

СТАТЬИ

УДК 551.467

DOI 10.17513/use.38303

**МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЬДА
В РАЙОНЕ СОЛОВЕЦКИХ ОСТРОВОВ****Баклагин В.Н., 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 исследования является исследование ледового режима акватории Белого моря в районе Соловецких островов (Онежский залив), которое заключается в анализе данных спутниковых наблюдений за ледовой обстановкой за 1979–2021 гг. Информация о протекании ледового режима в районе Онежского залива Белого моря имеет весьма значимый прикладной характер – может служить информационной основой при организации туристического периода. Это в существенной мере повысит экономический эффект от туризма в регионе и позволит значительно увеличить туристический трафик на Соловки благодаря оптимизации морских перевозок. В качестве информационной основы для анализа многолетней динамики протекания ледового режима в районе Соловецких островов были использованы спутниковые наблюдения микроволновых датчиков. Эти данные фиксируются спутниками с ноября 1978 г. Национальный центр данных по льду и снегу США NSIDC выполняет обработку и дешифрирование этих данных и предоставляет их пользователям в виде набора G02135, содержащего файлы-NETCDF, содержащие информацию о ледовой обстановке в пространственно-временном разрешении. Также в качестве альтернативы данным NSIDC использованы схожие данные о сплоченности льда, полученные в университете в Бремене, – набор AMSR-E/AMSR2. Результаты показали, что за рассматриваемый период 1979–2021 гг. многолетние изменения сплоченности льда имеют статистически значимый (при уровне значимости 0,05) отрицательный тренд $-0,22 \pm 0,11\%$ год⁻¹. Формирование ледяного покрова в районе Соловецких островов начинается уже в конце сентября и заканчивается в середине июня. Установлено, что безледоставный период рассматриваемого района меньше (на 10–20 дней), чем для других районов Белого моря. Также определено, что результаты сравнительного анализа данных микроволновых датчиков, объединенных в наборе G02135 NSIDC, и микроволновых датчиков AMSR-E/AMSR2 в значительной степени согласуются между собой.

Ключевые слова: Соловецкие острова, Онежский залив, Белое море, ледовый режим, сплоченность льда, спутниковые данные

Работа выполнена в рамках государственного задания FMEN-2024-0016.

**LONG-TERM VARIABILITY OF ICE CONCENTRATION
IN THE SOLOVETSKY ISLANDS AREA****Baklagin V.N., 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 aim of the work is to study the ice regime of the White Sea waters in the Solovetsky Islands area (Onega Bay), which consists in the analysis of satellite observations of the ice situation for 1979–2021. Information on the ice regime in the Onega Bay area of the White Sea is of significant applied nature and can serve as an information basis for organizing the tourist period. This will significantly increase the economic effect of tourism in the region and will significantly increase tourist traffic to Solovki due to the optimization of sea transportation. Satellite observations of microwave sensors were used as an information basis for the analysis of long-term dynamics of the ice regime in the Solovetsky Islands area. These data have been recorded by satellites since November 1978. The National Ice and Snow Data Center NSIDC USA processes and deciphers these data and provides them to users as a set of G02135 containing NETCDF files containing information on the ice situation in spatio-temporal resolution. Also, as an alternative to the NSIDC data, similar data on ice concentration obtained at the University of Bremen – the AMSR-E/AMSR2 were used. The results showed that for the considered period of 1979–2021, long-term changes in ice concentration have a statistically significant (at a significance level of 0.05) negative trend of $-0,22 \pm 0,11\%$ year⁻¹. The formation of ice cover in the Solovetsky Islands area begins already in late September and ends in mid-June. It was found that the ice-free period in the considered area is shorter (by 10–20 days) than for other areas of the White Sea. It was also determined that the results of a comparative analysis of the microwave sensor data, combined in the G02135 NSIDC set, and the AMSR-E/AMSR2 microwave sensors are largely consistent with each other.

