

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-384-398

VARIATIONS IN SEA-ICE CONCENTRATION OF THE LONG STRAIT DURING THE SUMMER-FALL NAVIGATION SEASONS IN 1993–2018

A. V. Kholoptsev^{1,2}, S. A. Podporin¹

¹ — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

² — Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”, Sevastopol, Russian Federation

As global climate warming progresses, the arctic ice declines thus bringing new possibilities for arctic shipping. The new transport strategy of Russia dictates rapid growth of cargo transportation along the Northern Sea Route within the next two decades, which requires constant monitoring and assessment of sea ice dynamics in the Russian Arctic. Extensive research has been done for its western part (the Kara Sea and the Barents Sea), however scarce data is available for its eastern parts including the Laptev and East-Siberian seas. The issues of safe navigation along the Northern Sea Route are considered in the paper. An emphasis is made on one of its key seaways — the Long Strait, which connects the East-Siberian and the Chukchi seas. The aim of the research is to study variations in sea-ice concentration during the summer-fall navigation seasons in 1993–2018 and identify ice hazards for vessels transiting the strait. Sea ice dynamics is studied for both 1993–2018 and 2015–2018 periods. As source data, satellite monitoring and global ocean reanalysis databases are used. GLORYS12.v1 is preferred as the main reanalysis database since it contains the most extensive data on the Arctic waters. Its results were tested prior to the research and found adequate for the task. A consistent trend for the sea ice concentration decline has been revealed throughout the strait in the summer-fall months of 1993–2018 periods. Risks of encountering sea ice with unacceptable characteristics (as per ship ice class limitations) tend to decrease everywhere. It has been shown that August, September, and October remain ice-free, hence no ice breaking assistance is needed for ships transiting the strait during this period. Situation is somewhat different in July and November. Risks of encountering dangerous ice tend to rise when navigation in westerly direction. In July, the most favorable conditions for shipping exist along the coast of the Chukchi Peninsula. This is not the case for November, when it is safer to navigate along the southern coast of the Vrangeli Island. Temporal worsening of the ice situation has been revealed in the strait in 1998–2001 and 2010–2013. During these periods ice risks increase by up to 20 % for both July and November causing minor hazards for navigation therein. No such trends have been found in the most recent analyzed period — 2015–2018. The situation, however, requires to be further monitored to predict potential ice-related hazards in the future.

Keywords: Long Strait, Northern Sea Route, probability, ice concentration, trend, hazard, reanalysis.

For citation:

Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Variations in sea-ice concentration of the Long strait during the summer-fall navigation seasons in 1993–2018.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.3 (2021): 384–398. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-384-398.

УДК 656.61.052: 551.583

ИЗМЕНЕНИЯ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРОЛИВА ЛОНГА В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЕ МЕСЯЦЫ 1993–2018 гг.

А. В. Холопцев^{1,2}, С. А. Подпорин¹

¹ — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

² — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

Исследована пространственная и межгодовая изменчивость сплоченности ледяного покрова пролива Лонга в летне-осенний навигационный период 1993–2018 гг. Для всех месяцев указанного периода оце-

ны вероятности образования льда с характеристиками, превышающими ограничения по ледовому классу, представлены их распределения и тенденции изменения. Отдельно рассмотрены особенности изменений сплоченности ледяного покрова в 2015–2018 гг. Для исследования использованы результаты спутникового мониторинга состояния ледяного покрова и данные реанализа GLORYS12.v1. Сравнение результатов фактических измерений с данными реанализа показало приемлемую точность последнего и возможность его дальнейшего применения для оценки динамики изменений ледяного покрова в проливе Лонга. В период 1993–2018 гг. выявлена устойчивая тенденция к сокращению сплоченности ледяного покрова в летне-осенний навигационный период. Показано, что риски для судоходства, связанные с возможностью появления льда, с характеристиками, превышающими допустимые по ледовому классу, снижаются по всей акватории пролива. Доступный период безледокольной навигации с августа по октябрь постепенно увеличивается. Установлено, что в июле и ноябре вероятность встретить опасный лед в проливе уменьшается по мере продвижения с востока на запад. Отмечается, что в июле наблюдаются наиболее благоприятные условия для судоходства на маршруте вдоль побережья полуострова Чукотка, а в ноябре безопаснее всего выполнять переходы вдоль южного берега острова Врангеля. В 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. в ноябре и июле в проливе зафиксированы временные ухудшения ледовой обстановки и увеличение ледовых рисков (до 20 %), которые не оказали существенного влияния на условия навигации. В современном периоде (2015–2018 гг.) тенденций к ухудшению ледовой обстановки выявлено не было.

Ключевые слова: пролив Лонга, Северный Морской путь, вероятность, сплоченность ледяного покрова, тенденция, риск, реанализ.

Для цитирования:

Холопцев А. В. Изменения сплоченности ледяного покрова пролива Лонга в летне-осенние месяцы 1993–2018 гг. / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 384–398. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-384-398.

