

УДК 551.467
DOI 10.17513/use.38416

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА НА БЕЛОМ МОРЕ В РАЙОНЕ СОЛОВЕЦКИХ ОСТРОВОВ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Баклагин В.Н., Махальская Н.И., Лукина Ю.Н.

*Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение
ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр
Российской академии наук», Петрозаводск, e-mail: slava.baklagin@mail.ru*

Целью работы является получение статистических характеристик и закономерностей многолетней изменчивости формирования ледяного покрова в районе Соловецких островов путем анализа данных натурных гидрологических наблюдений за последние 40 лет (1980-2019 гг.). В качестве данных натурных наблюдений для формирования рядов основных элементов ледового режима моря (сроков наступления характерных фаз ледовых явлений и их продолжительности) в работе использованы данные регулярного гидрометеорологического государственного мониторинга с пунктов наблюдений на морских гидрометеорологических станциях 2-го разряда МГ-2 Соловки и МГ-2 Кемь-Порт, осуществляемого организациями Росгидромета на акватории Белого моря. Регрессионный анализ динамики дат устойчивого льдообразования в районе о. Соловки показал, что сроки начала льдообразования на 27 дней (почти на 4 недели) сдвинулись в сторону зимних месяцев. Сдвиг происходил со средней скоростью 6,2 дня/10 лет. А продолжительность ледового периода сократилась на 33 дней (на месяц). Уменьшение количества дней происходило со скоростью 8,4 дня/10 лет. Полученные данные о сдвигах сроков начала устойчивого льдообразования и дат очищения ото льда в сторону зимних месяцев, а также динамика по уменьшению продолжительности ледовых явлений должны быть учтены при составлении методологических материалов для осуществления гидропрогнозирования.

Ключевые слова: Соловецкие острова, Онежский залив, Белое море, ледовый режим, натурные данные

LONG-TERM VARIABILITY OF ICE CONCENTRATION IN THE SOLOVETSKY ISLANDS AREA BASED ON SITU DATA

Baklagin V.N., Makhalskaya N.I., Lukina Yu.N.

*Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre
of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, e-mail: slava.baklagin@mail.ru*

The purpose of the work is to obtain statistical characteristics and patterns of long-term variability of ice cover formation in the Solovetsky Islands area by analyzing in-situ hydrological observations over the past 40 years (1980-2019). The data of regular hydrometeorological state monitoring from observation points at the 2nd category marine hydrometeorological stations MG-2 Solovki and MG-2 Kem-Port, carried out by Roshydromet organizations in the White Sea, were used as in-situ observation data for forming series of the main elements of the sea ice regime (the timing of the onset of characteristic phases of ice phenomena and their duration). Regression analysis of dynamic of the dates of stable ice formation in the Solovki Island area showed that the onset dates of ice formation shifted towards the winter months by 27 days (4 weeks). The shift occurred at an average rate of 6.2 days/10 years. In addition, the duration of the ice period decreased by 33 days (by a month). The decrease in the number of days occurred at a rate of 8.4 days/10 years. The obtained data on the shifts in the dates of the onset of stable ice formation and the dates of ice clearance towards the winter months, as well as the dynamics of the decrease in the duration of ice phenomena, should be taken into account when compiling methodological materials for the implementation of hydroforecasting.

Keywords: Solovetsky Islands, Onega Bay, White Sea, ice regime, in situ data

Введение

Белое море является одним из важнейших объектов с точки зрения физических, климатических и экологических исследований. Оно относится к морям Северного Ледовитого океана, принадлежит к внутренним морям России. Море сообщается с Северным Ледовитым океаном через Баренцево море. Площадь Белого моря составляет около 90 000 км², а с площадью всех островов, расположенных на его акватории, 90 800 км². Максимальная глубина в море достигает 343 м, средняя глубина – 67 м,

объем воды – 6000 км³, протяженность береговой линии – 5093 км [1, с. 78]. Белое море разделено на три части (северную, среднюю и южную) и пять районов. К глубоководной части моря относятся 3 района: Бассейн, Кандалакшский залив (за исключением его вершины), а также Двинский залив. К мелководной части – Онежский и Мезенский заливы, пролив Воронка [1, с. 80].

Самой мелководной частью является Онежский залив. Он разделен с центральной частью акватории Соловецкими островами. Глубины в этом заливе составляют от 5 до 25 м [1, с. 80].