Keywords: Solovetsky Islands, Onega Bay, White Sea, ice regime, ice concentration, satellite data

The work was carried out within the framework of the state assignment FMEN-2024-0016.

Введение

В данной работе объектом исследования являются Соловецкие острова (Соловки). Они расположены в Онежском заливе Белого моря. Архипелаг состоит из шести

крупных и около ста мелких островов. Площадь всего архипелага составляет более чем 300 км². В настоящее время территория Соловецкого архипелага является заповедным участком. Начиная с 1992 г. Соловец-

кие острова включены в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, а в 1995 г. отнесены к особо ценным объектам природного и исторического наследия России [1].

С 2001 по 2009 г. общий объем туристического потока на Соловецкие острова стабильно возрастал – с 17 тыс. до 50 тыс. туристов в год. Однако в 2011 г. количество туристов резко сократилось до 30 тыс. чел. [2], это связано прежде всего с проблемой организации морского транспорта. Кроме того, кораблекрушение теплохода «Булгария» в 2011 г. способствовало ряду барьеров при планировании транспортировки людей и грузов судами. Это вызвало определенные неудобства при посещении острова туристами, что отразилось и на посещаемости. Следует отметить, что продолжительность туристического сезона на Соловках составляет четыре месяца, и сроки сезона неизбежно связаны с навигационным периодом, планирование которого напрямую зависит от протекания ледового режима в районе Онежского залива Белого моря. Поэтому следует отметить, что информация о протекании ледового режима в районе Онежского залива Белого моря имеет весьма значимый прикладной характер – может служить информационной основой при организации туристического периода. Это в существенной мере повысит экономический эффект от туризма в регионе и позволит значительно увеличить туристический трафик на Соловки благодаря оптимизации морских перевозок.

Ввиду того, что Белое море является объектом промышленно-производственного, торгового и туристического назначения, ледовая обстановка на акватории моря всегда представляла особый интерес для исследователей [3, с. 45; 4, с. 10; 5, с. 121]. Наиболее полные результаты о ледовой ситуации, собранные с береговых станций и исследовательских судов, представлены в фундаментальной работе [3, с. 12], которая опубликована издательством государственного Океанографического института СССР. Помимо контактных методов наблюдений в работе [3, с. 33] частично использованы и дистанционные методы наблюдения – авиаразведки. Позже, в 2005 г., в монографии [4, с. 88] были опубликованы результаты анализа спутниковых данных о ледовой ситуации на Белом море за многолетний период – 21 год и получены общие тенденции к изменчивости среднегодовой сплоченности льда на Белом море. Авторы указывают на то, что для всех пяти районов

Белого моря, а также в целом для всей акватории обнаружены снижения сплоченности льда на $8,1\% \times \text{декада}^{-1}$ [4, с. 88]. Однако за последние 7 лет (1992–1999) выявлено незначительное увеличение площадей ледяного покрова.

Вышеперечисленные исследования демонстрируют, что протекание ледового режима на Белом море терпит значительные изменения в последние десятилетия, что также оказывает влияние на формирование сроков навигационного периода, это же относится и к акватории Онежского залива, который представляет особый интерес, поскольку имеет туристическое значение.

Таким образом, **целью исследования** является получение статистических данных и закономерностей многолетней изменчивости сплоченности льда Белого моря в районе Соловецких островов (Онежского залива) с помощью анализа данных о ледовой ситуации, полученных спутниковыми наблюдениями за 1979–2021 гг.