Введение (Introduction)

Развитие судоходства по Северному морскому пути (СМП) является важнейшим приоритетом транспортной стратегии Российской Федерации в Арктике. Согласно Указу Президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 г., общий грузооборот по СМП должен к 2024 г. вырасти до 80 млн т¹. Для достижения этого показателя необходим комплекс мер, направленных в первую очередь на ввод в эксплуатацию нового ледокольного флота, стимулирование транзитного судоходства, развитие инфраструктуры арктических портов, усовершенствование навигационно-гидрографического обеспечения трасс СМП. Вместе с тем сложная ледовая обстановка является основным препятствием для обеспечения бесперебойного судоходства.

Изменения глобального климата, вызывающие сокращение ледяного покрова Арктики в последние три десятилетия, являются благоприятными для арктического судоходства [1]. Ряд авторов дают смелые прогнозы по вопросу открытия высокоширотных, в том числе трансполярных, маршрутов для транзитных судов уже к середине XXI в. [2]–[4]. Вместе с тем в работе [4] отмечается существенная неопределенность подобных оценок из-за сложности полноценного учета всех климатических факторов. Как показано в работе [5], в настоящее время наибольшая плотность транспортных потоков в летне-осенний навигационный период по-прежнему наблюдается вдоль прибрежных трасс СМП, проходящих через проливы Вилькицкого, Санникова или Дмитрия Лаптева и Лонга. Часть судов (в основном крупнотоннажных с высоким ледовым классом) предпочитают частично использовать высокоширотные участки с обходом Новосибирских островов с севера, минуя пролив Санникова, что, как показано в работах [6], [7], вполне обоснованно. Тем не менее прохождение транзитными судами проливов Вилькицкого и Лонга пока остается практически безальтернативным.

В настоящей работе исследуется участок трассы СМП, проходящий по проливу Лонга, который соединяет Восточно-Сибирское и Чукотское моря и отделяет остров Врангеля от материковой части России. Его длина составляет 128 км, а наименьшая ширина — 146 км. Условия для судоходства

¹ Указ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/57425> (дата обращения: 01.03.2021).

в проливе во многом определяются ледовой обстановкой. Акватория пролива обычно доступна для навигации с июля по ноябрь, когда суммарная площадь ледяного покрова достигает наименьших уровней [1]. В результате современного потепления климата Арктики на участках акватории пролива, расположенных вдоль побережья полуострова Чукотка, все чаще возникают ледовые условия, при которых возможна безледокольная навигация.

Публикации, описывающие актуальное состояние пролива Лонга в свете происходящих климатических изменений, немногочисленны. Вопросы доступности района для судоходства в различные сезоны рассмотрены в работах [8], [9]. Отмечается, что основную сложность представляют образующиеся в непосредственной близости от острова Врангеля Айонский и Врангелевский ледяные массивы. В зимне-весенний период они практически непроходимы для коммерческих судов. В летне-осенние месяцы их объем и площадь значительно сокращаются, однако на участках судоходных трасс могут встречаться нарастающие ледяные поля и отдельные льдины, представляющие опасность для судоходства. В этой связи в работе [1] отмечается, что несмотря на существенное уменьшение сплоченности ледяного покрова в летне-осенний период в течение последних двух десятилетий, дисперсия этого показателя возросла, что, в свою очередь, затрудняет выработку средне- и долгосрочных прогнозов по доступности пролива для беспрепятственного транзита.

В работе [10] исследуются изменения сроков устойчивого ледообразования по трассам СМП в начале XXI в. по сравнению со второй половиной XX в. В районах, прилегающих к проливу Лонга, в современном периоде отмечаются сдвиг указанных сроков вперед в среднем на две-три декады и увеличение вследствие этого навигационного периода. Однако, как и в случае со сплоченностью, авторы обращают внимание на возрастающую неопределенность (аномалии) дат начала ледообразования и, как следствие, на сложность их прогнозирования.

Анализ научных публикаций показывает, что закономерности пространственной и временной изменчивости характеристик ледяного покрова в различные месяцы в проливе Лонга изучены недостаточно. Поэтому их адекватный учет при планировании судоходства в данном районе проблематичен. Согласно действующим правилам плавания по СМП¹, на его акваторию допускаются суда, имеющие соответствующие классы ледовых усилений. Последние определяют допустимые характеристики преодолеваемого льда: толщину и сплоченность. В этой связи практический интерес представляет определение вероятностей встречи судов определенных ледовых классов со льдом, превышающим допустимые характеристики при прохождении конкретного участка трассы СМП.

Целью настоящей статьи является оценка характеристик пространственной и временной изменчивости сплоченности ледяного покрова пролива Лонга в летне-осенние месяцы и определение на этой основе вероятностей образования льда с характеристиками, превышающими ограничения по ледовому классу. Для достижения указанной цели рассмотрены следующие задачи:

- 1) определение вероятностей появления на различных участках акватории пролива Лонга льда, сплоченность которого превышает ограничения по ледовому классу для каждого месяца летне-осеннего навигационного периода;
- 2) оценка средних скоростей изменения указанных вероятностей за период 1993–2018 гг. по всей акватории пролива, а также выявление наиболее мощных короткопериодных составляющих их энергетического спектра;
- 3) выявление особенностей распределения найденных вероятностей по акватории пролива Лонга за период 2015–2018 гг. и определение средних значений меридиональной и зональной составляющих их градиента.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящем исследовании в качестве фактического материала использованы результаты мониторинга сплоченности ледяного покрова (далее — СЛП) в проливе Лонга. Наблюдения за из-

¹ Правила плавания в акватории Северного морского пути (утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 18 сентября 2020 г. № 1487). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/pravila_plavaniya.html (дата обращения: 01.03.2021).

