

© Авторы 2024 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2024. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.467

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.114-126>  
<https://www.elibrary.ru/vjivyc>

## Экспериментальная модель внутрисезонного хода ледовитости Охотского моря

И. В. Шумилов<sup>1,2</sup>, И. Г. Минервин<sup>1</sup>, В. М. Пищальник<sup>1,2</sup>, В. А. Романюк<sup>1</sup>

@E-mail: [ilyarolevik1@yandex.ru](mailto:ilyarolevik1@yandex.ru)

<sup>1</sup>Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

**Резюме.** В работе предложена экспериментальная модель прогноза внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова Охотского моря, реализованная в виде программы для ЭВМ. Физико-статистическая модель построена на основе следующих компонентов: взаимосвязь сезонного максимума площади ледяного покрова акватории Охотского моря с показателями приземной температуры воздуха и поверхности воды; взаимосвязь кратковременных колебаний ледовитости под воздействием циклонической деятельности в периоды наступления сизигий Луны; тренд многолетних изменений ряда ледовитости Охотского моря. Для построения прогностической физико-статистической модели проведен анализ различных рядов данных за период 1980–2018 гг. Основные источники данных для поиска взаимосвязей параметров – архивы реанализа ERA-Interim, ERA5, информация на основе наблюдений за температурой воздуха на прибрежных ГМС и пентадные карты распределения ледяного покрова по сплоченности, публикуемые Японским метеорологическим агентством. Алгоритмы прогностической модели реализованы на языке программирования Python с применением дополнительных программных библиотек. Модель позволяет производить вычисление прогнозных значений площади ледяного покрова в период его осенне-зимнего нарастания с ноября-декабря до наступления сезонного максимума (март) с заблаговременностью до 4 мес. В качестве входных данных для построения уравнений регрессии используются многолетние ряды значений температуры воздуха и поверхностного слоя воды, дат смены фаз Луны и значений площади ледяного покрова Охотского моря. Выходные данные модели – значения внутрисезонного хода ледовитости. Модель была проверена на периоде 2001–2020 гг., при этом средняя относительная ошибка вычисленных прогностических значений площади ледяного покрова по сравнению с фактическими была менее 7 %. Оправдываемость прогноза в период максимального развития и наступления сезонного максимума для умеренных и мягких зим по сложности ледовых условий составила 79 %.

**Ключевые слова:** Охотское море, ледяной покров, ледовитость моря, дистанционное зондирование Земли, моделирование, прогнозирование

## Experimental model of intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk

Ilya V. Shumilov<sup>1,2</sup>, Igor G. Minervin<sup>1</sup>, Vladimir M. Pishchalnik<sup>1,2</sup>, Valery A. Romanyuk<sup>1</sup>

@E-mail: [ilyarolevik1@yandex.ru](mailto:ilyarolevik1@yandex.ru)

<sup>1</sup>Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** This paper proposes an experimental model for predicting the intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk, implemented as a computer program. The physical and statistical model was built on the basis of the following components: the relationship of the seasonal maximum ice area in the Sea of Okhotsk with surface air and water surface temperature parameters; the relationship between short-term fluctuations in ice area influenced by cyclonic activity during lunar syzygies; and the tendency of long-term changes in ice area series in the Sea of Okhotsk. Various data series for the period 1980–2018 were analyzed in order to build a predictive physical and statistical model. The main data sources for determining parameter relationships were the ERA-Interim and ERA5 reanalysis archives, data on air temperatures from

coastal hydrometeorological stations, and five-day maps of the distribution of ice concentration published by the Japan Meteorological Agency. The predictive model algorithms were implemented in the Python programming language using additional software libraries. The model allows the calculation of predicted values of ice area during the period of its fall-winter growth from November/December until its seasonal maximum (March), with a lead time of up to four months. The input data for constructing regression equations were a long-term series of air and surface water temperature parameters, dates of lunar phase changes, and values of ice area in the Sea of Okhotsk. The output data of the model were the values of the intraseasonal variability of ice area. The model was tested for the period 2001–2020, and the average relative error of the calculated and predicted values of ice area compared to the actual values was less than 7%. The accuracy of prediction during the period of maximum development growth and the seasonal maximum for temperate and mild winters in terms of the complexity of ice conditions was 79 %.

**Keywords:** Sea of Okhotsk, ice area, sea ice, remote sensing, modeling, prediction

*Для цитирования:* Шумилов И.В., Минервин И.Г., Пищальник В.М., Романюк В.А. Экспериментальная модель внутрисезонного хода ледовитости Охотского моря *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 2, с. 114–126. <https://doi.org/10.30730/grtz.2024.8.2.114-126>; <https://www.elibrary.ru/vjivyc>

*For citation:* Shumilov I.V., Minervin I.G., Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A. Experimental model of intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk. *Geosistemy perednykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 114–126. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2024.8.2.114-126>; <https://www.elibrary.ru/vjivyc>

### Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Сахалинского государственного университета «Создание научных основ управления процессами поглощения и накопления углерода биоморфолитосистемами прибрежно-морских водно-болотных угодий и прилегающих морских акваторий» (FEFF-2024-0004). Авторы благодарят уважаемых рецензентов за доброжелательную критику и конструктивные замечания, способствующие улучшению данной публикации.

### Funding and Acknowledgements

The study was carried within the framework of the state assignment of Sakhalin State University “Creation of a scientific basis for managing the processes of carbon absorption and accumulation by biomorpholitic systems of coastal marine wetlands and adjacent marine areas” (FEFF-2024-0004).

The authors would like to thank the respected Reviewers for their kind criticism and constructive comments that contributed to the improvement of this publication.

### Введение

В статье представлена экспериментальная прогностическая модель внутрисезонной ледовитости Охотского моря, необходимая для планирования работ, связанных с морской добычей биоресурсов, добычей нефти и газа на шельфовых проектах и обеспечением безопасности мореплавания. Сложные ледовые условия в холодный период года сильно затрудняют работу морского транспорта и проведение работ на шельфе, повышают риски возникновения аварийных ситуаций. Задачи по исследованию ледовых условий, оперативному мониторингу ледовой обстановки и прогнозированию внутрисезонной изменчивости ледяного покрова актуальны для снижения экономических рисков и обеспечения безопасности судоходства [1, 2, 3].

Исходные исторические сведения о ледяном покрове Охотского моря дают попутные судовые наблюдения в период 1929–1960 гг. [4], авиационные наблюдения 1957–1992 гг.

[2, 5] и спутниковый мониторинг, начавшийся с 1971 г. [6]. На основе данных наблюдений за ледовитостью были предприняты первые попытки формулировки закономерностей изменчивости ледяного покрова Охотского моря [7, 8], поиск прогностических связей между местоположением кромки льда и процессами атмосферной циркуляции [4, 9, 10], реализован физико-статистический метод прогноза ледовитости [11], апробирована гидродинамическая модель осенне-зимних процессов [12, 13], реализован прогноз вариаций площади ледяного покрова методом последовательных спектров [6]. В монографии В.В. Плотникова предложены и проанализированы результаты нескольких подходов к долгосрочному прогнозированию состояния ледяного покрова Охотского моря: подход с использованием коэффициентов Фурье для фонового прогноза декадной ледовитости Охотского моря, подход с применением метода группового учета аргументов, вероятностные подходы с применением метода апри-

орных условных вероятностей, модели цепей Маркова и байесовского прогноза [5].

Для решения задачи долгосрочного прогнозирования внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова Охотского моря нами разработана экспериментальная прогностическая физико-статистическая модель. Основными компонентами этой модели являются: взаимосвязь сезонного максимума площади ледяного покрова с показателями приземной температуры воздуха и поверхности воды; взаимосвязь кратковременных колебаний ледовитости под воздействием циклонической деятельности в периоды наступления фаз сизигий Луны; тренды многолетних изменений рядов ледовитости. Программная часть алгоритма модели была реализована на языке программирования Python ([www.python.org](http://www.python.org)) с применением дополнительных программных библиотек.

