

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-318-327>
УДК 551.465.53



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КАСКАДИНГА
ПЛОТНЫХ ВОД С АРКТИЧЕСКИХ ШЕЛЬФОВ
ПРИ СОКРАЩЕНИИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА
В МОРЯХ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНАФ.К. ТУЗОВ^{1,2}¹ — *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*² — *Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам
гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, Россия**fedor-tuz@mail.ru*

Резюме

В статье рассмотрена возможная взаимосвязь изменения площади ледяного покрова шельфовых морей Северного Ледовитого океана с количеством случаев каскадинга — стекания сформировавшихся на шельфе уплотненных в результате охлаждения и/или осолонения вод вдоль уклонов рельефа дна. Выявлено, что в Баренцевом море, море Лаптевых и море Бофорта при уменьшении площади ледяного покрова наблюдается увеличение числа случаев каскадинга, но в остальных арктических морях при сокращении площади ледяного покрова число таких случаев сокращается. Исходя из расчетов количества случаев каскадинга можно сделать вывод о том, что интенсификация формирования уплотненных вод на шельфе и их стекание вдоль континентального склона при сокращении ледяного покрова характерна для отдельных морей СЛО, в которых не наблюдается избыточного распреснения верхнего слоя вод при летнем таянии льда.

Ключевые слова: арктические моря, каскадинг, ледяной покров, математическое моделирование, шельфовая конвекция.

Для цитирования: Тузов Ф.К. Тенденции изменения интенсивности каскадинга плотных вод с арктических шельфов при сокращении ледяного покрова в морях Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 318–327. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-318-327>.

Поступила 01.09.2021

После переработки 22.10.2021

Принята 27.10.2021

TRENDS IN THE INTENSITY OF DENSE WATER CASCADING
FROM THE ARCTIC SHELVES DUE TO ICE COVER REDUCTION
IN THE ARCTIC SEASFEDOR K. TUZOV^{1,2}¹ — *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*² — *Federal State Budgetary Institution All-Russian Scientific Research Institute
for Civil Defense and Emergencies EMERCOM of Russia (Federal Center
for Science and High Technologies), Moscow, Russia**fedor-tuz@mail.ru*

Summary

The article discusses the possible relationship between changes in the ice cover area of the shelf seas of the Arctic Ocean and the intensity of dense water cascading, based on calculation data obtained with the NEMO model for the period 1986–2010, with the findings issued at 5-day intervals and a spatial resolution of $1/10^\circ$. The cascading cases were calculated using an innovative method developed by the author. The work is based on the assumption that as the ice cover in the seas retreats, the formation of cooled dense water masses is intensified, which submerge and flow down the slope from the shelf to great depths. Thus, in the Arctic shelf seas, the mechanism of water densification due to cooling is added to the mechanism of water densification during ice formation, or, replaces it for certain regions. It was found that in the Barents Sea, the Laptev Sea and the Beaufort Sea, a decrease in the ice cover area causes an increase in the number of cases of cascading. However, in most of the Arctic seas, as the area of ice cover decreases, the number of cases of cascading also decreases. As a consequence, for the whole Arctic shelf area, the number of cases of cascading also decreases with decreasing ice cover. It is shown that in the Beaufort Sea the maximum number of cascading cases was observed in the winter period of 2007–2008, which was preceded by the summer minimum of the ice cover area in the Arctic Ocean. In the Barents Sea after 2000, a situation has been observed where the ice area has been decreasing to zero values, whereas the number of cascading cases has for some time (1 month approximately) remained close to high winter values. This possibly means that the cooling and densification of the waters in ice-free areas occurs due to thermal convection. Based on the calculation of the number of cases of cascading, it can be argued that the intensification of cascading due to a reduction in the ice cover is a feature of individual seas of the Arctic Ocean, those in which there is no excessive freshening of the upper water layer due to ice melting.

Keywords: Arctic seas, shelf convection, cascading, mathematical modeling, NEMO model.

For Citation: Tuzov F.K. Trends in the intensity of dense water cascading from the Arctic shelves due to ice cover reduction in the Arctic seas. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (4): 318–327. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-318-327>.