менениями этого показателя в период 1934–1995 гг. велись на полярной станции Мыс Шмидта (68,9° с. ш., 179,5° з. д.), которая в настоящее время ликвидирована. В современном периоде наблюдения выполняются с судов, следующих по проливу, а также полярной авиацией. Начиная с 1987 г. основным методом наблюдений является спутниковый мониторинг [11], [12]. Погрешность спутниковых измерений, по данным [13]–[15], достигает 10 %. В июле (при таянии ледяного покрова) и октябре–ноябре (при его формировании) эта погрешность может достигать 50 % [13], [15]–[18]. На прибрежных участках акваторий погрешности также возрастают.

Невысокая изначальная точность спутниковой информации требует дополнительной ее обработки с помощью специализированных алгоритмов (например, NASA Team (NT), NASA Team 2 (NT2), Bootstrap и др.) [19]. Получаемые в итоге оценки значений СЛП имеют дискретность семь суток [20]. Наиболее полный архив таких оценок по Северному Ледовитому океану сформирован в рамках проекта Всемирной метеорологической организации «Глобальный банк цифровых данных по морскому льду» (ГБЦДМЛ). Основу архива образуют ледовые карты отдельных акваторий Арктики, предоставляемые национальными ледовыми службами России (ранее СССР), Дании, Канады и США. При построении карт применяются форматы SIGRID¹, в которых данные представлены по узлам координатной сетки 0,25° × 0,25°.

Периодичность обновления указанной информации не позволяет использовать ее для непосредственной оценки вероятностей появления льдов с характеристиками СЛП, превышающими допустимые по ледовому классу пределы (для краткости указанные вероятности далее обозначены ВЛ). Единственным методом, позволяющим оценивать СЛП на любых участках арктических акваторий для каждого суток (в том числе минувших), является *математическое моделирование*. Для суток, в которые велись фактические измерения, указанный метод способен обеспечить оптимальную интерполяцию их результатов в любых пунктах изучаемой акватории. Для суток, когда измерения не проводились, метод позволяет осуществить оптимальное восполнение пропусков.

Результаты математического моделирования СЛП в любых районах Мирового океана применяются для их *ретроспективного анализа* (реанализа). Для верификации соответствующих математических моделей могут применяться результаты фактических измерений СЛП из баз ГБЦДМЛ, используемые также для оценки погрешностей реанализа. Одним из наиболее точных реанализов по СЛП Арктики является GLORYS12.v1 (Global Ocean Physics Reanalysis), основанный на океанических моделях семейства NEMO [21] и поддерживаемый сервисом Copernicus². Данные по льду в нем доступны с 01.01.1993 г. с разрешением по времени 1 сут, по координатам 5 угл. мин (шаг по меридиану составляет приблизительно 8 км). Для уменьшения дисперсии ошибок моделирования в реанализе использован *фильтр Калмана*.

Реанализ GLORYS12.v1 использован в настоящей работе в качестве основного источника данных о среднесуточных значениях СЛП в проливе Лонга. Предварительная проверка достоверности его результатов путем сравнения их с информацией из архива ГБЦДМЛ показала удовлетворительное соответствие для всех пунктов изучаемого района. Из реанализа были взяты данные по акватории пролива между параллелями 71,00–68,25° с. ш. и меридианами 177,83 в. д.–176,25 з. д. Всего в исследуемый участок вошло 34 параллели (на каждой по 72 пункта) с шагом 0,08333°. Данные реанализа доступны на каждые сутки любого месяца, что позволило использовать их при расчете ВЛ для всех участков акватории пролива и любых значений СЛП.

Оценка средних значений ВЛ при решении первой задачи проводилась для всех месяцев с июля по ноябрь периода 1993–2018 гг. и всех пунктов изучаемого района, расположенных в узлах координатной сетки GLORYS12.v1. Исследование выполнялось для значений сплоченности из ряда 0,3; 0,4 ... 0,9, что примерно соответствует уровням СЛП, используемым при описании ледовых классов судов. По результатам, полученным для всех пунктов акватории, месяцев и значений СЛП, сформированы временные ряды ВЛ, состоящие из 26 членов.

¹ AARI WDC Sea Ice file server. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://wdc.aari.ru/wmo/docs/sigrid/> (дата обращения: 01.03.2021).

² Global Ocean Physics Reanalysis. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 (дата обращения: 03.03.2021).