## Материал и методы исследования

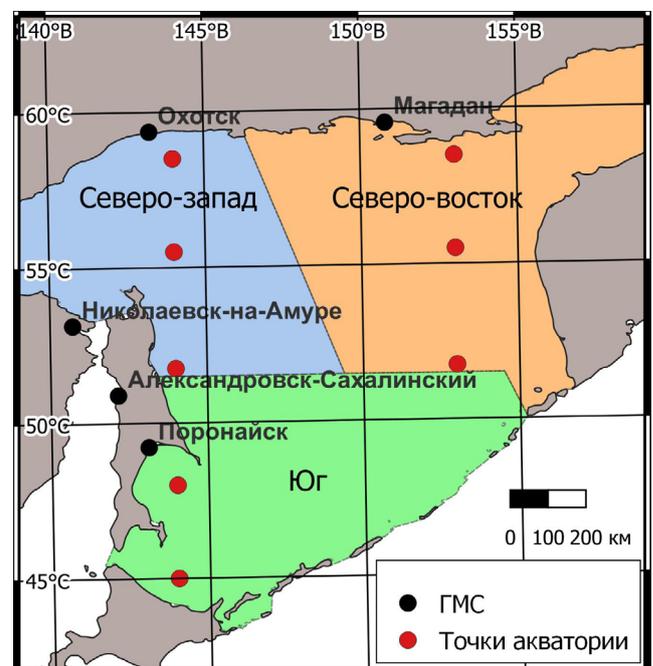
Для получения многолетних и внутрисезонных рядов площади ледяного покрова использовался архив карт-схем распределения ледяного покрова по сплоченности Японского метеорологического агентства (ЖМА) ([www.data.jma.go.jp](http://www.data.jma.go.jp)), который находится в открытом доступе. Карты-схемы ЖМА публикуются с 1971 г. по настоящее время и имеют пентадную дискретность. Анализировались сезонные наборы карт-схем ЖМА за периоды 1980–1997 гг. (с декабря по май) и 1998–2018 гг. (с ноября по июль). Обработка наборов карт-схем проводилась с помощью разработанного нами пакета модулей обработки ледовых данных «Ice Data Processing» [14].

В качестве исходных данных о температуре поверхностного слоя воды использовался архив реанализа ERA-Interim, содержащий данные за период 1979–2019 гг. в виде NetCDF-файлов ([www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)). Выборка данных из NetCDF-файлов осуществлялась с помощью программного обеспечения Ocean Data View ([odv.awi.de](http://odv.awi.de)).

Были проанализированы ряды поверхностной температуры воды в нескольких точках акватории Охотского моря, равномерно распределенных по широте и принад-

лежащих трем его регионам – северо-западному, северо-восточному и южному [15, 16, 17] (рис. 1). Для поиска взаимосвязи между внутрисезонной площадью ледяного покрова и температурой воздуха были проанализированы данные наблюдений за температурой воздуха на прибрежных ГМС (в частности на ГМС Поронайск, Николаевск-на-Амуре, Александровск-Сахалинский, Магадан и Охотск) ([tr5.ru](http://tr5.ru)) (рис. 1). Эти станции были выбраны по условиям широтного географического местоположения, позволяющего использовать их для анализа интенсивности поступления холода с материка на акваторию моря под действием зимнего муссона – одного из основных факторов, определяющих динамику развития ледяного покрова акватории Охотского моря [3, 18]. Для приведения к общему периоду при анализе рассматривались данные из указанных источников, охватывающие ледовые сезоны 1980–2018 гг.

Программные модули модели были реализованы с помощью языка программирования Python ([www.python.org](http://www.python.org)) с применением дополнительных программных библиотек



**Рис. 1.** Расположение ГМС и рассматриваемых точек акватории Охотского моря для анализа температуры воды и воздуха в его регионах – северо-западном, северо-восточном и южном.

**Fig. 1.** Location of hydrometeorological station and points in the Sea of Okhotsk considered for analysis of water and air temperatures in its three regions, northwest, northeast, and south.

NumPy (numpy.org) (для обработки числовых массивов), Pandas (pandas.pydata.org) (для обработки табличных данных и временных рядов), Scikit-learn (scikit-learn.org) (для реализации регрессионных функций), OpenPyXL (openpyxl.readthedocs.io) (для работы с табличными файлами формата .xlsx).

## Результаты

Важной характеристикой для разработки прогностической модели внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова Охотского моря является сезонный максимум. Его значение зависит от интенсивности роста площади льда в осенне-зимний период, на которую, в свою очередь, влияют начальные гидрометеорологические условия в акватории – такие как температура воды и воздуха. При анализе были рассмотрены взаимосвязи температуры воды и воздуха на начальной стадии развития ледовитости с сезонным максимумом площади ледяного покрова в Охотском море в целом и в отдельных регионах. Для исследования применялась схема иерархического районирования на основе особенностей дрейфа и различия условий формирования ледяного покрова [15, 16, 17].

В ходе поиска необходимых предикторов для оценки сезонного максимума площади ледяного покрова была рассмотрена средняя температура поверхности воды в октябре (данные модели реанализа ERA-Interim) (www.ecmwf.int), отражающая начальные

температурные условия сезона (табл. 1). Проведенный анализ показал, что коэффициент корреляции между значением сезонного максимума площади ледяного покрова в Охотском море в целом и в его северо-восточном регионе и средней температурой поверхности воды в октябре в точке 51°45' N и 153°00' E (рис. 2) достигает значений –0.50 и –0.58 соответственно, что отвечает среднему уровню корреляции. Коэффициенты корреляции являются значимыми, так как превосходят по модулю критическое значение 0,22 корреляции Пирсона при уровне доверия 95 % (для 39-летнего ряда) [19].

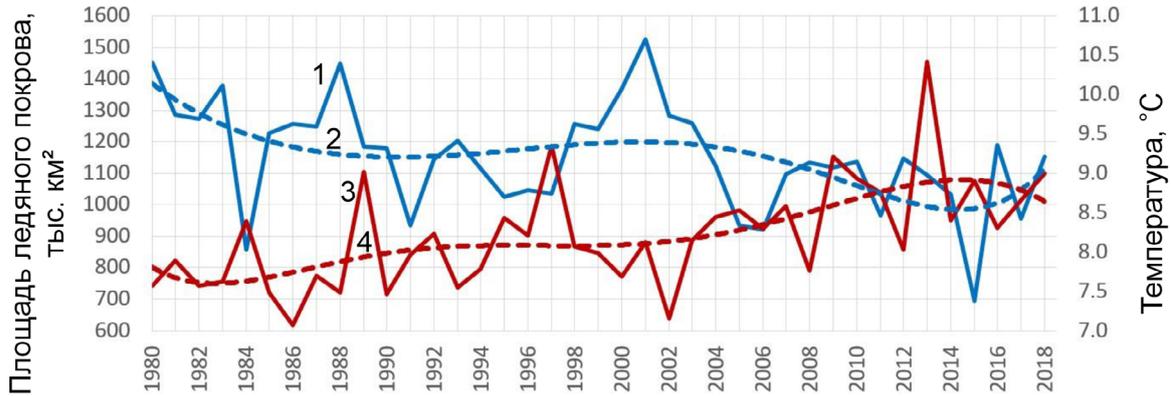
Показатель средней температуры поверхности воды в октябре и значения сезонного максимума площади ледяного покрова Охотского моря находятся в противофазе, что показывает аппроксимация рядов с помощью полиномиальных трендов [19] (рис. 2). Наличие взаимосвязи со средним уровнем корреляции говорит о возможности применения предиктора предсезонной температуры воды для разработки прогностической модели площади ледяного покрова Охотского моря, в том числе для его северо-восточного региона.