В течение зимнего периода большая часть площади акватории Белого моря является свободной ото льда [2; 3]. Устойчивое замерзание акватории ежегодно происходит в самом мелководном Онежском заливе и в 88% случаев из 100 в вершине Кандалакшского залива. Акватория самого мелководного Онежского залива ежегодно покрывается ледяным панцирем в среднем к середине декабря, в отдельные годы (1987, 1998, 2016) – в середине ноября [2].

Ледовый режим акватории Белого моря в районе Соловецких островов (Онежский залив) весьма своеобразен. Большая часть поверхности моря в этом районе в зимний период остается свободной ото льда. Полоса ледового припая шириной до 6 км, как правило, образуется лишь вокруг островов и вдоль материковой зоны. Даже в самые суровые зимы здесь на большей части акватории остаются открытые пространства воды с плавающими льдами.

Формирование устойчивого ледяного покрова в акватории Онежского залива в районе Соловецких островов начинается, как правило, в конце ноября – начале декабря, освобождение ото льда происходит к концу мая [2].

Наибольшая сплочённость льда в районе Онежского залива достигается с января по март. В апреле в результате ветровых явлений ледяной покров начинает разрушаться и частично выносятся в открытую часть Белого моря. В мае и начале июня остатки льда подвергаются таянию, а затем лёд полностью разрушается [4].

Ледяной покров в районе Соловецких островов представлен дрейфующим торосистым льдом. Он образует на отмелях и банках стамухи и ропаки. Припай (неподвижный лёд) образуется только у берегов, в заливах и бухтах. Толщина плавучего льда – около 35-40 см, в суровые зимы может достигать 1,5 м. В настоящее время территория Соловецкого архипелага является заповедником: начиная с 1992 года Соловецкие острова включены в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, а в 1995 г. отнесены к особо ценным объектам природного и исторического наследия России [5]. Кроме того, это место активно используется для организации туристического отдыха [6, с. 45; 7, с. 10; 8, с. 121].

Продолжительность туристического сезона на Соловках ограничена [9], составляет всего четыре месяца. Поскольку острова расположены на акватории Белого моря, временной отрезок для посещения

Соловецкого архипелага туристами увязан с началом и окончанием навигационного периода, планирование которого напрямую зависит от ледовой обстановки в районе островов, как и для других частей акватории моря и других водоемов [3; 10]. Поэтому информация и актуальные сведения о ледовой обстановке в районе Соловецких островов имеют большое практическое значения для планирования туристического сезона.

Следует отметить, что последние исследования, посвященные оценке изменчивости характеристик ледового режима, показали существенные изменения в формировании ледяного покрова на Белом море в последние десятилетия, что, в свою очередь, не могло не отразиться и на сроках и продолжительности навигационного периода [2]. Однако это исследование базировалось на данных спутниковых наблюдений, которые не всегда корректно и достоверно могут классифицировать ячейки льда и воды, особенно с использованием микроволнового диапазона, который необходим для формирования регулярных рядов данных [11-13]. Например, применяемые алгоритмы дешифрирования не всегда точно описывают ледовую ситуацию, когда в период таяния на льду появляется вода, что вносит погрешности в расчеты [14]. Альтернативой спутниковым данным являются данные натурных наблюдений, которые хоть и не охватывают всю акваторию моря, но имеют неоспоримые преимущества в достоверности полученных сведений. Однако следует отметить, что рассматриваемый в работе участок акватории Белого моря в районе Соловецких островов не обладает большой площадью, а значит для его исследования вполне целесообразно применять именно данные натурных наблюдений.

Таким образом, **целью исследования** является получение статистических характеристик и закономерностей многолетней изменчивости формирования ледяного покрова в районе Соловецких островов путем анализа данных натурных гидрологических наблюдений за последние 40 лет (1980-2019 гг.).

Материалы и методы исследования

В качестве данных натурных наблюдений для формирования рядов основных элементов ледового режима моря (сроков наступления характерных фаз ледовых явлений и их продолжительности) в работе использованы данные регулярного гидрометеорологического государственного мониторинга с пунктов морских наблюдений,

осуществляемого организациями Росгидромета на акватории Белого моря за период с 1980 по 2019 г. На основании этих данных сформированы временные ряды дат устойчивого льдообразования, окончательного замерзания и полного очищения ото льда. За дату начала устойчивого льдообразования принимался день, начиная с которого льдообразование происходило непрерывно в течение не менее 30 дней, за исключением перерывов, связанных с оттепелью – 2 дня и ветровыми явлениями – 3 дня. За дату окончательного замерзания принимался день, когда вся акватория покрывалась припаем, который в дальнейшем фиксировался не менее 30 дней. За дату окончательного очищения ото льда принимался день, когда объект впервые становился абсолютно безлёдным на срок не менее 30 дней [15, с. 12].