При решении второй задачи использовалась методика, представленная в работе [22]. Для каждого полученного ряда вычислялись амплитуды гармоник его энергетического спектра. Выявлено, что наиболее мощная гармоника для всех рядов составляет период 2–4 года. Поэтому сглаживание временных рядов осуществлялось в скользящем окне длиной 4 года. Полученные при этом сглаженные ряды для каждого месяца, уровня СЛП и пункта акватории пролива использовались для вычисления средней скорости изменения ВЛ (далее — ССВЛ). Распределения ССВЛ по акватории пролива отображались на контурных картах с использованием триангуляции Делоне.

При решении третьей задачи для каждого месяца периода 2015–2018 гг. и уровня СЛП вычислялись средние значения ВЛ для всей акватории пролива. Полученные результаты отображались на контурной карте и использовались для нахождения средних значений меридиональных и зональных проекций градиентов ВЛ, представленных в табличной форме.

Результаты (Results)

В рамках решения первой задачи получены ряды, отражающие изменения ВЛ по всем пунктам акватории пролива Лонга в период 1993–2018 гг. В качестве примера на рис. 1 приведены изменения ВЛ, соответствующие СЛП = 0,6 для одного из пунктов изучаемой акватории с июля по ноябрь.

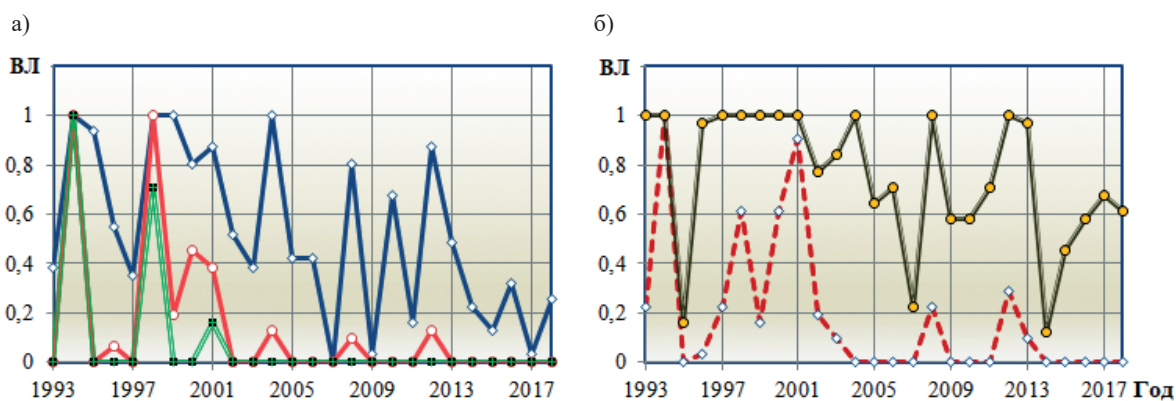


Рис. 1. Изменения ВЛ в точке с координатами $70^{\circ}10'$ с. ш. $178^{\circ}03'$ в. д. в 1993–2018 гг. для сплоченности 0,6: а — лето; б — осень

Условные обозначения:

— июль; — август; — сентябрь; — октябрь; — ноябрь

Из рис. 1 следует, что многолетние изменения ВЛ представляют собой сложные колебания, в которых присутствует мощная короткопериодная составляющая с периодом 2–4 года. Аналогичные особенности выявлены и для остальных участков пролива при различных СЛП. После сглаживания в скользящем окне длиной четыре года были получены временные ряды ВЛ, представленные на рис. 2 для той же точки пролива, что свидетельствует об убывающем тренде для всех месяцев.

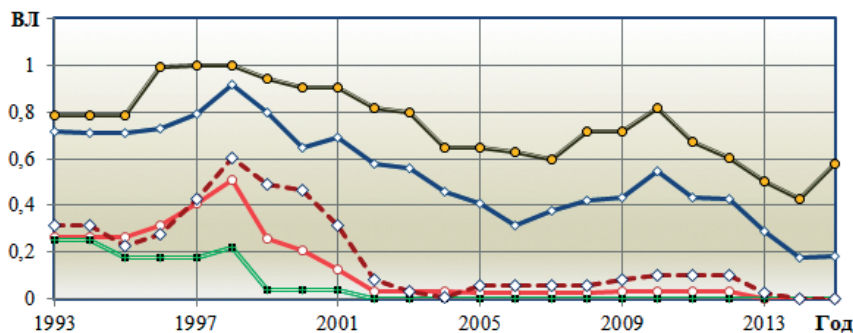


Рис. 2. Изменения ВЛ в точке с координатами $70^{\circ}10'$ с. ш. $178^{\circ}03'$ в. д. в 1993–2018 гг., сглаженные в скользящем четырехлетнем окне

Условные обозначения:

— июль; — август; — сентябрь; — октябрь; — ноябрь

Figure 1 consists of four maps of the Laptev Sea, labeled a), б), в), and г), showing different bathymetric and depth contours. Each map includes a coordinate grid and labels for geographical features like the Yenisey River, Laptev Sea, and surrounding landmasses.