В качестве второго предиктора для оценки сезонного максимума площади ледяного покрова рассмотрены показатели температуры воздуха на прибрежных ГМС. Для этого были выбраны ряды данных температур воздуха пяти ГМС, располагающихся в исследуемом регионе в пунктах: Александровск-Сахалин-

**Таблица 1.** Коэффициенты корреляции между значениями сезонных максимумов площади ледяного покрова и средней температурой поверхности воды в октябре (1980–2018 гг.)

**Table 1.** Correlation coefficients between the values of seasonal maximum ice area and average water surface temperature in October (1980–2018)

Охотское море в целом	Северо-запад	Северо-восток	Юг	Координаты точек анализа данных температуры	
				N	E
–0.28	0.00	–0.22	–0.35	58°30'	144°00'
0.01	0.18	0.06	–0.14	55°30'	144°00'
–0.23	–0.01	–0.22	–0.27	51°45'	144°00'
–0.16	–0.02	–0.15	–0.19	58°30'	153°00'
–0.38	–0.25	–0.32	–0.42	55°30'	153°00'
–0.50	–0.24	–0.58	–0.38	51°45'	153°00'
–0.08	0.06	–0.05	–0.13	48°00'	144°00'
–0.13	0.04	–0.25	–0.01	45°00'	144°00'



**Рис. 2.** Связь параметров сезонного максимума площади ледяного покрова Охотского моря и средней температуры поверхности воды в октябре (1980–2018 гг.). 1 – сезонный максимум площади ледяного покрова, 2 – полиномиальный ряд для сезонного максимума площади ледяного покрова, 3 – средняя температура поверхности воды в точке 51°45' N и 153°00' E в октябре, 4 – полиномиальный ряд для средней температуры поверхности воды в октябре.

**Fig. 2.** Relationship of the parameters of seasonal maximum ice area in the Sea of Okhotsk and average water surface temperature in October (1980–2018). 1 – seasonal maximum ice area, 2 – polynomial series for seasonal maximum ice area, 3 – average water surface temperature at the point 51°45' N and 153°00' E in October, 4 – polynomial series for average water surface temperature in October.

ский, Магадан, Николаевск-на-Амуре, Поронайск и Охотск (гp5.ru) (табл. 2). Показатели сумм градусо-дней мороза за сезон для данных ГМС хорошо коррелируют с показателем среднесезонной площади ледяного покрова Охотского моря, что подтверждает взаимосвязь процессов ледообразования с количеством накопленного за сезон холода [3]. Значения среднесезонной площади ледяного покрова вычислялись как среднее за период с 5 декабря по 31 мая. Для рассматриваемого периода 1980–2018 гг. коэффициенты корреляции составляют  $-0.75$  для Александровск-Сахалинского,  $-0.72$  для Магадана и Николаевска-на-Амуре,  $-0.80$  для Поронайска (высокий уровень корреляции) и  $-0.69$  для Охотска (средний уровень корреляции). Коэффициенты корреляции являются значимыми и превосходят соответствующее критическое значение

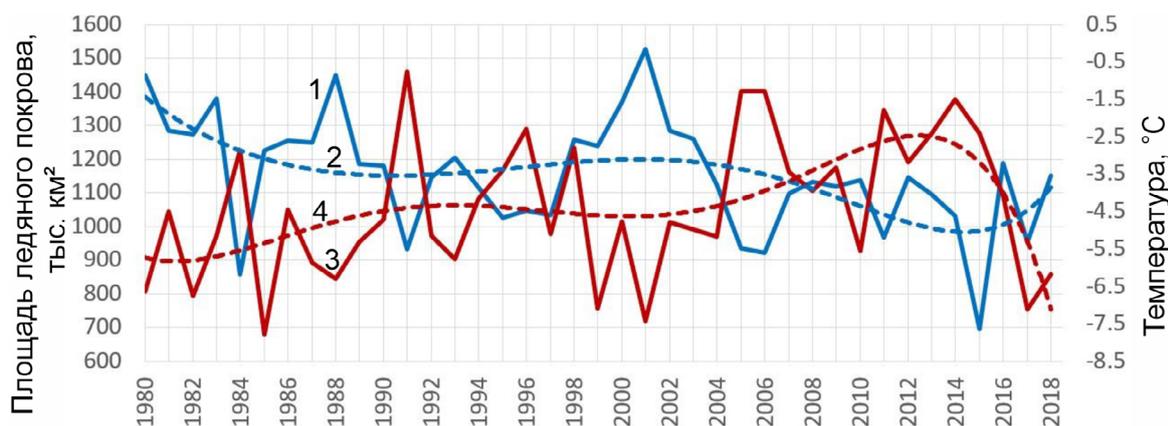
корреляции Пирсона  $0,22$  при уровне доверия  $95\%$  (для 39-летнего ряда) [19].

Анализ показал, что наибольший коэффициент корреляции ( $-0.65$ ) среднего значения температуры воздуха в ноябре с сезонным максимумом площади ледяного покрова Охотского моря соответствует ГМС Александровск-Сахалинский (табл. 2). Данные с ГМС Николаевск-на-Амуре и Поронайск также показывают высокие значения ( $-0.59$  и  $-0.58$  соответственно). Кроме того, большие значения с ГМС Александровск-Сахалинский получены для северо-восточного и южного регионов Охотского моря (табл. 2). Полученные коэффициенты соответствуют среднему уровню корреляции и являются значимыми, так как по модулю превосходят соответствующее критическое значение корреляции Пирсона  $0,22$  при уровне доверия  $95\%$  (для 39-летнего ряда) [19].

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции между значениями сезонных максимумов площади ледяного покрова и средней температурой воздуха по данным ГМС в ноябре (1980–2018 гг.)

**Table 2.** Correlation coefficients between the values of seasonal maximum ice area and average air temperature in November (1980–2018)

Александровск-Сахалинский	Магадан	Николаевск-на-Амуре	Поронайск	Охотск	Регион
$-0.65$	$-0.29$	$-0.59$	$-0.58$	$-0.30$	Охотское море
$-0.40$	$-0.03$	$-0.34$	$-0.36$	$-0.06$	Северо-запад
$-0.64$	$-0.35$	$-0.65$	$-0.56$	$-0.34$	Северо-восток
$-0.54$	$-0.21$	$-0.42$	$-0.49$	$-0.22$	Юг



**Рис. 3.** Связь параметров сезонного максимума площади ледяного покрова Охотского моря и средней температуры воздуха в ноябре (1980–2018 гг.). 1 – сезонный максимум площади ледяного покрова, 2 – полиномиальный ряд для сезонного максимума площади ледяного покрова, 3 – средняя температура воздуха в ноябре (ГМС Александровск-Сахалинский), 4 – полиномиальный ряд для средней температуры воздуха в ноябре.

**Fig. 3.** Relationship of the parameters of seasonal maximum ice area in the Sea of Okhotsk and average air temperature in November (1980–2018). 1 – seasonal maximum ice area, 2 – polynomial series for seasonal maximum ice area, 3 – average air temperature in November (Aleksandrovsk-Sakhalinsky hydrometeorological station), 4 – polynomial series for average air temperature in November.

На рис. 3 приведено сравнение показателей сезонного максимума ледовитости Охотского моря и средней температуры воздуха в ноябре и их полиномиальных трендов. Наличие взаимосвязи параметра средней температуры воздуха в ноябре с сезонным максимумом площади ледяного покрова позволяет использовать этот предиктор при прогнозировании внутрисезонного хода ледовитости Охотского моря.