В работе использованы данные результатов гидрометеорологических наблюдений на морских гидрометеорологических станциях 2-го разряда МГ-2 Соловки

и МГ-2 Кемь-Порт, относящихся к зоне деятельности Росгидромета (табл. 1, рис. 1).

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно обработке данных натурных наблюдений, на МГ-2 Соловки за 1980-2019 гг. устойчивое формирование ледяного покрова на Белом море в районе Соловецких островов начинается преимущественно в начале декабря (средняя дата – 02.12) (табл. 2). По данным натурных наблюдений, самая ранняя дата появления льда зафиксирована в начале ноября (06.11) в зимний сезон 1997-1998 гг., в условиях устойчивого похолодания. Переход среднесуточной температуры воздуха через 0 °C в сторону отрицательных значений в 1997 г. произошел 21 октября, в достаточно ранние сроки, кратковременные возвраты тепла были кратковременными и не оказали существенного влияния на формирование структуры и сплоченности льда.



Рис. 1. Схема расположения Соловецких островов на Белом море и пунктов гидрометеорологических наблюдений Росгидромета
Примечание: составлено авторами на основе данных Росгидромета [16]

Таблица 1

Перечень пунктов гидрометеорологических наблюдений Росгидромета
на Белом море в районе Соловецких островов

№ п/п	Название пункта наблюдений	Месторасположение НП	Координаты НП		Ведомственная принадлежность НП
			СШ	ВД	
1	МГ-2 Соловки	Архангельская обл., Онежский залив Белого моря	65° 01'	34° 42'	ФГБУ «Северное УГМС»
2	МГ-2 Кемь-Порт	Кемский район Республики Карелия	64° 59'	34° 48'	ФГБУ «Северное УГМС»

Примечание: составлено авторами на основе данных Росгидромета [16].

Таблица 2

Характерные показатели основных фаз ледового режима Белого моря
в районе о. Соловки (Онежский залив Белого моря) за период с 1980 по 2019 г.

Пункт морских наблюдений, территория	Дата	Фаза ледового режима		Продолжительность ледовых явлений (дни)	
		начало устойчивого льдообразования	очищение от льда		
МГ-2 Соловки	Средняя	02.12	18.05	Средняя	166
	Ранняя	06.11	05.05	Наименьшая	133
	Поздняя	05.01	03.06	Наибольшая	202

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследований.