Материалы и методы исследования

Для получения данных о ледовом режиме водоемов могут использоваться различные методы: визуальный (с постов ГМС), аэрофотосъемки, спутниковые наблюдения, дроны и др. Однако в настоящее время наиболее полную и регулярную информацию о ледовом состоянии водоемов могут дать только спутниковые методы. В связи с этим в работе использованы именно данные спутниковых наблюдений, в частности датчиков микроволнового пассивного зондирования. Эти данные собраны, дешифрованы и структурированы Национальным центром данных по снегу и льду США NSIDC и представлены в виде набора данных G02135 с пространственным разрешением 25 км, который распространяется свободно и находится в открытом доступе. Преимущества данных набора G02135 заключаются в охвате наиболее продолжительного временного периода относительно других аналогичных данных – с 1978 г. по настоящее время. Поэтому в работах [6; 7] отмечается целесообразность применимости данных набора G02135 для оценки многолетних тенденций изменчивости протекания ледового режима на морях арктической зоны. Однако следует отметить, что последние исследования [8–10] по критическому анализу использования различных наборов спутниковых данных показали, что в некоторых случаях алгоритмы, которые используются для дешифрирования получен-

ной с датчиков информации, могут давать значительные ошибки (вплоть до 45%). Особенно большие ошибки возникают, когда происходят значительные изменения (динамичные) площадей ледовых образований – в периоды осеннего формирования льда и весеннего таяния. Авторы выполнили анализ нескольких алгоритмов дешифрирования (4 группы алгоритмов, всего 10 алгоритмов) и сделали вывод о том, что датчики микроволнового пассивного зондирования допускают ошибки при определении сплоченности льда в случае, когда вода в процессе таяния льда располагается на его поверхности.

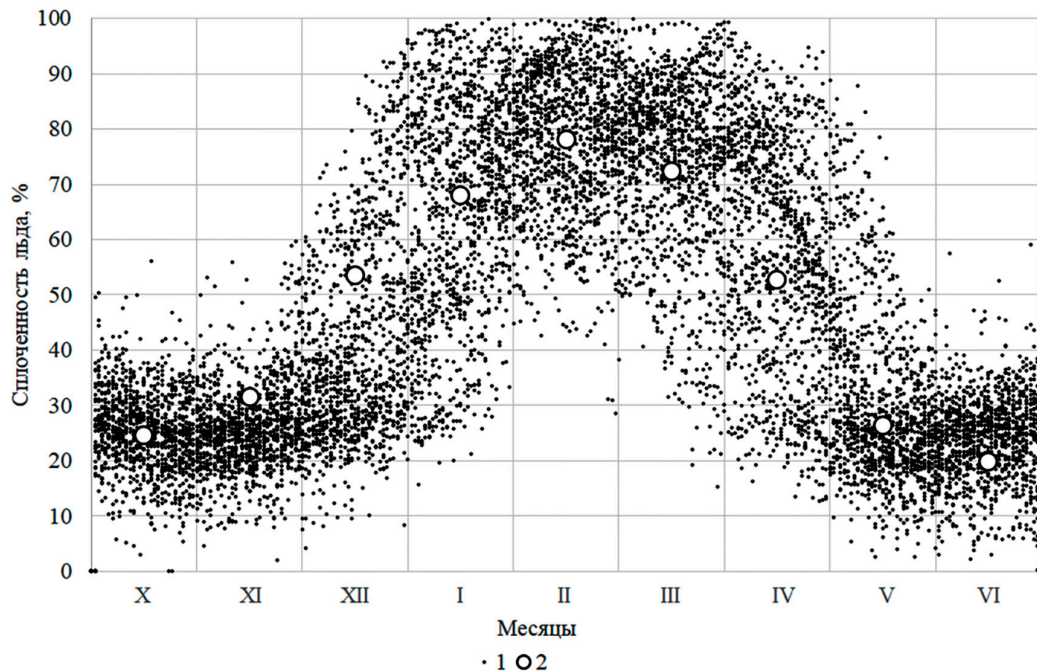
В связи с этим следует отметить, что хорошей альтернативой набору данных G02135, представленных NSIDC, является набор данных AMSR-E/AMSR2 – данные микроволновых радиометров AMSR-E/AMSR2, используемых в разные периоды времени на бортах различных спутников (Aqua, GCOM-W1 JAXA) для формирования общего ряда данных. Данные AMSR-E/AMSR2 имеют пространственное разрешение 3,125 км и охват временного периода с 2002 г. по настоящее время. При этом в качестве алгоритма дешифрирования для данных AMSR-E/AMSR2 использован усовершенствованный алгоритм ASI [11], который в сравнении с натурными данными, полученными в ходе экспедиционных ис-

следований, показал незначительные расхождения в результатах (7,5–25%). Для данных G02135 использовался алгоритм NASA Team. Набор данных AMSR-E/AMSR2 сформирован в университете в Бремене.