Received 01.09.2021

Revised 22.10.2021

Accepted 27.10.2021

ВВЕДЕНИЕ

Постепенное сокращение площади ледяного покрова Северного Ледовитого океана (СЛО) в конце XX и начале XXI в. в разной степени затронуло акватории его шельфовых морей. Согласно данным спутниковых наблюдений за период 1979–2012 гг., площадь ледяного покрова в Арктике по разным оценкам ежегодно уменьшалась на 51600–70000 км² [1, 2], а после 2007 г. более 50 % площади занимает однолетний лед [2]. В морях Российского сектора Арктики ежегодное сокращение площади составляет 35800 км² в год [3]. Одним из последствий произошедших изменений стало расширение прикромочных ледовых зон (ПЛЗ), в пределах которых сплоченность льда меняется от нуля до 10 баллов. ПЛЗ являются областями интенсивного взаимодействия атмосферы и океана, высоких горизонтальных градиентов термохалинных характеристик, обуславливающих формирование резких фронтальных зон и связанных с ними плотностных течений.

Изменение условий на поверхности океана повлияло на эффективность ключевых гидрофизических процессов в водной толще. Одним из таких процессов является каскадинг — стекание уплотненных, вследствие охлаждения и/или осолонения, вод вдоль понижений рельефа дна [4]. Несмотря на глобальное распространение, каскадинг является локальным процессом с продолжительностью от нескольких дней до нескольких недель. В процессе движения из района формирования вода с большей плотностью постепенно смешивается с окружающими водами, обеспечивая передачу

свойств (тепла, соли, растворенного кислорода и др.) из поверхностной в глубинную структурную зону. В условиях сплоченного ледяного покрова в зимний сезон, что было характерно для окраинных арктических морей во второй половине XX в., основным источником формирования уплотненных вод, питающих каскадинг, были динамические полыньи (возникающие под действием ветра области открытой воды) [5]. При температуре, близкой к точке замерзания, в полыньях быстро нарастает молодой лед, а выделяемая при ледообразовании соль уплотняет нижележащие воды [4]. Как было показано в статье [6], эффективное формирование уплотненных вод в ПЛЗ связано с выносом образовавшегося льда на открытую, сравнительно теплую воду и его последующим таянием. В результате формируется большой горизонтальный градиент плотности между осолоненными водами в зоне ледообразования и распресненными водами в зоне таяния, который обеспечивает условия для интенсивного каскадинга [7]. Общей чертой описанных механизмов формирования уплотненных вод является необходимость осолонения вод в результате ледообразования и халинной конвекции, что является типичным для арктических морей. Однако недавние натурные исследования в районе Центральной банки в Баренцевом море показали, что в случае значительного отступления ледовой кромки в зимний сезон возможен качественный переход к формированию уплотненных вод вследствие не халинной, а термической конвекции, т. е. за счет интенсивной теплоотдачи со свободной ото льда поверхности [8]. В климатических условиях второй половины XX в. такого не наблюдалось, и каскадинг с Центральной банки отмечался лишь в отдельные суровые зимы, когда образовывался лед и халинная конвекция достигала дна [9]. Согласно результатам модельных расчетов, в изменившихся условиях на поверхности над банкой формируется охлажденная плотная водная масса, стекающая по склонам банки на нижележащие горизонты [8].

В предлагаемой работе исследована взаимосвязь между изменением площади льда в арктических морях по спутниковым данным и количеством случаев каскадинга на шельфе и континентальном склоне СЛО, выявленных на основе модельных данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования была использована модель NEMO (Nucleus of European Modelling of the Ocean) [10], адаптированная для арктического региона, с пространственным шагом $0,12^\circ$ и интервалом выдачи результатов расчета 5 суток. Модельный расчет выполнен для периода 1986–2010 гг. и подготовлен для исследования циркуляции вод в придонном слое на континентальном склоне до глубины 300 м. Модель имеет 74 расчетных уровня по глубине, из которых верхние 35 — это сигма-уровни, вертикальные координаты которых изменяются в зависимости от глубины узла до 300 м. Ниже размещены 39 уровней с неизменяемой глубиной. Сигма-уровни в районе 300-метровой изобаты размещены чаще для уточнения границ каскадинга. Сопоставление результатов модельного расчета с данными наблюдений каскадинга в морях Бофорта и Чукотском показало возможность для воспроизведения каскадинга при описанных выше параметрах расчета и дискретности выдачи результатов [11]. Кроме этого, возможность развития каскадинга по модельным данным NEMO в Гренландском море была показана в статье [12].