- Map a)** shows depths from 0 to 1000 m. The sea floor is predominantly blue, indicating depths greater than 1000 m. Shallow areas are colored in shades of pink and purple.
- Map б)** shows depths from 0 to 1500 m. The sea floor is predominantly blue, indicating depths greater than 1500 m. Shallow areas are colored in shades of pink and purple.
- Map в)** shows depths from 0 to 2000 m. The sea floor is predominantly blue, indicating depths greater than 2000 m. Shallow areas are colored in shades of pink and purple.
- Map г)** shows depths from 0 to 2500 m. The sea floor is predominantly blue, indicating depths greater than 2500 m. Shallow areas are colored in shades of pink and purple.

составлена по данным ИСЗ NOAA-18,19 / AVHRR, TERRA / MODIS, MetOp-A / ASCAT © NESDIS 02-03.11.2015

У с л о в н ы е о б о з н а ч е н и я

Возрастные характеристики (толщина) дрейфующего льда в см:	Возрастные характеристики (толщина) припая в см:	Формы плавающих льда (размеры):	Обобщённые характеристики льда:
 - чистая вода	 - молодой лёд (10-30)	 - начальные виды льда	 - сплочённость льда в баллах
 - иллас, склянка (до 10)	 - тонкий однолетний (белый) лёд (30-70)	 - блинчатый лёд (0,3-3 м)	 - возрастной состав дрейфующего льда
 - серый лёд (10-15)	 - одоленный лёд средней толщины (30-70)	 - мелкобитый лёд (2-20 м)	 - общая сплочённость
 - серо-белый лёд (15-30)	 - толстый одоленный лёд (>120)	 - крупнобитый лёд (20-100 м)	 - количество более старого льда
 - тонкий одоленный (белый) лёд (30-70)	 - старый лёд	 - обломки ледяных полей (100-500 м)	 - количество более молодого льда
 - одоленный лёд средней толщины (70-120)		 - обломки ледяных полей (100-500 м)	 - толщина льда (см)
 - толстый одоленный лёд (>120)		 - большие поля (0,5-2 км)	 - торосистость льда (0-5 бал.)

a — 2–3.11.2015; b — 16–17.11.2015; g — 2–3.12.2015; z — 30–31.08.2016

¹ Карты-схемы ледовой обстановки в Чукотском море [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://planeta.infospace.ru/prod-cgi/last.pl?product=120> (дата обращения: 03.03.2021).

Из рис. 3, *а* следует, что 2–3 ноября 2015 г. вся акватория пролива Лонга и районов Арктики, по которым проходит высокоширотный маршрут СМП, была полностью свободна от ледяного покрова. На рис. 3, *б* показано, что 16–17 ноября в западной части акватории пролива ледяной покров наблюдался в форме ниласа и склянки толщиной до 10 см. Ледяной покров районов Восточно-Сибирского и Чукотского морей, по которым проходит высокоширотный маршрут СМП, состоял из серого льда толщиной до 15 см и серо-белого льда толщиной до 30 см. Из рис. 3, *в* следует, что 2–3 декабря 2015 г. весь вход в пролив Лонга со стороны Восточно-Сибирского моря уже был перекрыт серо-белым льдом толщиной до 30 см, однако в восточной части его акватории преобладали нилас и склянка. Необходимо отметить, что в западной части акватории пролива, расположенной вдоль южного берега острова Врангеля, ледяной покров был также образован ниласом и склянкой. Сравнение рис. 3, *а* и 3, *в* позволяет сделать вывод о том, что процесс образования льда в проливе Лонга в 2015 г. происходил в течение ноября. Аналогичная картина имела место и в последующие годы. Рис. 3, *г* свидетельствует о том, что 30–31 августа 2016 г. ледяной покров в изучаемом районе отсутствовал, как в сентябре и октябре. Подобная картина наблюдалась и в 2015, 2017 и 2018 гг. Таким образом, данные, представленные на рис. 3, могут служить подтверждением адекватности информации базы данных GLORYS12.v1.

При решении второй задачи оценивались средние скорости изменений ВЛ. В качестве примера на рис. 4 показаны распределения ССВЛ в июле и ноябре при СЛП 0,3 и 0,6.