Таким образом, в работе использованы два набора данных (G02135 NSIDC и AMSR-E/AMSR2) для получения пространственно-временных характеристик ледового режима на Белом море в районе Соловецких островов (Онежский залив). При этом набор данных AMSR-E/AMSR2 использован в качестве контролирующего (более достоверного) временного ряда для сравнения и оценки достоверности набора данных G02135.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно спутниковым данным формирование ледовых образований на Белом море в районе Соловецких островов начинается уже в конце сентября, а полное очищение ото льда происходит в середине июня. По данным NSIDC G02135 установлено, что статистически за рассматриваемый период лет максимальное значение сплоченности во время формирования ледяного покрова составляет 0,78 – это значение достигается в середине февраля, в то время когда на акватории Белого моря устанавливается практически полный ледостав (рисунок).



Хронологический ход сплоченности льда в Онежском заливе Белого моря за 1978–2021 гг. по данным G02135: 1 – фактические данные, 2 – осредненные за рассматриваемый период среднемесячные значения

Наибольшая сплоченность льда в районе Онежского залива достигается с января по март (табл. 1). В апреле в результате ветровых явлений ледяной покров начинает разрушаться и частично выносится в открытую часть Белого моря. В мае и в начале июне остатки льда подвергаются таянию, а затем лед полностью разрушается на акватории Онежского залива. Отмечается, что характерные сроки ледового режима на акватории Онежского залива сдвинуты относительно сроков, действующих для всей акватории Белого моря: начало формирования льда – в сторону ранних дат (6–7 дней), а разрушение льда – в сторону поздних дат (5–12 дней). Таким образом продолжительность периода ледовых явлений на акватории Онежского залива больше (на 10–20 дней), чем для других районов Белого моря.

Таблица 1

Среднемесячные значения сплоченности льда в Онежском заливе Белого моря по данным G02135, усредненные за период 1978–2021 гг.

Месяцы	Сплоченность льда
Январь	0,68
Февраль	0,78
Март	0,72
Апрель	0,52
Май	0,26
Июнь	0,19
Июль	–
Август	–
Сентябрь	0,08
Октябрь	0,25
Ноябрь	0,32
Декабрь	0,53

Регрессионный анализ (табл. 2) установил, что значение среднегодовой сплоченности льда на акватории Онежского залива Белого моря испытывает тенденции к сокращению на 2,2% за 10 лет. Это свидетельствует

о том, что с каждым годом площади, занимаемые льдом в период ледовых явлений, сокращаются, что соответствует тенденции глобального потепления. Следует отметить, что аналогичные тенденции выделены и для всей акватории Белого моря [12].

Результаты сравнительного анализа данных двух наборов G02135 NSIDC и AMSR-E/AMSR2 показали, что разница (абсолютное отклонение) составляет 6,02% при расчете сплоченности льда на акватории Онежском заливе за 2002–2020 гг.

Наибольшие значения за период ледовых явлений (гидрологический год) абсолютного отклонения наблюдались в 2008 г. (7,35%), наименьшие – в 2016 г. (3,39%). Отклонения в результатах интерпретации спутниковых данных набора G02135 NSIDC, вероятнее всего, объясняются некорректной классификацией однородных участков (вода/лед) алгоритмом NASA Team в тот период времени, когда происходит высокая динамика изменения площадей ледовых образований. Такая ситуация происходит для частей водоема, которые имеют продолговатую узкую форму с изрезанной береговой линией, из-за чего пространственное разрешение данных G02135 NSIDC не позволяет в полной мере описывать морфометрию таких участков, как, например, Онежский залив.

