностью с 1929 по 2015 г. на основе данных, полученных с помощью различных методов наблюдений. По данным о сумме градусо-дней мороза на прибрежных гидрометеорологических станциях с помощью регрессионного анализа восстановлены значения ледовитости с 1882 по 1928 г. для каждого ледового сезона.

Установлено, что фоновые изменения ледовитости Охотского моря, проявляющиеся в её долговременных колебаниях, имеют нерегулярный характер (ориентировочная продолжительность циклов составляет от 40 до 52 лет) и практически полностью определяются вариациями глобальной температуры воздуха. Поэтому можно предпо-

ложить, что изменчивость характеристик в центрах действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом (приземного давления, геопотенциала  $H_{500}$ , местоположения, циклонической активности и т.д.) играет второстепенную роль и обуславливает различия в распределении льда между отдельными районами внутри моря.

Ледовитость Охотского моря за временной период с конца XIX до начала XXI в. уменьшилась приблизительно на 17 %. При этом размах варьирования межгодовых изменений ледовитости составлял более 50 %.

С 1980 г. наблюдается устойчивое уменьшение площади ледяного покрова в Охотском море со скоростью около 5 % за 10 лет, которое продолжается по настоящее время.

В ледовом сезоне 2014–2015 гг. зафиксировано минимальное значение ледовитости (26,5 %) за историю наблюдений с 1929 по 2015 г., а с учетом реконструированных данных — за последние 134 года.

Экстремально суровые, суровые, умеренные и мягкие по ледовым условиям зимы в Охотском море до конца 1980-х гг. наблюдались при любом уровне фоновой ледовитости. Экстремально мягкие зимы, как самостоятельный тип, начали формироваться только с 1991 г. Можно предположить, что при дальнейшем изменении климата Земли в сторону потепления экстремально суровые типы зим в Охотском море развиваться не будут.

В начавшийся с середины 1980-х гг. период потепления, относительно предыдущих периодов, суммарная повторяемость экстремально суровых и суровых зим уменьшилась в среднем на 5 %, а мягких и экстремально мягких увеличилась на 14 %. Этот факт является свидетельством глобальных климатических изменений, происходящих в атмосфере и гидросфере.

*В заключение авторы хотели бы вспомнить и поблагодарить всех гидрометеорологов, выполнявших наблюдения за состоянием ледяного покрова с прибрежных ГМС, судов, самолетов и вертолетов, благодаря самоотверженному труду которых стало возможно проведение настоящего исследования. Авторы также выражают благодарность канд. геогр. наук С.А. Покрашенко, канд. геогр. наук Ю.В. Любицкому за конструктивные замечания, высказанные ими в процессе подготовки работы, и лаборанту И.В. Шумилову за помощь в обработке данных.*

### Список литературы

**Гирс А.А., Кондратович К.В.** Методы долгосрочных прогнозов погоды : учеб. пособие. — Л. : Гидрометеоиздат, 1978. — 344 с.

**Думанская И.О.** Изменение климатических ледовых характеристик Охотского моря в конце XX — начале XXI века // Тр. Гидрометцентра России. — 2015. — Вып. 354. — С. 112–137.

**Крындин А.Н.** Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Тр. ГОИН. — 1964. — Вып. 71. — С. 5–80.

**Лобанов В.Б., Данченков М.А., Лучин В.А. и др.** Глава 5.4. Дальневосточные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М. : Росгидромет, 2014. — С. 684–743.

**Минервин И.Г., Пищальник В.М.** Особенности развития ледовых процессов в Охотском море в зимнем сезоне 2013–2014 гг. // Ученые записки Сахалинского государственного университета. — Южно-Сахалинск : СахГУ, 2015. — Вып. 11/12/2014/2015. — С. 16–25.

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

**Минервин И.Г., Романюк В.А., Пищальник В.М. и др.** Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей // Вестн. РАН. — 2015б. — Т. 85, № 1. — С. 24–32.

**Петров А.Г., Плотников В.В., Якунин Л.П.** Ледовые условия и методы их прогнозирования // Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9 : Охотское море, вып. 1 : Гидрометеорологические условия. — СПб. : Гидрометеоиздат, 1998. — С. 291–340.

**Пищальник В.М., Иванов В.В., Трусков П.А.** Прогноз вариаций площади ледяного покрова Охотского моря методом последовательных спектров // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 165. — С. 158–172.

**Пищальник В.М., Минервин И.Г., Романюк В.А.** Особенности ледовых условий в Охотском море и Татарском проливе в зимний сезон 2014–2015 гг. // Физика геосфер : мат-лы докл. 9-го Всерос. симпоз. — Владивосток : Дальнаука, 2015а. — С. 171–177.

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

**Плотников В.В.** Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2002. — 171 с.

**Плотников В.В., Вакульская Н.М.** Изменчивость ледовых условий Берингова моря во второй половине XX — начале XXI века // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 170. — С. 220–228.

**Разуваев В.Н.** Суточные данные о температуре воздуха и сумме осадков по 233 станциям СССР. — Обнинск : НИИ гидрометеорологической информации, 1993. — 133 с.

**Романюк В.А., Минервин И.Г., Пищальник В.М.** Восстановление ряда ледовитости Охотского моря с 1882 по 2015 г. // Физика геосфер : мат-лы докл. 9-го Всерос. симпоз. — Владивосток : Дальнаука, 2015. — С. 194–198.

**Смирнов Н.П., Вайновский П.А., Титов Ю.Э.** Статистический диагноз и прогноз океанологических процессов : моногр. — СПб.: Гидрометеоздат, 1992. — 200 с.

**Хен Г.В., Зуенко Ю.И., Сорокин Ю.Д. и др.** Особенности гидрологических условий в дальневосточных морях и СЗТО в 2003–2005 гг. // Вопр. промысл. океанол. — 2006. — Вып. 3. — С. 92–111.

**Шатилина Т.А., Цицашвили Г.Ш., Муктепавел Л.С. и др.** Статистические оценки трендов климатических изменений над Дальним Востоком в зимний и летний периоды 1980–2012 гг. // Вопр. промысл. океанол. — 2014. — Вып. 11, № 1. — С. 76–97.

**Шатилина Т.А., Цицашвили Г.Ш., Радченкова Т.В.** Оценка тенденций изменчивости центров действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом в летние периоды 1950–1979 и 1980–2012 гг. // Метеорол. и гидрол. — 2016. — № 1. — С. 17–28.

**Якунин Л.П.** Атлас основных параметров ледяного покрова Охотского моря. — Владивосток : ДВФУ, 2012. — 118 с.

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

**Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P. et al.** Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. — Chichester : Praxis Publishing Ltd, 2009. — 164 p.

**Pishchalnik V.M., Minervin I.G., Romanyuk V.A., Batukhtina A.S.** On the modern climate shift in the regime of iciness of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan // Proc. of the 30<sup>th</sup> Intern. Symp. on Okhotsk Sea & Sea Ice. — Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2015. — С. 99–102.

**Romanyuk V., Kozeka F.** Recovery ice cover Okhotsk and Sea of Japan for the period from 1929 to 2014 // Proc. of the 30<sup>th</sup> Intern. Symp. on Okhotsk Sea & Sea Ice. — Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2015. — С. 254–256.

*Поступила в редакцию 10.03.16 г.*