Расчет изменений состояния ледяного покрова в NEMO до версии 3.6 производится с использованием динамико-термодинамической модели LIM2 [13, 14].

Для выявления каскадинга по данным моделирования был разработан алгоритм проверки данных в узлах модельной сетки на условия наличия каскадинга

[15]. Во время работы алгоритма среди модельных данных выделяются узлы сетки на склонах морского дна, в которых придонная плотность воды больше, чем на остальных горизонтах. Если в узлах, окружающих исследуемый, находится узел с меньшей придонной плотностью и большей глубиной, то создаются условия для развития каскадинга на склоне. Из нескольких подходящих узлов на склоне может образовываться цепочка, по которой можно проследить развитие каскадинга [15].

Для установления взаимосвязи динамики ледяного покрова на шельфе и склоне и случаев прохождения каскадинга отобраны узлы модельной сетки с глубиной до 500 м в географических границах морей СЛО [16] (рис. 1). В данном исследовании область шельфа вдоль границы Гренландского моря с Баренцевым и Норвежского моря с Баренцевым будет относиться к акватории Баренцева моря. Затем была рассчитана площадь акваторий морей с глубиной до 500 м и из данных модельного расчета получены данные об изменении площади ледяного покрова в выбранных узлах. Количество случаев каскадинга рассчитывалось в области акватории с глубинами до 500 м и непрерывным уклоном дна к глубоководной части Северного Ледовитого океана. Для каждого моря было получено количество случаев каскадинга и площадь ледяного покрова в % от общей площади исследуемых акваторий (ледовитость).

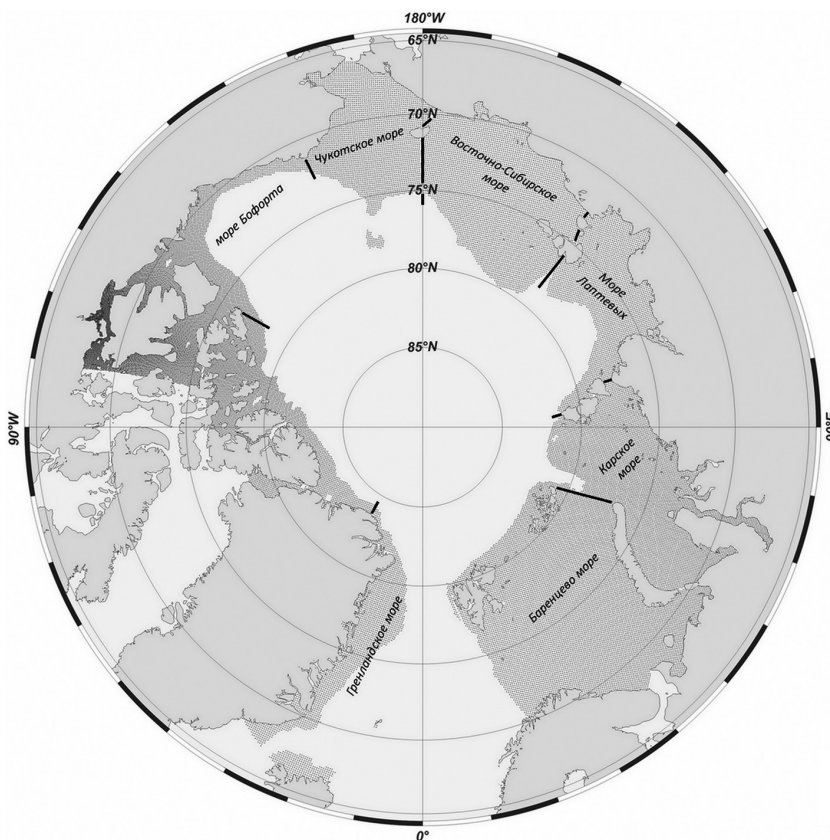


Рис. 1. Границы морей [16] и область узлов модельной сетки с глубиной до 500 м

Fig. 1. Boundaries of the seas [16] and the area of nodes of the model grid with a depth of up to 500 meters