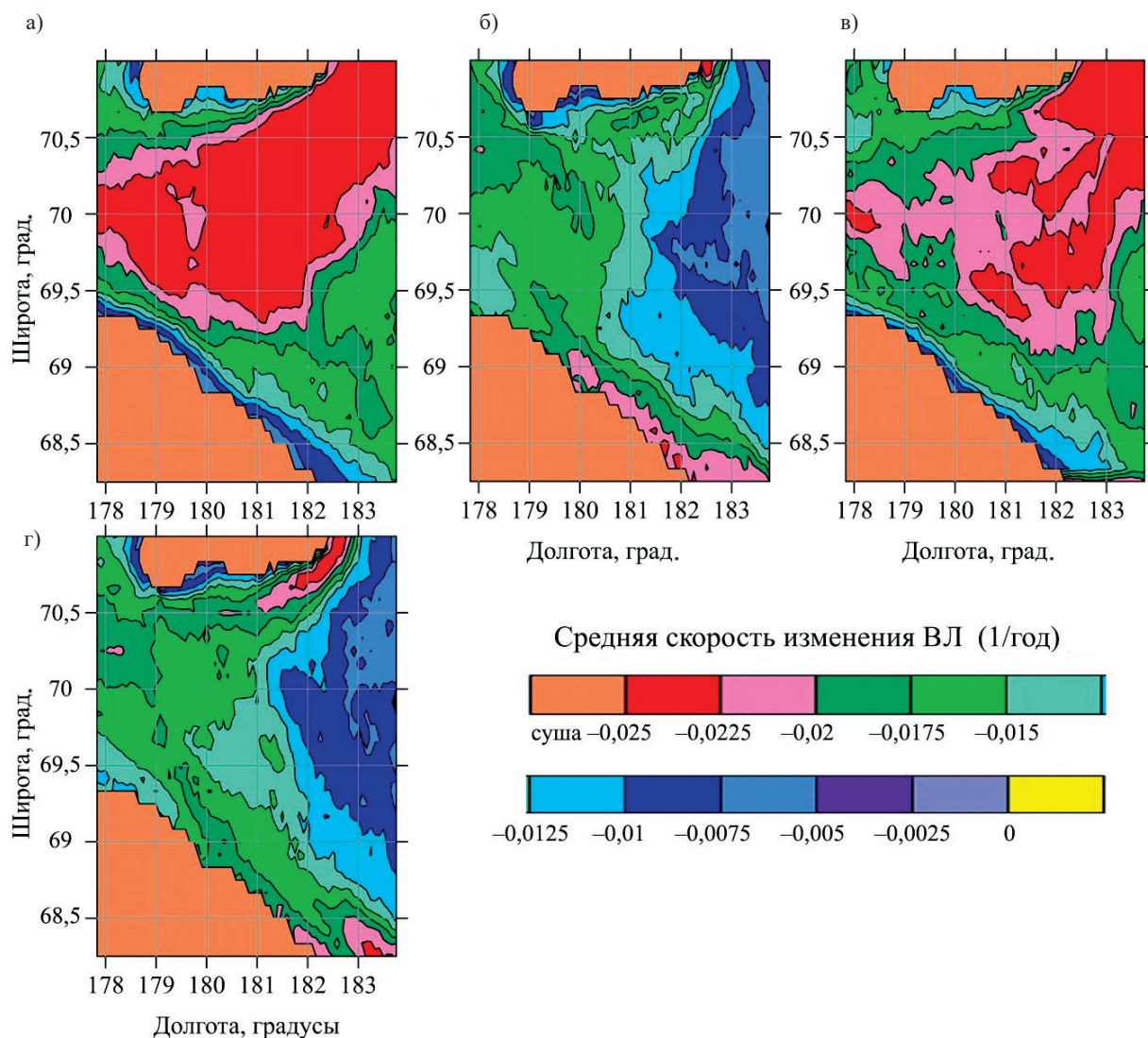


Рис. 4. Распределения средних скоростей изменения ВЛ в проливе Лонга в 1993–2018 гг.:
а — июль, СЛП = 0,6; *б* — ноябрь, СЛП = 0,6; *в* — июль, СЛП = 0,3; *г* — ноябрь, СЛП = 0,3

Из рис. 4 следует, что в ноябре и в июле везде преобладала тенденция к снижению ВЛ. Распределения ССВЛ для каждого месяца при иных значениях СЛП были схожими. Из рис. 4, *а* и *в*, видно, что ВЛ для ледяного покрова любой сплоченности в июле в северной части пролива уменьшались быстрее, чем в южной. При этом в Чукотском море они уменьшались быстрее, чем в Восточно-Сибирском. Максимальные ССВЛ в июле (более $0,03 \text{ год}^{-1}$) в пределах изучаемого района соответствовали участкам акватории Чукотского моря с координатами $71^\circ \text{ с. ш.}, 177,17^\circ \text{ з. д.}$ (для СЛП = 0,6) и $70,75^\circ \text{ с. ш.}, 177,17^\circ \text{ з. д.}$ (для СЛП = 0,3). В то же время на рис. 4, *б* и *г* видно, что при любом значении СЛП значения ВЛ для ноября в северной части пролива снижались медленнее, чем в южной. В Чукотском море (так же, как и в июле) этот процесс происходил быстрее, чем в Восточно-Сибирском. Максимальные ССВЛ для ноября достигали тех же уровней, что и в июле, но на участках акватории, расположенных непосредственно у материкового побережья Чукотского моря.

В рамках решения третьей задачи для всех участков акватории пролива Лонга за 2015–2018 гг. были вычислены средние значения ВЛ, соответствующие каждому месяцу летне-осеннего навигационного периода и разным значениям СЛП. На рис. 5 представлены распределения ВЛ в июле и ноябре.