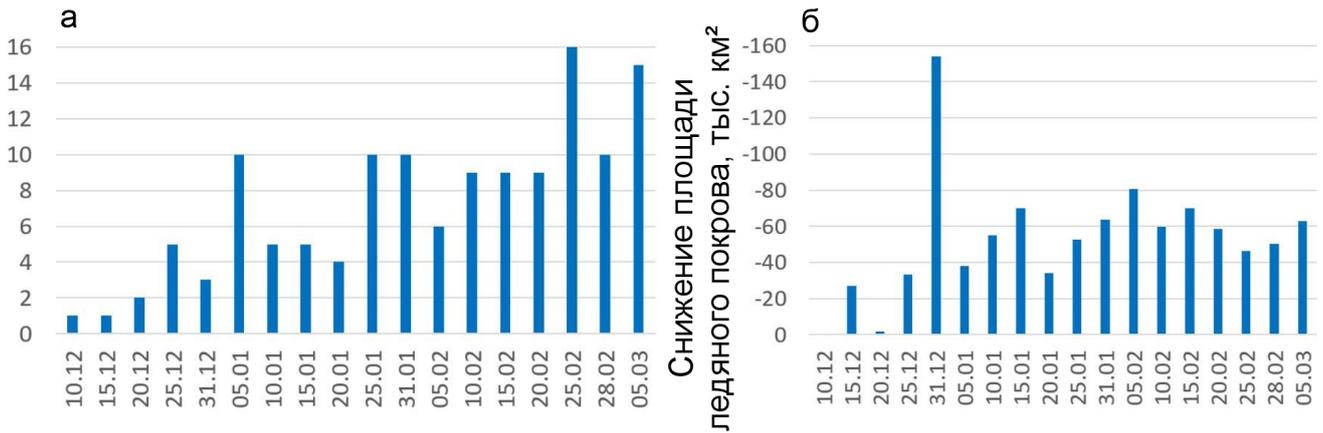
На ветровом и термическом режимах Охотского моря отражается воздействие циклонов, которые формируются в осенне-зимние сезоны в северо-западной части Тихого океана при взаимодействии двух центров действия атмосферы – алеутской депрессии и сибирского антициклона. При прохождении мощных циклонов через акваторию Охотского моря отмечается усиление южных ветров, которые способствуют ослаблению господствующего зимой северного переноса воздушных масс, что благоприятствует снижению ледовитости [22]. Внутрисезонные проявления циклонической деятельности в акватории Охотского моря и изменения направления ветра хорошо согласуются со сменами фаз Луны, обуславливающих формирование барических образований [21, 22].

Были проанализированы совпадения снижения площади ледяного покрова и наступления фаз сизигий в период 1980–2018 гг. При

учете наличия снижения площади ледяного покрова хотя бы в одном из регионов Охотского моря показатель количества совпадений составляет 60 %.

Циклоническое воздействие на ледяной покров проявляется не только в межгодовой, но и во внутрисезонной изменчивости [22]. Для выявления особенностей внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова в Охотском море были проанализированы пентадные данные колебаний значений данного показателя в осенне-зимний сезон за период 1980–2018 гг. (рис. 4). Как видно из диаграмм, в период с 10 по 25 декабря снижения площади ледяного покрова имеют самую низкую повторяемость (1–5 зафиксированных случаев на пентаду), а также небольшую среднюю величину (1–33 тыс. км<sup>2</sup>). В период с 31 декабря по 20 февраля наблюдается резкое повышение повторяемости (3–10 случаев) и увеличение среднего значения снижения площади льда (34–153 тыс. км<sup>2</sup>). В период с 25 февраля по 5 марта количество снижений площади ледяного покрова снова возрастает (10–16 случаев), а среднее значение снижений изменяется незначительно (43–63 тыс. км<sup>2</sup>) (рис. 4).

Внутрисезонный ход ледовитости Охотского моря в период ее осенне-зимнего нарастания хорошо описывается функцией распределения Ферми–Дирака (рис. 5) [23].



**Рис. 4.** Количество снижений (а) и среднее снижение (б) площади ледяного покрова Охотского моря в пентаду в период осенне-зимнего нарастания (1980–2018 гг.).

**Fig. 4.** The number of decreases (a) and average decrease (b) in ice area in the Sea of Okhotsk in the five-day period during the fall-winter growth (1980–2018).

На основе преобразованной функции распределения Ферми–Дирака и обнаруженных взаимосвязей было построено прогностическое уравнение внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова Охотского моря в период осенне-зимнего нарастания:

$$S(t) = \frac{S_R(T_a, T_w) + S_\beta(t) + \varepsilon}{e^{\frac{-t+b(t_m, S_m, t_a, S_a)}{c(t_m, S_m, t_a, S_a)} + 1}}, \quad (1)$$

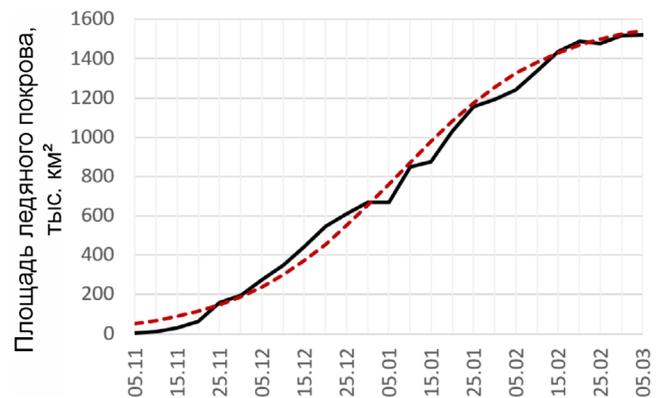
где  $S(t)$  – функция площади ледяного покрова на фазе ее осенне-зимнего нарастания от времени  $t$ ;  $S_R(T_a, T_w)$  – функция регрессии сезонного максимума площади ледяного покрова от температуры воздуха  $T_a$  в ноябре и температуре воды  $T_w$  в октябре;  $S_\beta(t)$  – функция снижения расчетного сезонного максимума площади ледяного покрова в результате воздействия циклонов в периоды сизигий Луны;  $\varepsilon$  – значение площади ледяного покрова на начало осенне-зимнего сезона (пентаду  $t_1$ );  $b(t_m, S_m, t_a$  и  $S_a)$  и  $c(t_m, S_m, t_a$  и  $S_a)$  – динамически изменяющиеся коэффициенты функции. Параметры  $S_a$ ,  $t_m$  и  $S_m$  корректируются в течение хода сезона с учетом постепенного снижения расчетного значения сезонного максимума площади ледяного покрова на значение функции  $S_\beta(t)$ .

Анализ корреляционной связи сезонных максимумов площади ледяного покрова с данными температуры воздуха и поверхности воды (табл. 1, 2) показал, что наиболее информативными являются данные средней температуры воздуха в ноябре на ГМС Алек-

сандровск-Сахалинский и средней температуры воды в октябре в точке  $51^\circ 45' N$  и  $153^\circ 00' E$ . Была произведена их нормализация (приведение к диапазону значений [1, 2]) и получено уравнение регрессии:

$$S_R(T_a, T_w) = \frac{S_R(T_a) + S_R(T_w)}{2} = \frac{k_1 T_a^{l_1} + k_2 T_w^{l_2}}{2}, \quad (2)$$

где  $S_R(T_a, T_w)$  – функция регрессии максимума площади ледяного покрова по температуре воздуха и поверхности воды;  $S_R(T_a)$  и  $S_R(T_w)$  – функции регрессии по отдельным параметрам температуры воздуха и поверхности воды;  $T_a$  – приведенная к диапазону значений [1, 2] средняя температура воздуха в ноябре на ГМС Александровск-Сахалинский;  $k_1$ ,  $l_1$  – коэффи-



**Рис. 5.** Площадь ледяного покрова в Охотском море в сезон 2000–2001 гг. (сплошная линия) и функция распределения Ферми–Дирака (штриховая).