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Построенные линейные тренды площади ледяного покрова и аномалии площади ледяного покрова относительно среднего за весь период показали, что во всех морях СЛО в разной степени наблюдается сокращение площади морского льда (рис. 2, таблица). Вместе с тем для большинства морей, кроме Баренцева, Лаптевых и Бофорта, характерно уменьшение количества случаев каскадинга (см. таблицу).

Баренцево море испытывает значительное влияние теплых атлантических вод и, в силу этого, характеризуется отличным от других морей ледовым режимом. Зимой и весной не вся акватория моря покрыта льдом [17, 18] (рис. 3). Максимальная площадь ледяного покрова, рассчитанная по спутниковым данным, отмечалась

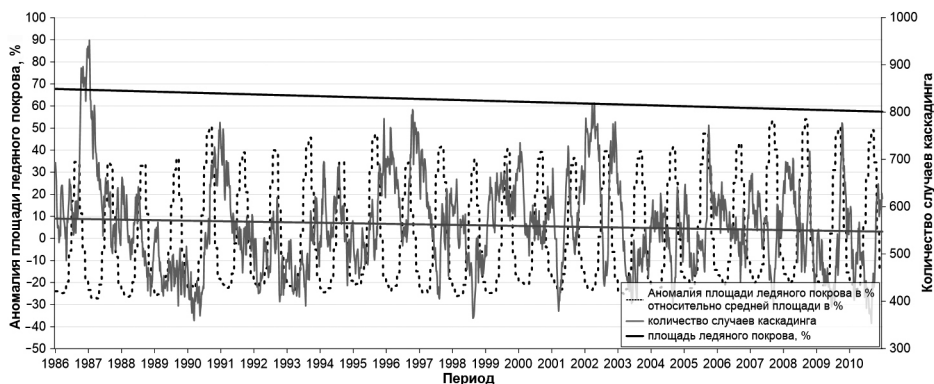


Рис. 2. Изменение количества случаев каскадинга и аномалии площади ледяного покрова (%) относительно средней площади ледяного покрова (%) в акваториях исследуемых морей за период модельного расчета

Fig. 2. Change in the number of cascading cases and anomalies in the ice cover area (%) relative to the average ice cover area (%) of the seas studied during the period of the model calculation

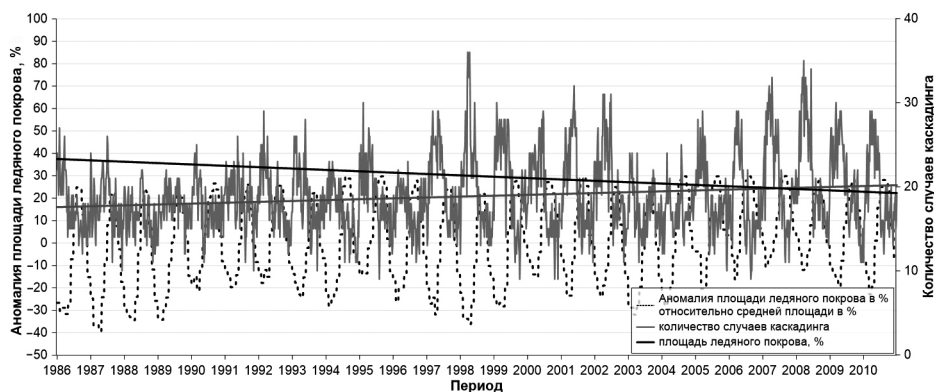


Рис. 3. Изменение количества случаев каскадинга и аномалии площади ледяного покрова (%) относительно средней площади ледяного покрова (%) в Баренцевом море и восточной части Гренландского моря (вдоль побережья Шпицбергена) за период модельного расчета