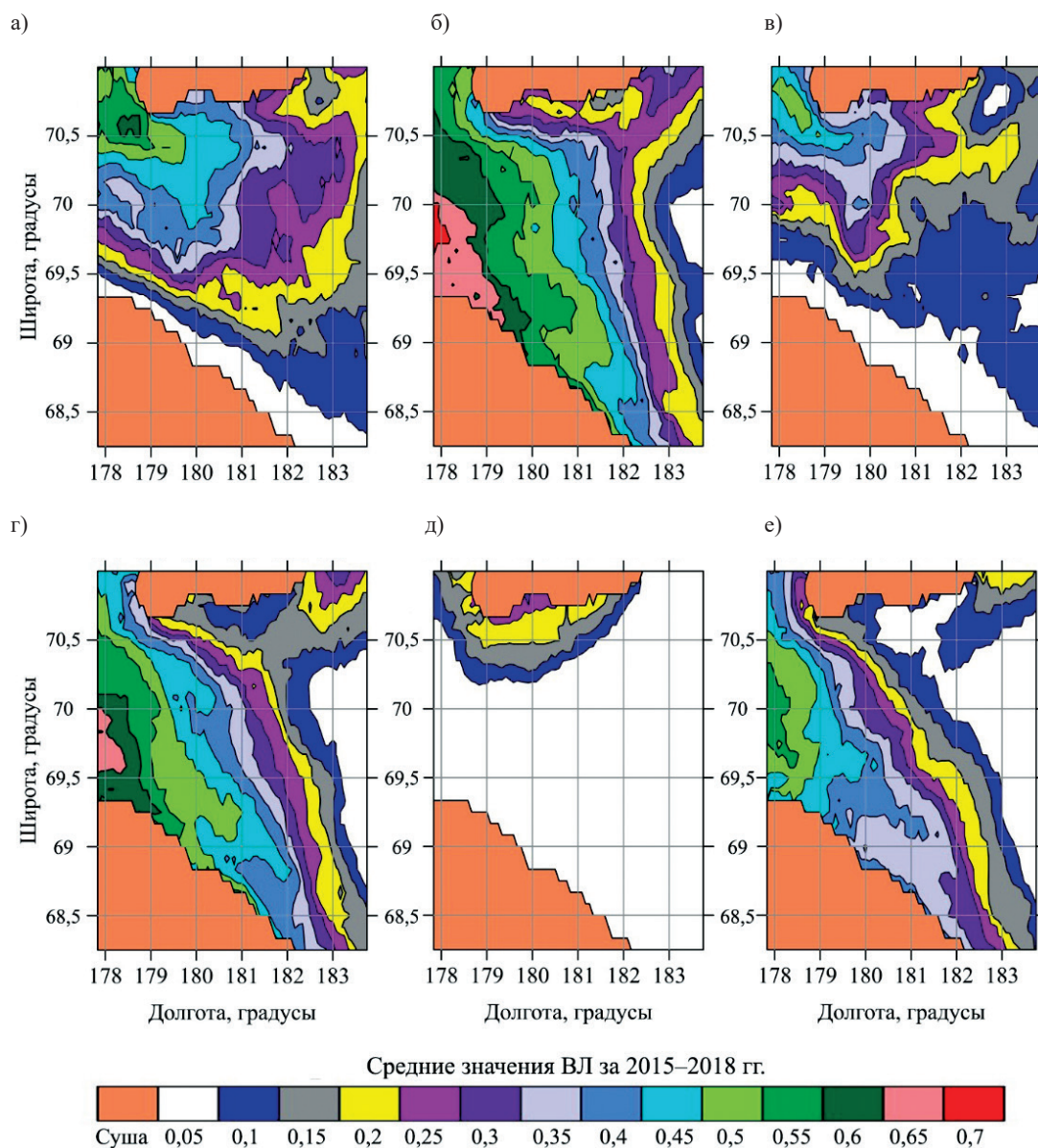


Рис. 5. Распределения средних скоростей изменения ВЛ в проливе Лонга в 2015–2018 гг.:

а — июль, СЛП = 0,4; *б* — ноябрь, СЛП = 0,4; *в* — июль, СЛП = 0,6;

г — ноябрь, СЛП = 0,6; *д* — июль, СЛП = 0,8; *е* — ноябрь, СЛП = 0,8

Как видно из рис. 5, *а, в и д*, выполненная оценка за 2015–2018 гг. июльских значений средних ВЛ для различных участков акватории пролива позволяет сделать следующие выводы:

- значения убывали по мере уменьшения широты и изменения долготы в западном направлении;
- значения ВЛ на участках Восточно-Сибирского моря у входа в пролив при любых СЛП были заметно больше, чем на участках Чукотского моря, расположенных на той же широте;
- значения данных показателей всюду монотонно убывали по мере увеличения СЛП.
- на участках акватории пролива, расположенных непосредственно вдоль арктического побережья Чукотки, значения ВЛ не превышали 0,016, 0,01 и 0 для СЛП, равных 0,4, 0,6 и 0,8 соответственно (последнее позволяет сделать вывод о том, что в современном периоде июльский ледяной покров в прибрежной части пролива Лонга отсутствует полностью или значительно разрежен).