**Fig. 5.** Ice area in the Sea of Okhotsk in 2000–2001 (solid line) and the Fermi–Dirac distribution function (dashed line).

циенты парной степенной регрессии на основе температуры воздуха;  $T_w$  – приведенная к диапазону значений [1, 2] средняя температура поверхности воды в октябре в точке 51°45' N и 153°00' E;  $k_2, l_2$  – коэффициенты парной степенной регрессии на основе температуры поверхности воды.

На рис. 6 представлен фактический ряд сезонных максимумов ледовитости и ряд, полученный на основе функции регрессии  $S_R(T_a, T_w)$ . Коэффициент корреляции между фактическим и вычисленным с помощью функции регрессии рядами составил 0.74. Коэффициент является значимым с высоким уровнем корреляции, так как по модулю превосходит соответствующее критическое значение корреляции Пирсона 0,22 при уровне значимости 95 % (для 39-летнего ряда). Средняя относительная ошибка составила 8 %.

Для корректировки прогностической кривой в периоды наступления сизигий в уравнение прогноза площади ледяного покрова был введен дополнительный параметр – функция  $S_\beta(t)$ , отражающий снижение прогнозного максимума площади ледяного покрова с течением времени:

$$S_\beta(t) = H_\beta * \left( 1 - \sum_{i=1}^t P(\beta_i) \right), \quad (3)$$

где  $S_\beta(t)$  – функция снижения прогнозного мак-

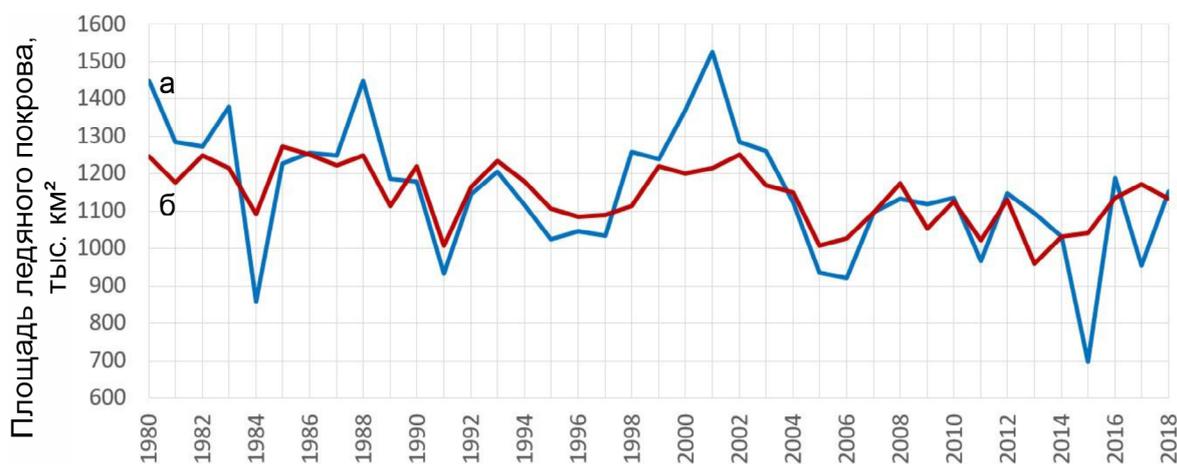
симула площади ледяного покрова в результате циклонов,  $H_\beta$  – величина снижения площади ледяного покрова в прогнозируемый сезон, полученная на основе аппроксимации методом оконного сглаживания многолетнего ряда снижений площади ледяного покрова в период осенне-зимнего нарастания,  $P(\beta_i)$  – функция вероятности снижения площади ледяного покрова  $\beta_i$  в пентаду  $i$ .

Для учета вероятности резких снижений площади ледяного покрова под влиянием циклонической деятельности в периоды сизигий Луны была получена функция  $P(\beta_i)$  следующего вида:

$$P(\beta_i) = \frac{\beta_i \text{Syz}(i)}{\sum_{j=1}^{t_a} (\beta_j \text{Syz}(j))}, \quad (4)$$

где  $P(\beta_i)$  – функция вероятности снижения площади льда в пентаду от среднего количественного снижения площади льда  $\beta_i$  в пентаду  $i$ ,  $\text{Syz}(i)$  и  $\text{Syz}(j)$  – функция сизигий Луны, принимающая значение 1 в периоды новолуний и полнолуний и 0 в остальных случаях,  $t_a$  – пентада наступления сезонного максимума площади ледяного покрова. При составлении формул (3) и (4) использовались стандартные формулы теории вероятностей [19].

На основе описанных подходов и математических функций была разработана программа, включающая в себя программные модули



**Рис. 6.** Сопоставление (а) фактического ряда сезонных максимумов площади ледяного покрова Охотского моря и (б) ряда регрессии  $S_R(T_a, T_w)$  на основе параметров средней температуры воздуха в октябре на ГМС Александровск-Сахалинский и средней температуры поверхности воды в октябре в точке 51°45' N и 153°00' E (1980–2018 гг.).

**Fig. 6.** Comparison (a) of the actual series of seasonal maximum ice area in the Sea of Okhotsk and (b) the regression series  $S_R(T_a, T_w)$  based on the parameters of average air temperature in October at the Aleksandrovsk-Sakhalinsky hydrometeorological station and average water surface temperature in October at the point 51°30' N and 153°00' E (1980–2018).

экспериментальной модели внутрисезонной ледовитости, позволяющие вычислять прогнозные значения площади ледяного покрова Охотского моря в осенне-зимний сезон с заблаговременностью до 4 мес. Прогностическая программа состоит из отдельных взаимосвязанных программных модулей, блок-схема которых представлена на рис. 7. Главным компонентом, включающим алгоритмы обработки, является основной модуль модели. Запуск модулей обработки происходит через командный скрипт, написанный на языке командной оболочки ОС (batch script для ОС семейства Windows; bash для дистрибутивов ОС Linux). Командный скрипт производит запуск модулей обработки через встроенный интерпретатор Python. вспомогательные модули используются в режиме разработчика (для публикации новых версий проекта и других рабочих задач).

Пакет с классами и методами обработки данных включает в себя функционал для обработки данных в виде субпакетов, реализующих: работу с файловой системой и файлами расширений .xlsx, .csv, .xml; функции для анализа и обработки рядов данных (в том числе аппроксимации, экстраполяции, нормализации, регрессии, сглаживания); дополнительные утилиты для работы с данными разных типов. Файлы настроек представляют собой xml-файлы с настройками для инициализации модели. Дополнительные файлы настроек для осуществления расчетов на произвольно заданных периодах могут опционально добавляться пользователем.

В качестве входных данных модели используются файлы: многолетнего ряда средней

температуры воздуха в ноябре, многолетнего ряда средней температуры поверхности воды в октябре, ряды внутрисезонной площади ледяного покрова, значения внутрисезонной динамики фаз Луны (периоды наступления сизигий). Исходные файлы включают фактические данные для обучения модели, а также опционально могут содержать реальные данные прогнозируемых сезонов для вычисления ошибок прогноза. Структура исходных данных представляет собой таблицы .xlsx или .csv формата.