Fig. 3. Change in the number of cascading cases and anomalies in the ice cover area (%) relative to the average ice cover area (%) in the Barents Sea and the eastern part of the Greenland Sea (along the Svalbard coast) over the period of the model calculation

**Изменение параметров ледяного покрова и числа случаев каскадинга
за весь период модельного расчета: 1986–2010 гг.**

Table

**Changes in the parameters of the ice cover and the number of cascading cases
for the entire period of the model calculation: 1986–2010**

Акватория	Ледовитость в 1986 г.	Изменение ледовитости за год	Ледовитость в 2010 г.	Количество случаев каскадинга в 1986 г.	Изменение количества случаев каскадинга за год	Количество случаев каскадинга в 2010 г.
Баренцево море	38	–0,72	20	17	+0,16	21
Карское море	71	–0,4	61	125	–0,420	115
Море Лаптевых	76	–0,2	71	60	+0,8	80
Восточно-Сибирское море	85	–0,24	79	179	–1,96	130
Чукотское море	72	–0,28	65	122	–0,28	115
Море Бофорта	83	–0,24	77	50	+0,88	72
Побережье Канадского Арктического архипелага и Гренландии	95	–0,16	91	7	–0,04	6
Гренландское море	65	–0,12	62	5	0	5
Все исследуемые акватории	68	–0,32	60	565	–0,84	544

Примечание. Количество случаев каскадинга в начале и конце исследуемого периода времени определено по соответствующим линейным трендам и округлено до ближайшего целого числа.

зимой 1998 г. [1]. В этот год наблюдалась и максимальное количество случаев каскадинга в зимний период — 37 случаев в отдельный пятидневный период (рис. 3). Интенсивное ледообразование привело к выделению большого количества соленой воды и значительному уплотнению вод. После 2000 г. практически каждый год наблюдается ситуация, когда площадь льда уменьшается до близких к нулю значений, а количество случаев каскадинга в течение некоторого времени (приблизительно 1 месяц) остается близким к высоким зимним значениям. Это может означать, что часть случаев происходит без процесса ледообразования, только при охлаждении и уплотнении вод на участках акватории, свободной ото льда. Также наблюдается увеличение количества случаев каскадинга в зимний период при уменьшении площади ледяного покрова. Количество случаев каскадинга увеличилось с 17 до 21, при этом площадь ледяного покрова снижается с 38 % до 20 % (рис. 3, см. таблицу). Такая же динамика наблюдается в море Бофорта и море Лаптевых.

В море Лаптевых площадь ледяного покрова сокращается с 76 % до 71 %, при этом количество случаев каскадинга увеличивается с 60 до 80 (рис. 4, см. таблицу). Так же как и в остальных морях, кроме Баренцева, в зимние и весенние месяцы вся акватория может быть покрыта льдом, однако в летние и осенние месяцы акватория может полностью освободиться ото льда. В большинстве годовых циклов максимум количества случаев каскадинга приходится на зимние месяцы, при активном ледообразовании. В 2000, 2007 и 2008 гг. количество случаев каскадинга достигало 180, 185 и 187 соответственно (рис. 4).

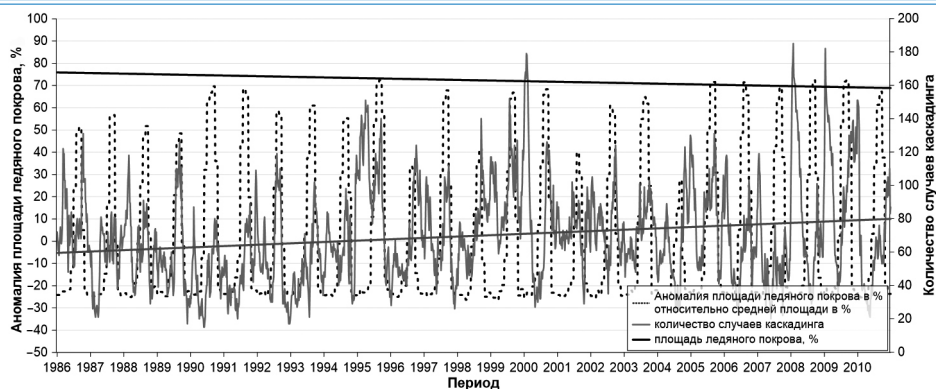


Рис. 4. Изменение количества случаев каскадинга и аномалии площади ледяного покрова (%) относительно средней площади ледяного покрова (%) в море Лаптевых за период модельного расчета