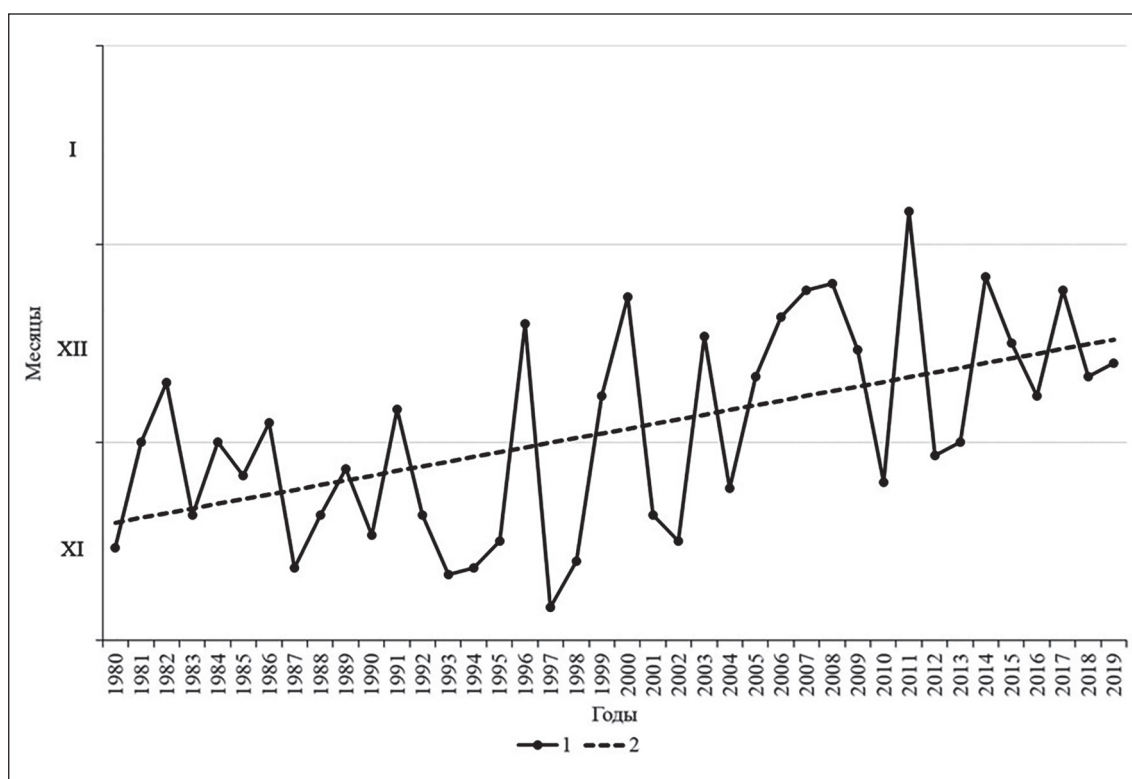


Рис. 2. Хронологический график устойчивого льдообразования
в районе Соловецких островов за 1980-2019 гг.

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследований

Таблица 3

Параметры регрессионного анализа среднестатистических параметров фаз ледового режима Белого моря в районе о. Соловки за период с 1980 по 2019 г.

Показатели ледового режима	Тренд, дней/год	p-value	Значимость
Устойчивое льдообразование	$0,708 \pm 0,368$	0,0004	+
Очищение	-	0,1821	-
Продолжительность дней с ледовыми явлениями	$-0,844 \pm 0,428$	0,0003	+

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследований.

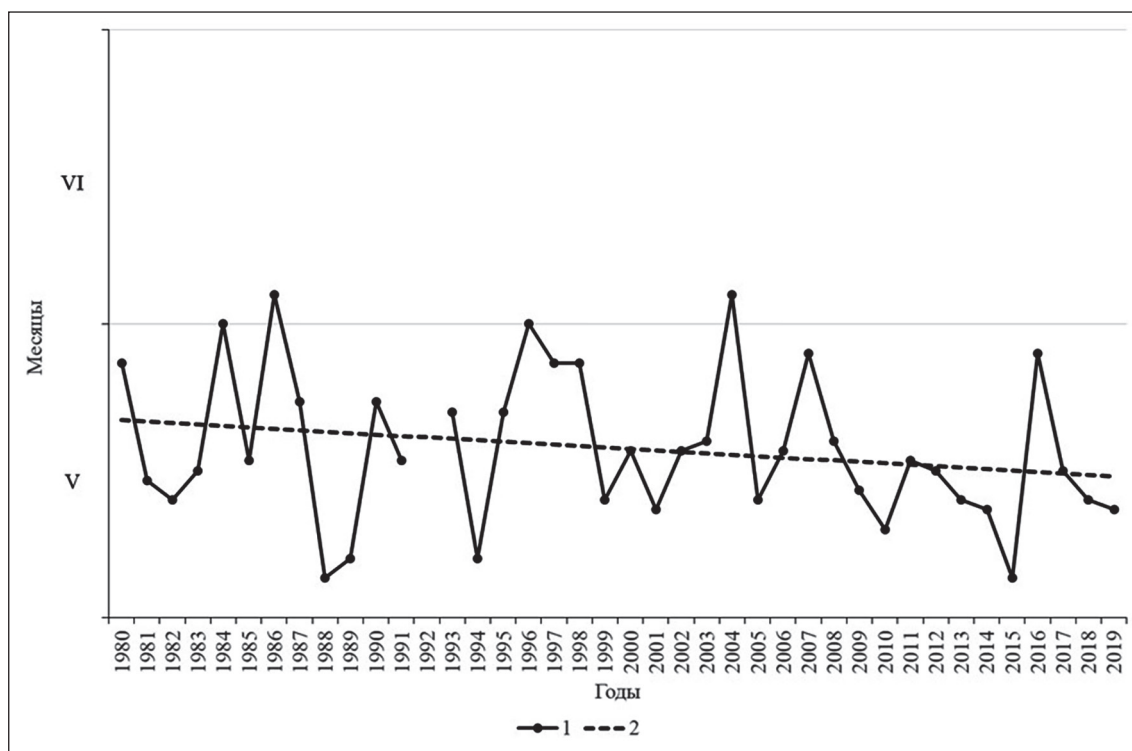


Рис. 3. Хронологический график дат окончательного очищения ото льда в районе Соловецких островов за 1980-2019 гг.