Прогностическая модель внутрисезонной изменчивости ледовитости была применена для ретроспективного прогнозирования площади ледяного покрова в период осенне-зимнего нарастания для ряда наблюдений 2001–2020 гг. На рис. 8 представлены примеры графиков прогностических кривых площади ледяного покрова, полученных с помощью разработанной модели, и их сравнение с фактической площадью ледяного покрова в соответствующие сезоны. Минимальный прогноз на дату рассчитывается путем вычитания из значения площади ледяного покрова для оптимального прогноза значения средней абсолютной ошибки (на рассматриваемую дату), максимальный – соответственно путем прибавления средней абсолютной ошибки (на рассматриваемую дату). Для получения прогноза были использованы данные начиная с 1980 г., т.е. для обучения модели при построении прогноза на сезон 2000–2001 гг. использовались данные за период 1980–2000 гг., для сезона 2001–2002 гг. – данные за период 1980–2001 гг. и т.д. по аналогии до сезона 2019–2020 гг. Для построения прогноза на сезоны 2018–2019, 2019–2020 гг. были привлечены данные темпе-

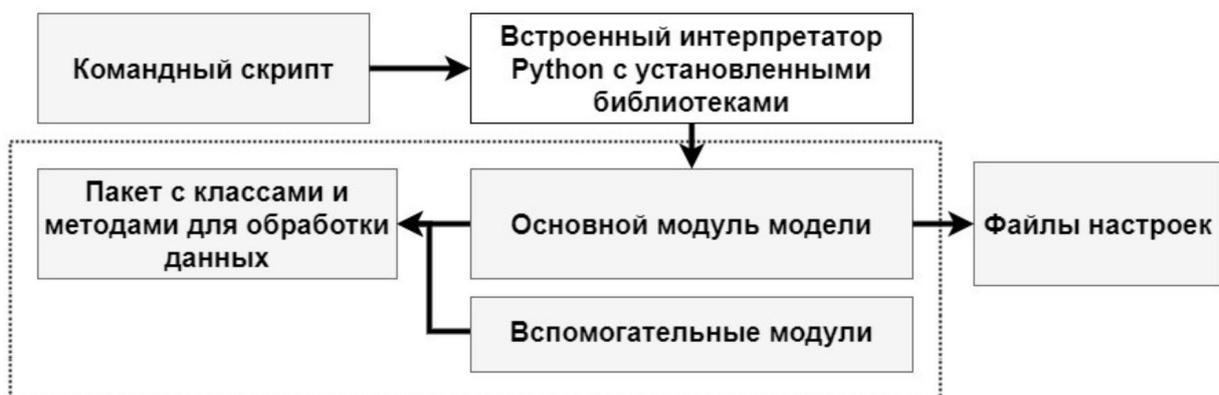


Рис. 7. Схема пакета программных модулей модели прогноза внутрисезонной изменчивости ледовитости Охотского моря.

Fig. 7. Diagram of the software package of the predictive model of intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk.

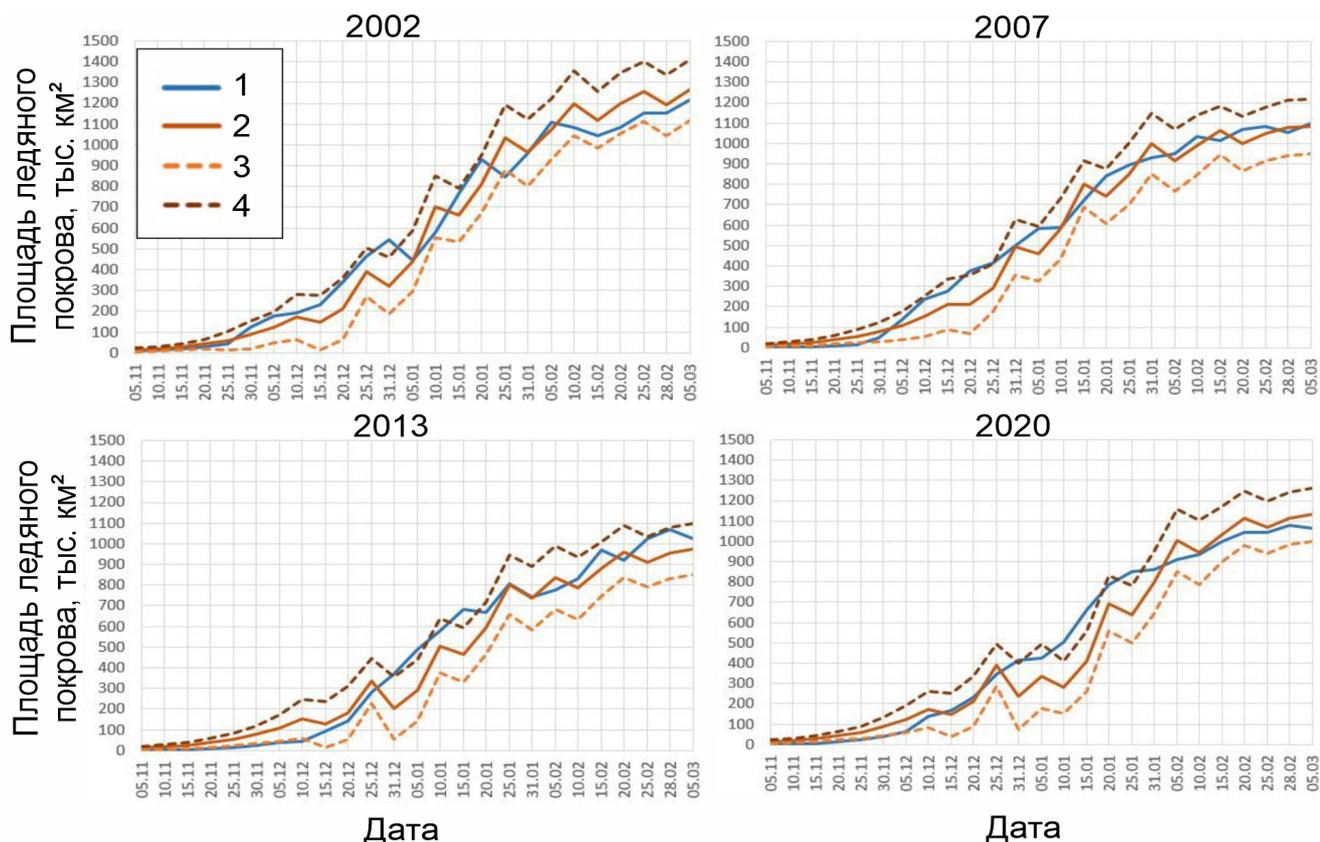


Рис. 8. Примеры прогноза и сравнение с фактической площадью ледяного покрова в соответствующие сезоны. 1 – фактическая площадь ледяного покрова, 2 – оптимальный прогноз, 3 – минимальный прогноз, 4 – максимальный прогноз.

Fig. 8. Examples of prediction and comparison with actual ice area in the corresponding seasons. 1 – actual ice area, 2 – optimal prediction, 3 – minimal prediction, 4 – maximal prediction.

ратуры воды, полученные с помощью модели ERA5, которая является идейным продолжением модели ERA-Interim ([www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)).

## Обсуждение

При анализе результатов установлено, что наибольшая точность прогноза площади ледяного покрова в период осенне-зимнего нарастания достигается при прогнозировании умеренных, а также мягких зим по сложности ледовых условий. Средняя относительная ошибка прогностических значений площади ледяного покрова по сравнению с фактическими при применении модели на периоде 2001–2020 гг. составила 6,6 %.

Прогнозная кривая имеет наибольшие отклонения от графика фактической площади ледяного покрова в суровые и экстремально мягкие зимы, когда в течение продолжительного времени устойчиво наблюдается большая или малая ледовитость моря. Большие отклонения значений связаны с особенностями

влияния природных факторов на скорость роста ледяного покрова в период осенне-зимнего нарастания. Под влиянием циклонической деятельности наблюдаются резкие уменьшения ледовитости, которые вызывается сплочением, сжатием, наслоением и торошением морских льдов.