Fig. 4. Change in the number of cascading cases and anomalies in the ice cover area (%) relative to the average ice cover area (%) in the Laptev Sea over the period of the model calculation

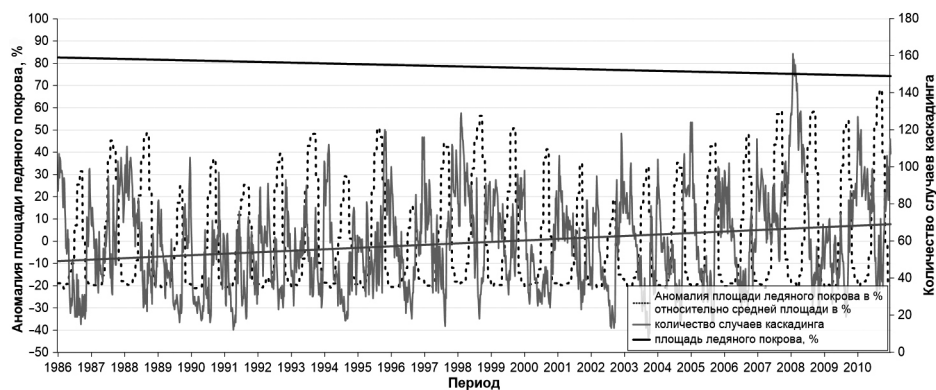


Рис. 5. Изменение количества случаев каскадинга и аномалии площади ледяного покрова (%) относительно средней площади ледяного покрова (%) в море Бофорта за период модельного расчета

Fig. 5. Change in the number of cascading cases and anomalies in the ice cover area (%) relative to the average ice cover area (%) in the Beaufort Sea over the period of the model calculation

В море Бофорта площадь ледяного покрова сокращается с 83 % до 77 %, а количество случаев каскадинга увеличивается с 50 до 72 (рис. 5, см. таблицу). В зимние и весенние месяцы практически 100 % исследуемой акватории покрыто льдом, и преимущественно на начало этого периода приходятся максимумы количества случаев каскадинга. Максимальное количество зафиксировано весной 2008 г. — 162 случая за пятидневный интервал (рис. 5). Предполагается, что это стало следствием выхолаживания вод на свободной ото льда мелководной части шельфа и их стекания на более глубокие горизонты. В статье [11] разобраны случаи прохождения каскадинга. При этом к стеканию охлажденных плотных вод добавляется стекание осолоненных при ледообразовании вод. Следует отметить, что зима 2007/08 г. последовала за летним минимумом ледяного покрова в Северном Ледовитом океане, особенно в Канадском бассейне [17]. Это привело к выхолаживанию и уплотнению вод на мелководной части

шельфа моря Бофорта. Обширный относительно плоский шельф позволяет накопить плотные воды вдали (до 150 км) от склона. Накопленные на шельфе плотные воды перемещаются к подводным каньонам и стекают по ним на более глубокие горизонты. При осенне-зимнем ледообразовании продолжается уплотнение вод при осолонении.

В других морях СЛО, несмотря на тренд уменьшения ледовитости, не наблюдается увеличения количества случаев каскадинга (таблица). Лидером по количеству случаев каскадинга является Восточно-Сибирское море. Большая часть его акватории представляет собой мелководную шельфовую область со слабым уклоном к центральной части СЛО. В таких условиях удастся зафиксировать большое количество случаев каскадинга (стекания уплотненных вод на большую глубину), однако максимальные глубины при этом малы (около 100 м). Выявить однозначную зависимость максимумов случаев каскадинга с динамикой ледяного покрова по годовым циклам не удалось (таблица). В Гренландском море (таблица) и вдоль побережья Канадского Арктического архипелага (таблица) количество случаев каскадинга незначительно и редко превышает 10 за отдельный пятидневный интервал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет количества случаев каскадинга по разработанной методике показал, что для всего шельфа СЛО не наблюдается увеличения случаев каскадинга при уменьшении ледовитости. Однако на основе данных модельного расчета и исходя из расчетов количества случаев каскадинга для каждого моря (таблица) автором подтверждается вывод, сделанный в статье [11] о том, что интенсификация каскадинга при уменьшении площади ледяного покрова характерна для отдельных морей СЛО. В море Бофорта зимой 2007/08 г. зафиксирован максимум количества случаев каскадинга, связанный с выхолаживанием и уплотнением вод на свободном ото льда шельфе.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Статья выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-35-90124 «Аспиранты».