При этом большое количество участков на границе раздела вода/суша неверно классифицировано в силу недостаточного пространственного разрешения, откуда и возникают ошибки, связанные с определением льда на спутниковых снимках. Однако сравнительный анализ линейных трендов, полученных по обоим наборам данных, показал незначительные расхождения в их определении (не более 2%), что доказывает тот факт, что данные G02135 NSIDC вполне целесообразно использовать для определения статистических характеристик изменчивости ледового режима, в частности, Онежского залива Белого моря, что также подтверждается в работе [12].

Таблица 2

Результаты регрессионного анализа данных G02135

Величина тренда, %×год ⁻¹	Доверительный интервал, %×год ⁻¹	Регрессионная и дисперсионная статистика модели				
		Объясненная регрессией сумма квадратов (ESS), % ²	Сумма квадратов остатков (RSS), % ²	Коэффициент детерминации (R ²)	Значимость F	Число наблюдений (n)
-0,22	0,11	289,89	675,11	0,30	0,00017171	42

Заключение

В работе установлено, что по данным NSIDC G02135 в последние десятилетия (1979–2021 гг.) в Онежском заливе ежегодно происходит сокращение площадей ледовых образований со скоростью $-0,22 \pm 0,11\%$ год⁻¹. Данный факт согласуется с общепризнанной тенденцией уменьшения льда на акваториях водоемов в Арктике, что неразрывно связано с последствиями глобально потепления.

Формирование ледяного покрова в районе Соловецких островов начинается уже в конце сентября и заканчивается в середине июня. Вместе с тем установлено, что безледоставный период рассматриваемого района меньше (на 10–20 дней), чем для других частей Белого моря. Эти сведения можно использовать как информационную основу для открытия и закрытия навигационного периода и прокладки путей к Соловецким островам по водам Онежского залива Белого моря.

Сравнение двух наборов, G02135 NSIDC и AMSR-E/AMSR2, показало незначительную разницу (абсолютное отклонение 6,02%) при расчетах сплоченности льда на акватории Онежского залива за 2002–2020 гг. И, несмотря на то, что данные G02135 NSIDC имеют значительные ошибки в определении сплоченности льда, особенно продолговатых участков акваторий водоемов с изрезанной береговой линией, доказано, что эти данные целесообразно использовать для определения статистических характеристик ледового режима в долговременном периоде и выполнять оценку изменчивости. Это может служить основой при выборе и использовании данных микроволновых датчиков для оценки закономерностей многолетней изменчивости сплоченности льда на акваториях морей Арктики.

Список литературы

1. Севастьянов Д.В. Арктический туризм в Баренцево-морском регионе: современное состояние и границы возможного // Арктика и Север. 2020. № 39. С. 26–36. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.39.26.
2. 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: 06.07.2024).
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Вып. 1 / Под ред. Б.Х. Глуховского. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 241 с.
4. 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.
5. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2014. 608 с.
6. Кузнецов А.Д., Саенко А.Г., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Алгоритм поиска моментов смены тренда во временных рядах метеорологических величин // Вестник ТГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. Вып. 3. С. 74–89. DOI: 10.26456/vtppmk541.
7. 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.
8. 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. DOI: 10.31857/S0002-3515551128-151.
9. Kern S., Lavergne 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. DOI: 10.5194/tc-13-3261-2019.
10. Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison for Arctic summer conditions // The Cryosphere. 2020. Vol. 14. P. 2469–2493. DOI: 10.5194/tc-14-2469-2020.
11. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. C02S03. DOI: 10.1029/2005JC003384.
12. Баклагин В.Н. Многолетняя изменчивость сплоченности льда Белого моря по спутниковым данным // Лёд и снег. 2022. Т. 62 (4). С. 579–590. DOI: 10.31857/S2076673422040153.