Показатель оправдываемости прогноза на дату в период максимального развития и наступления сезонного максимума (15 февраля – 5 марта) для умеренных и мягких зим составил 79 %. Для периода осенне-зимнего нарастания с 25 ноября по 10 февраля оправдываемость варьирует от 43 до 71 %.

## Заключение

С применением методов аппроксимации рядов, типизации зим по сложности ледовых условий, статистического и корреляционного анализа выявлены и проанализированы взаимосвязи площади ледяного покрова Охотского моря с гидрометеорологическими и астрономи-

ческими параметрами. На основе полученных результатов разработан физико-статистический метод долгосрочного прогноза ледовитости Охотского моря в осенне-зимний сезон с заблаговременностью до 4 мес., реализованный в виде экспериментальной программы. Разработанный метод в перспективе может применяться для осуществления прогноза ледовых условий на текущий сезон и его учета при построении безопасных судоходных маршрутов, а также при планировании работ на шельфе Охотского моря.

1. Выявлена взаимосвязь между средней температурой поверхности воды в точке 51°45' 153°00' E в октябре и площадью ледяного покрова Охотского моря в сезонный максимум со средним уровнем корреляции для всей акватории в целом (–0.50) и его северо-восточного региона (–0.58).

2. Выявлена взаимосвязь между приземной температурой воздуха на ГМС Александровск-Сахалинский и площадью ледяного покрова Охотского моря в сезонный максимум со средним уровнем корреляции (–0.65).

3. На основе взаимосвязи значения сезонного максимума площади ледяного покрова Охотского моря с показателями температуры воздуха и поверхности воды построена регрессионная функция со средней относительной ошибкой 8 %.

4. Обнаружена взаимосвязь резкого снижения площади ледяного покрова Охотского моря (до 9.5 % от общей площади акватории) и циклонической деятельности, обусловленной сменой фаз Луны.

5. Испытания метода долгосрочного прогноза площади ледяного покрова Охотского моря показали хорошие результаты по оправдываемости. Так, средняя относительная ошибка прогностических вычисленных значений за период 2001–2020 гг. составила 6.6 %. Оправдываемость прогноза на дату в период максимального развития ледовитости и наступления сезонного максимума (15 февраля – 5 марта) для умеренных и мягких зим составила 79 %.

## Список литературы

1. *Атлас опасных и особо опасных для мореплавания и рыболовства гидрометеорологических явлений: Охотское, Японское и Берингово моря.* 1980. Л.: ГУНИО МО, 251 с.

- Плотников В.В., Якунин Л.П., Петров А.Г. 1998. Ледовые условия и методы их прогнозирования. В кн.: *Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей.* Т. 9: *Охотское море*, вып. 1: *Гидрометеорологические условия.* СПб.: Гидрометеопиздат, с. 291–340.
- Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. 2016. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. *Известия ТИНРО*, 185: 228–239. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-228-239>
- Крындин А.Н. 1964. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции. *Труды ГОИН*, 71: 5–80.
- Плотников В.В. 2002. *Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз.* Владивосток: Дальнаука, 171 с.
- Пищальник В.М., Иванов В.В., Трусков П.А. 2011. Прогноз вариаций площади ледяного покрова Охотского моря методом последовательных спектров. *Известия ТИНРО*, 165: 158–172. EDN: OEUVNR
- Белинский Н.Н. 1965. *Морские гидрометеорологические прогнозы.* Л.: Гидрометеопиздат, 254 с.
- Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. 1974. *Морские гидрологические прогнозы.* Л.: Гидрометеопиздат, 310 с.
- Крындин А.Н. 1966. Роль температурного поля океана в формировании аномалий атмосферной циркуляции и аномалий суровости зим на морях на примере северо-западной части Тихого океана. *Труды НИИАК*, 36: 37–45.
- Алдошина Е.И. 1964. О возможности предсказания положения кромки льда в Охотском море и Татарском проливе в весенние месяцы. *Труды ГОИН*, 76: 104–127.
- Плотников В.В. 1982. Прогноз полей ледовых элементов в Охотском море физико-статистическим методом. *Труды ДВНИГМИ*, 96: 77–86.
- Петров А.Г. 1984. Численное моделирование осенне-зимних гидрологических процессов на Охотском море. В кн.: *Тез. докл. Всесоюз. совещ. «Ледовые прогнозы и расчеты».* Ленинград, с. 53–59.
- Фролов И.Е., Петров А.Г. 1980. Численная модель осенне-зимних ледовых явлений. *Труды ДВНИГМИ*, 91: 3–12.
- Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023688937. *“Ice Data Processing”.* 2023. Авт.: Шумилов И.В., Романюк В.А., Пищальник В.М. № 2023682641 от 30.10.2023; опубл. 25.12.2023.
- Pishchalnik V.M., Tambovsky V.S., Truskov P.A., Minervin I.G., Melkiy V.A., Romanyuk V.A., Galtsev A.A. 2013. Okhotsk Sea ice cover zoning. In: *Proceedings of the 28th International Symposium on*