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю Владимиру Владимировичу Иванову за предоставленные данные и помощь в оформлении результатов.

Competing interests. The author has no competing interests.

Funding. The article was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 19-35-90124 “Postgraduates”).

Acknowledgments. The author expresses his gratitude to his research advisor Vladimir V. Ivanov for the data provided and assistance in the presentation of the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалина Е.В. Сокращение ледяного покрова Арктики по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования // Современные проблемы изучения Земли из космоса. 2013. Т. 10. Вып. 1. С. 328–336.
2. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование Земли из космоса. 2013. Т. 4. С. 50–65.
3. Моря российской Арктики в современных климатических условиях. СПб.: ААНИИ, 2021. 360 с.

4. Shapiro G.I., Huthnance J.M., Ivanov V.V. Dense water cascading off the continental shelf // J. Geophys. Res.: Oceans. 2003. V. 108. № 12. P. 1–19. doi: 10.1029/2002jc001610.
5. Иванов Б.В., Тимачев В.Ф., Священников П.Н., Макитас А.П., Бедненко В.М., Павлов А.К. Энергомассообмен между океаном и атмосферой в районе зимней полыньи к северу от архипелага Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. Т. 2. С. 111–118.
6. Ivanov V.V., Shapiro G.I. Formation of a dense water cascade in the marginal ice zone in the Barents Sea // Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2005. V. 52. № 9. P. 1699–1717.
7. Иванов В.В. Усиление водообмена между шельфом и Арктическим бассейном в условиях снижения ледовитости // Доклады Академии наук. 2011. Т. 441. Вып. 1. С. 103–107.
8. Ivanov V. V., Tuzov F. K. Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea // Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2021. V. 175. P. 103590.
9. Quadfasel D., Rudels B., Selshov S. The Central Bank vortex in the Barents Sea: water mass transformation and circulation // ICES Marine Science Symposium. 1992. V. 195. P. 40–51.
10. Madec G., Bourdallé-Badie R., Chanut J., Clementi E., Coward A., Ethé Ch. NEMO ocean engine (Version v4.0). Notes Du Pôle De Modélisation De L'institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Paris: Zenodo, 2019. 247 p. doi:10.5281/zenodo.1464816.
11. Luneva M.V., Ivanov V.V., Tuzov F.K., Aksenov Y., Harle J.D., Kelly S., Holt J.T. Hotspots of dense water cascading in the Arctic Ocean: Implications for the Pacific water pathways // J. Geophys. Res.: Oceans. 2020. V. 125. № 10. P. 1–35. doi: 10.1029/2020JC016044.
12. Marson J.M., Myers P.G., Hu X., Petrie B., Azetsu-Scott K., Lee C.M. Cascading of the West Greenland Shelf: A numerical perspective // J. Geophys. Res.: Oceans. 2017. V. 122. № 7. P. 5316–5328.
13. Fichefet T., Maqueda M. Sensitivity of a global sea ice model to the treatment of ice thermodynamics and dynamics // J. Geophys. Res.: Oceans. 1997. V. 102. № C6. P. 12609–12646.
14. Bouillon S., Maqueda M., Legat V., Fichefet T. An elastic–viscous–plastic sea ice model formulated on Arakawa B and C grids // Ocean Modelling. 2009. V. 27. № 3–4. P. 174–184.
15. Тузов Ф.К. Разработка и применение алгоритма определения каскадинга у побережья архипелага Северная Земля // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2021. Т. 4. С. 52–61.
16. Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. 400 с.
17. Perovich D.K., Richter-Menge J.A., Jones F.K., Light B. Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic Sea ice melt during the summer of 2007 // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. № 11. L11501. doi:10.1029/2008GL034007.
18. Деев М.Г. Ледяной покров Арктики и его устойчивость // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2011. № 3. С. 52–57.