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследований

Самое позднее льдообразование в районе о. Соловки за рассматриваемый ряд отмечено в зимний период 2011-2012 гг. (табл. 2). Несмотря на то, переход температур через 0°C в сторону отрицательных температур произошел в середине ноября 2011 г., из-за незначительных отрицательных температур воздуха и периодически возникающих положительных температур воздуха формирование ледяного покрова в районе Соловецких островов началось лишь в начале января 2012 года (05.01).

Регрессионный анализ ряда дат устойчивого льдообразования в районе о. Со-

ловки показал, что в исследуемый ряд лет (1980-2019 гг.) значение $p\text{-value}$ (0.0027) было ниже уровня значимости 5%, что свидетельствует о положительном статистически значимом линейном тренде (табл. 3), соответственно, рассматриваемый ряд не является однородным, а именно, сроки начала льдообразования на 27 дней (более чем на 3 недели) сдвинулись в сторону зимних месяцев. Сдвиг происходил со средней скоростью 6,2 дня/10 лет (рис. 2).

Сумма накопления отрицательных температур воздуха, необходимая для образования льда в район о. Соловки, в среднем составляет -91°C . Минимальная сумма на-

копления отрицательных температур -22°C , при которой в короткие сроки началось образование ледяного покрова, отмечена в ноябре 2012 года, после раннего перехода к отрицательным значениям (21.10) и чередования затоков холода и тепла, что в наибольшей степени связано с ветровым режимом на момент льдообразования и сформировавшимся тепловым балансом.

Максимальная сумма отрицательных температур воздуха, необходимых для льдообразования, составила -232°C , отмечена в 1992 году, в условиях раннего перехода температур к отрицательным значениям (10.10) и отсутствия возвратов тепла, что, вероятнее всего, связано с тепловым и ветровым воздействиями, повлиявшими на формирование льда.

Полное очищение ото льда водной поверхности Онежского залива Белого моря в районе Соловецких островов происходит, как правило, во второй половине мая (средняя дата 18.05). Самая ранняя дата очищения зафиксирована в начале мая (05.05) 1988 и 2015 гг., наиболее поздняя – в начале июня (03.06) 2004 года.

Регрессионный анализ ряда дат очищения ото льда акватории Белого моря в районе о. Соловки показал, что в исследуемый ряд лет значение $p\text{-value}$ (0,18) было выше уровня значимости 5% (табл. 3), что свидетельствует об отсутствии статистически значимого линейного тренда, соответственно, рассматриваемый ряд является однородным. Таким образом, сроки очищения ото льда не претерпели существенных изменений, сдвиг в сторону зимних месяцев составил лишь 6 дней (рис. 3).

Сумма накопления положительных температур воздуха, необходимая для полного очищения водной поверхности ото льда в районе Соловецких островов, в среднем равна 97°C . Минимальная сумма накопления (64°C), при которой произошло очищение, отмечена в мае 1985 г., максимальная – 214°C в период очищения в 2005 году.

Средняя продолжительность периода с ледовыми явлениями в районе Соловецких островов составляет 166 дней. Самая минимальная (133 дня) была зафиксирована в зиму 2011–2012 гг., связана с поздним образованием ледового покрова – в начале января 2012 г. Наиболее длительный период с ледовым покровом составил 202 дня, наблюдался в 1997–1998 гг. В этот год ледяной покров в заливе установился уже в начале ноября 1997 г., а полное очищение ото льда произошло лишь в конце мая 1998 г.

Регрессионный анализ ряда продолжительностей ледовых явлений в районе Соловецких островов показал, что исследуемый период имеет отрицательный статистически значимый линейный тренд, ряд неоднороден (значение $p\text{-value}$ – 0,0003 ниже уровня значимости 5%). Продолжительность ледового периода сократилась на 33 дня (на месяц), что объясняется сдвигом сроков льдообразования в сторону более поздних дат и более ранним очищением акватории ото льда. Уменьшение количества дней происходило со скоростью 8,4 дня/10 лет (табл. 3).