- Okhotsk Sea & sea ice. 17–21 February, Mombetsu, Hokkaido, Japan*, p. 312–315.
16. Минервин И.Г., Романюк В.А., Пищальник В.М., Трусков П.А., Покрашенко С.А. **2015**. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей. *Вестник РАН*, 85(1): 24–32.
  17. Романюк В.А. **2019**. *Ледовый режим Охотского моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха*: дис. ... канд. геогр. наук. ТОИ ДВО РАН, Владивосток, – 125 с.
  18. Fukamachi Y., Mizuta G., Ohshima K.I., Toyota T., Kimura N., Wakatsuchi M. **2006**. Sea ice thickness in the southwestern Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C9). <https://doi.org/10.1029/2005jc003327>
  19. Андерсон Т. **1976**. *Статистический анализ временных рядов*. М.: Мир, 744 с.
  20. Глебова С.Ю. **2018**. Циклоны над Тихим океаном и дальневосточными морями в холодные и теплые сезоны и их влияние на ветровой и термический режим в последний двадцатилетний период. *Известия ТИНРО*, 193(2): 153–166. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-153-166>
  21. Тимофеев С.Д. **1968**. Влияние на атмосферу приливных сил Луны. *Труды ГГО*, 227: 62–70.
  22. Шумилов И.В., Минервин И.Г. **2021**. Разработка прогностического правила вариаций ледовитости на фазе начала ледообразования в Охотском море. В кн.: *Прогнозирование ледовой обстановки на дальневосточном участке продолжения Северного морского пути с применением ГИС-технологий в современный период потепления (г. Южно-Сахалинск, 29 ноября 2019 года)*: сб. докл. круглого стола. Сост. И.В. Никулина. Южно-Сахалинск: СахГУ, с. 49–56.
  23. Маргинсон Л.К., Смирнов Е.В. **2004**. *Квантовая физика*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 496 с. (Физика в техническом университете).
- References**
1. [*Atlas of dangerous and especially dangerous for navigation and fisheries hydrometeorological phenomena: the Sea of Okhotsk, the Sea of Japan and the Bering Sea*]. **1980**. Leningrad: GUNIO MO, 251 p. (In Russ.).
  2. Plotnikov V.V., Yakunin L.P., Petrov A.G. **1998**. [Ice conditions and methods of forecasting them]. In: [*The Seas Project. Marine hydrometeorology and hydrochemistry*. Vol. 9: *Sea of Okhotsk*, Iss. 1: *Hydrometeorological conditions*]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, p. 291–340. (In Russ.).
  3. Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batukhtina A.S. **2016**. [*Analysis of the dynamics of ice cover anomalies in the Sea of Okhotsk in the period from 1882 to 2015*]. *Izvestia TINRO*, 185: 228–239. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-228-239>
  4. Kryndin A.N. **1964**. [Seasonal and interannual changes in ice cover and ice edge position in the Far Eastern seas due to the peculiarities of atmospheric circulation]. *Trudy GOIN*, 71: 5–80. (In Russ.).
  5. Plotnikov V.V. **2002**. [*Variability of ice conditions in the Russian Far Eastern seas and their forecast*]. Vladivostok: Dalnauka, 171 p. (In Russ.).
  6. Pishchalnik V.M., Ivanov V.V., Truskov P.A. **2011**. [*Forecasting the ice cover variation in the Okhotsk Sea by the method of sequential spectra*]. *Izvestia TINRO*, 165: 158–172. (In Russ.). EDN: OEUVNR
  7. Belinsky N.N. **1965**. [*Marine hydrometeorological forecasts*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 254 p. (In Russ.).
  8. Kudryavaya K.I., Seryakov E.I., Skriptunova L.I. **1974**. [*Marine hydrological forecasts*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 310 p. (In Russ.).
  9. Kryndin A.N. **1966**. [The role of the ocean temperature field in the formation of atmospheric circulation anomalies and anomalies of winter severity in the seas based on the northwestern part of the Pacific Ocean]. *Proceedings of NIIAK*, 36: 37–45. (In Russ.).
  10. Aldoshina E.I. **1964**. [On the possibility of predicting the ice edge position in the Sea of Okhotsk and the Tatar Strait in the spring months]. *Trudy GOIN*, 76: 104–127. (In Russ.).
  11. Plotnikov V.V. **1982**. [Forecast of ice element fields in the Sea of Okhotsk using a physical-statistical method]. *Trudy DVNIGMI*, 96: 77–86. (In Russ.).
  12. Petrov A.G. **1984**. [Numerical modeling of fall-winter hydrological processes in the Sea of Okhotsk]. In: *Abstracts of reports of the All-Union Council “Ice forecasts and calculations”*. Leningrad, p. 53–59. (In Russ.).
  13. Frolov I.E., Petrov A.G. **1980**. Numerical model of autumn-winter ice phenomena. *Trudy DVNIGMI*, 91: 3–12. (In Russ.).
  14. [Computer program registration certificate] No. 2023688937. “Ice Data Processing”. **2023**. Authors: Shumilov I.V., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M. No. 2023682641 from 30.10.2023; publ. 25.12.2023. (In Russ.).
  15. Pishchalnik V.M., Tambovsky V.S., Truskov P.A., Minervin I.G., Melkiy V.A., Romanyuk V.A., Galtsev A.A. **2013**. Okhotsk Sea ice cover zoning. In: *Proceedings of the 28th International Symposium on Okhotsk Sea & sea ice. 17–21 February, Mombetsu, Hokkaido, Japan*, p. 312–315.
  16. Minervin I.G., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M., Truskov P.A., Pokrashenko S.A. **2015**. Zoning the ice cover of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan. *Her-*

- ald of the Russian Academy of Sciences, 85: 132–139. <https://doi.org/10.1134/s1019331615010049>
17. Romanyuk V.A. **2019**. [*Ice regime of the Sea of Okhotsk in the context of the global trend of increasing air temperature*]: Diss. of Cand. Sci. (Geography). TOI FEB RAS, Vladivostok, 125 p. (In Russ.).
  18. Fukamachi Y., Mizuta G., Ohshima K.I., Toyota T., Kimura N., Wakatsuchi M. **2006**. Sea ice thickness in the southwestern Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C9). <https://doi.org/10.1029/2005jc003327>
  19. Anderson T. **1976**. [*The statistical analysis of time series*]. Moscow: Mir, 744 p. (In Russ.). From Engl.: Anderson T. **1971**. *The statistical analysis of time series*. John Wiley & Sons, Inc. (Wiley Series in Probability and Statistics).
  20. Glebova S.Yu. **2018**. Cyclones over the Pacific Ocean and Far Eastern seas in cold and warm seasons and their influence on wind and thermal regime in the last twenty-year period. *Izvestiya TINRO*, 193(2): 153–166. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-153-166>
  21. Timofeev S.D. **1968**. [The influence of lunar tidal forces on the atmosphere]. *Trudy GGO*, 227: 62–70. (In Russ.).
  22. Shumilov I.V., Minervin I.G. **2021**. [Development of a predictive rule for ice cover variations at the beginning of ice formation in the Sea of Okhotsk]. In: *Forecasting ice conditions in the Far Eastern section of the Northern Sea Route extension using GIS technologies in the modern warming period (Yuzhno-Sakhalinsk, November 29, 2019)*: collection of round table reports. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhSU, p. 49–56. (In Russ.). Development of a predictive rule for ice cover variations during the beginning of ice formation in the Sea of Okhotsk
  23. Martinson L.K., Smirnov E.V. **2004**. *Quantum physics*. Moscow: Publ. House of N.E. Bauman MSTU, 496 p. (Physics at a technical university). (In Russ.).

## Об авторах

**Шумилов Илья Валерьевич** (<https://orcid.org/0009-0003-6713-779X>), младший научный сотрудник, Сахалинский климатический центр Сахалинского государственного университета; младший научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Южно-Сахалинск, Россия, [ilyarolevik1@yandex.ru](mailto:ilyarolevik1@yandex.ru)

**Минервин Игорь Георгиевич** (<https://orcid.org/0000-0002-5016-4199>), кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроэнергетики и физики Института естественных наук и техносферной безопасности, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия, [igor@minervin.ru](mailto:igor@minervin.ru)

**Пищальник Владимир Михайлович** (<https://orcid.org/0000-0003-1432-6741>), доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли (ЮСНИС) СахГУ и РАН, Сахалинский государственный университет; ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Южно-Сахалинск, Россия, [vpishchalnik@rambler.ru](mailto:vpishchalnik@rambler.ru)

**Романюк Валерий Анатольевич** (<https://orcid.org/0000-0002-9993-7965>), кандидат географических наук, доцент кафедры геологии и нефтегазового дела Технического нефтегазового института, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия, [varomanyuk2020@gmail.com](mailto:varomanyuk2020@gmail.com)

## About the Authors

**Shumilov, Ilya V.** (<https://orcid.org/0009-0003-6713-779X>), Junior Researcher, Sakhalin climate center of the Sakhalin State University; Junior Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [ilyarolevik1@yandex.ru](mailto:ilyarolevik1@yandex.ru)

**Minervin, Igor G.** (<https://orcid.org/0000-0002-5016-4199>), Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor at the Department of electrical power engineering and physics, Institute of Natural Sciences and Technosphere Safety, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [igor@minervin.ru](mailto:igor@minervin.ru)

**Pishchalnik, Vladimir M.** (<https://orcid.org/0000-0003-1432-6741>), Doctor of Engineering, Professor, Principal Researcher of the Scientific research laboratory for remote sensing of the Earth of Sakhalin State University and Russian Academy of Sciences, Sakhalin State University; Leading Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [vpishchalnik@rambler.ru](mailto:vpishchalnik@rambler.ru)

**Romanyuk, Valery A.** (<https://orcid.org/0000-0002-9993-7965>), Cand. of Sci. (Geography), Associate Professor at the Department of geology and oil and gas engineering, Technical Oil and Gas Institute, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [varomanyuk2020@gmail.com](mailto:varomanyuk2020@gmail.com)

Поступила 23.01.2024

Принята к публикации 20.05.2024

Received 23 January 2024

Accepted 20 May 2024