REFERENCES

1. Shalina E. V. Reduction of ice cover in the Arctic according to satellite passive microwave sounding. *Sovremennye problemy izucheniia Zemli iz kosmosa*. Modern problems of studying the Earth from space. 2013, 10 (1): 328–336. [In Russian].
2. Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Is the Arctic ice sheet becoming seasonal? *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Exploration of the Earth from space. 2013, 4: 50–65. [In Russian].
3. *Moria rossiiskoi Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviakh*. Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions. St. Petersburg: Proc. of AARI, 2021: 360 p. [In Russian].

4. Shapiro G.I., Huthnance J.M., Ivanov V.V. Dense water cascading off the continental shelf. *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2003, 108 (12): 1–19. doi: 10.1029/2002jc001610.
5. Ivanov B.V., Timachev V.F., Sviashchennikov P.N., Makshtas A.P., Bednenko V.M., Pavlov A.K. Energy and mass exchange between the ocean and the atmosphere in the winter polynya region north of the Spitsbergen archipelago. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2013, 2: 111–118. [In Russian].
6. Ivanov V.V., Shapiro G.I. Formation of a dense water cascade in the marginal ice zone in the Barents Sea. *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2005, 52 (9): 1699–1717.
7. Ivanov V.V. Intensification of water exchange between the shelf and the Arctic basin under conditions of reduced ice coverage. *Doklady Akademii nauk*. Academy of Sciences reports. 2011, 441 (1): 103–107. [In Russian].
8. Ivanov V.V., Tuzov F.K. Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea. *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021, 175: 103590.
9. Quadfasel D., Rudels B., Selshov S. The Central Bank vortex in the Barents Sea: water mass transformation and circulation. *ICES Marine Science Symposium*. 1992, 195: 40–51.
10. Madec G., Bourdallé-Badie R., Chanut J., Clementi E., Coward A., Ethé Ch. NEMO ocean engine (Version v4.0). Notes Du Pôle De Modélisation De L'institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Paris: Zenodo, 2019: 247 p.
11. Luneva M.V., Ivanov V.V., Tuzov F.K., Aksenov Y., Harle J.D., Kelly S., Holt J.T. Hotspots of dense water cascading in the Arctic Ocean: Implications for the Pacific water pathways. *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2020, 125 (10): P. 1–35. doi: 10.1029/2020JC016044.
12. Marson J.M., Myers P.G., Hu X., Petrie B., Azetsu-Scott K., Lee C.M. Cascading of the West Greenland Shelf: A numerical perspective. *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2017, 122 (7): 5316–5328.
13. Fichefet T., Maqueda M. Sensitivity of a global sea ice model to the treatment of ice thermodynamics and dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1997, 102 (C6): 12609–12646.
14. Bouillon S., Maqueda M., Legat V., Fichefet T. An elastic–viscous–plastic sea ice model formulated on Arakawa B and C grids. *Ocean Modelling*. 2009, 27 (3–4): 174–184.
15. Tuzov F.K. Development and application of an algorithm for determining cascading off the coast of the Severnaya Zemlya archipelago. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiia*. Moscow University Bulletin. Ser. 5. Geography. 2021, 4: 52–61. [In Russian].
16. Zalogin B.S., Kosarev A.N. *Moria*. Seas. Moscow: Idea, 1999: 400 p. [In Russian].
17. Perovich D.K., Richter-Menge J.A., Jones F.K., Light B. Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic Sea ice melt during the summer of 2007. *Geophysical Research Letters*. 2008, 35 (11): L11501. doi:10.1029/2008GL034007.
18. Deev M.G. Arctic ice cover and its stability. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiia*. Moscow University Bulletin. Ser. 5. Geography. 2011, 3: 52–57. [In Russian].