Заключение

Анализ временных рядов характерных сроков ледового режима выявил статистически значимые линейные тренды по срокам льдообразования и продолжительности периода с ледовыми явлениями. В результате регрессионного анализа установлено, что даты устойчивого льдообразования в районе исследования более чем на три недели сдвинулись в сторону зимних месяцев, смещение происходило со средней скоростью 7,1 дня/10 лет. Существенных изменений в сроках очищения ото льда водной акватории не произошло, до недели произошел сдвиг сроков очищения в сторону ранних дат. Средняя продолжительность ледового периода сократилась практически на месяц, уменьшение количества дней происходило со скоростью 8,4 дня/10 лет.

Полученные данные о сдвигах сроков начала устойчивого льдообразования и дат очищения ото льда в сторону зимних месяцев, а также динамика по уменьшению продолжительности ледовых явлений должны быть учтены при составлении методологических материалов для осуществления гидропрогнозирования.

Список литературы

1. Киселёв А.А. Белое море // Кольская энциклопедия. Т. 1. А–Д. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 306.
2. Баклагин В.Н. Многолетняя изменчивость сплоченности льда Белого моря по спутниковым данным // Лёд и Снег. 2022. № 62 (4). С. 579–590. URL: <https://ice-snow.igras.ru/jour/article/view/1089> (дата обращения: 20.06.2025). DOI: 10.31857/S2076673422040153.
3. Шалина Е.В. Региональные особенности изменения ледовой обстановки в морях российской Арктики и на трассе Северного морского пути по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 201–213. URL: <http://jrse.cosmos.ru/article.aspx?id=2427> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-201-213.
4. Баклагин В.Н., Лукина Ю.Н. Многолетняя изменчивость сплоченности льда в районе Соловецких островов // Успехи современного естествознания. 2024. № 9. С. 6–10. URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=38303> (дата обращения: 26.06.2025). DOI: 10.17513/use.38303.

5. Севастьянов Д.В. Арктический туризм в Баренцевоморском регионе: современное состояние и границы возможного // *Арктика и Север*. 2020. № 39. С. 26–36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/arkticheskiy-turizm-v-barentsevomorskom-regione-sovremennoe-sostoyanie-i-granitsy-vozmozhnogo> (дата обращения: 30.06.2025). DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.39.26.
6. Глуховский Б.Х. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том. 2. Вып. 1. Ленинград: Гидрометеониздат, 1991. 241 с.
7. Filatov N.N., Pozdnyakov D.V., Johannessen O.M., Pettersson L.H. White Sea: Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change. Chichester, UK: Springer-Praxis, 2005. 463 p. DOI: 10.1007/3-540-27695-5.
8. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2014. 608 с. ISBN 978-5-91070-064-6.
9. Постановление Правительства Архангельской области от 24.04.2012 № 153 «Об утверждении долгосрочной целевой программы Архангельской области «Развитие инфраструктуры Соловецкого архипелага на 2012-2014 годы» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.regionz.ru/index.php?ds=1708043> (дата обращения: 06.05.2020).
10. Laliberté F., Howell S.E.L., Kushner P.J. Regional variability of a projected sea ice-free Arctic during the summer months // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. P. 256–263. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015GL066855> (дата обращения: 30.06.2025). DOI: 10.1002/2015GL066855.
11. Заболотских Е.В. Обзор методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55. № 1. С. 128–151. URL: <https://journals.eco-vector.com/0002-3515/article/download/11795/9272> (дата обращения: 30.06.2025). DOI: 10.31857/S0002-3515551128-151.
12. Kern S., Laverne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Saldo R., Sørensen A.M. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. P. 3261–3307. URL: <https://tc.copernicus.org/articles/13/3261/2019/> (дата обращения: 25.06.2025). DOI: 10.5194/tc-13-3261-2019.
13. Kern S., Laverne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set inter-comparison for Arctic summer conditions // *The Cryosphere*. 2020. Vol. 14. P. 2469–2493. URL: <https://tc.copernicus.org/articles/14/2469/2020/> (дата обращения: 25.06.2025). DOI: 10.5194/tc-14-2469-2020.
14. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels // *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113. C02S03. URL: <https://www.iup.uni-bremen.de/iuppage/psa/documents/spreen07.pdf> (дата обращения: 20.06.2025). DOI: 10.1029/2005JC003384.
15. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам РД 52.10.842-2017. Выпуск 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Часть I. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. М.: ООО «Издательство ИТРК», 2017. 385 с.
16. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. [Электронный ресурс]. URL: meteo.ru (дата обращения: 25.06.2025).