Из рис. 5, *б, г и е* следует, что выполненная оценка за 2015–2018 гг. средних значений ВЛ для ноября на различных участках акватории пролива позволяет сделать вывод о том, что при любых значениях СЛП убывали по мере увеличения широты и изменения долготы в западном направлении. Вместе с тем на участках акватории Восточно-Сибирского моря у входа в пролив при любых значениях СЛП значения ВЛ были заметно больше, чем для участков акватории Чукотского моря, расположенных на тех же параллелях. На участках, расположенных непосредственно вдоль арктического побережья Чукотки, значения ВЛ для ноября превышали 0,516, 0,42 и 0,35 при значениях СЛП 0,4, 0,6 и 0,8 соответственно. В то же время на участках, расположенных вдоль южного берега острова Врангеля, ноябрьские значения ВЛ не превышали 0,2, 0,1 и 0,05 при тех же значениях СЛП. Выполненные оценки свидетельствуют о том, что на маршруте, проходящем вдоль южного берега острова Врангеля в 2015–2018 гг., сплоченные льды в ноябре встречались значительно реже, чем у северного побережья Чукотки.

Оценки средних по акватории пролива Лонга значений меридиональной и зональной проекций градиента ВЛ для июля и ноября 2015–2018 гг. представлены в таблице.

**Меридиональные и зональные проекции градиента ВЛ
для июля и ноября 2015–2018 гг.**

Сплоченность льда	Меридиональные проекции		Зональные проекции	
	Июль	Ноябрь	Июль	Ноябрь
0,3	0,01622	–0,00811	–0,00281	–0,00811
0,4	0,01531	–0,00819	–0,00275	–0,00815
0,5	0,01429	–0,00932	–0,00254	–0,00819
0,6	0,01327	–0,01046	–0,00232	–0,00823
0,7	0,00921	–0,01023	–0,00155	–0,00786
0,8	0,00515	–0,00999	–0,00078	–0,00749
0,9	0,00313	–0,00953	–0,00023	–0,00713

На основании табличных данных можно сделать вывод о том, что средние значения за 2015–2018 гг. ВЛ в проливе Лонга для июля возрастали по мере увеличения широты. Скорость этого процесса была тем больше, чем меньше СЛП. Из таблицы также видно, что средние за 2015–2018 гг. значения ВЛ для ноября, по мере увеличения широты, возрастали. Скорость этого процесса максимальна при СЛП более 0,6, что соответствует представлениям о закономерностях происходящего в ноябре ледообразования [23]. В июле ледяной покров Чукотского моря разрушался быстрее, а в ноябре ледообразование происходило менее интенсивно, чем аналогичные процессы в Восточно-Сибирском море.

Обсуждение (Discussion)

Результаты решения первой задачи в целом подтверждают существующие представления о влиянии глобального потепления климата на изменения ледяного покрова Арктики. Наличие убывающих трендов в изменениях СЛП любых ее районов описаны в работах многих авторов [1], [10], [23].

Не является неожиданным также присутствие в межгодовых изменениях ВЛ составляющей с периодом 2–4 года, характерной для изменения поверхностных температур многих регионов Мирового океана. Тем не менее упоминаний о существенном увеличении ВЛ в проливе Лонга в июле, октябре и ноябре, имевшем место в 1998–2001 и 2010–2013 гг., в литературе нет.

Результаты, полученные в рамках решения второй задачи, позволяют предположить, что если в будущем современные тенденции изменения ледяного покрова сохранятся, то в июле наиболее быстрое снижение СЛП будет происходить в северо-восточной части пролива и прилегающих к нему районах Чукотского моря. В августе–октябре льда в проливе не будет, а в ноябре ССВЛ максимально быстро будут уменьшаться у северного и южного побережий пролива. Ледяной покров на прилегающих к проливу акваториях Чукотского моря в июле будет разрушаться быстрее, а в ноябре формироваться позже, чем на аналогичных акваториях Восточно-Сибирского моря.

Результаты решения третьей задачи также являются вполне прогнозируемыми. Представленное в табличной форме распределение градиентов ВЛ в июле можно объяснить тем, что таяние ледяного покрова происходит в основном за счет тепла, получаемого от воды. При прочих равных условиях чем меньше СЛП, тем больше тепла приходится на единицу объема ледяного покрова и тем выше интенсивность таяния.

В рамках обсуждения следует обратить внимание на имеющиеся для судоходства риски. Они, очевидно, будут повышаться там, где наблюдается тенденция к повышению ВЛ. Из полученных результатов следует, что подобная ситуация имела место в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. Оценим далее их динамику и степень влияния на судоходство.

Для каждого участка изучаемого района оценим значения показателей Δ_1 и Δ_2 , определяемых соотношениями:

$$\Delta_1 = \text{ВЛ}(1998\text{--}2001) - \text{ВСЛ}(1997\text{--}2000);$$

$$\Delta_2 = \text{ВЛ}(2010\text{--}2013) - \text{ВСЛ}(2009\text{--}2012),$$

где $\text{ВЛ}(X - Y)$ — среднее значение ВЛ для определенного месяца, рассчитанное за период времени $X - Y$ гг.

Очевидно, что если для некоторого участка акватории значения ВЛ для периодов времени 1998–2001 и 2010–2013 гг. являются повышенными, то соответствующие ему значения Δ_1 и Δ_2 положительны. Распределения Δ_1 и Δ_2 по акватории пролива для июля, октября и ноября для наглядности были представлены на контурных картах с применением триангуляции Делоне. В качестве примера на рис. 6 приводятся распределения, соответствующие ноябрю и СЛП = 0,6.

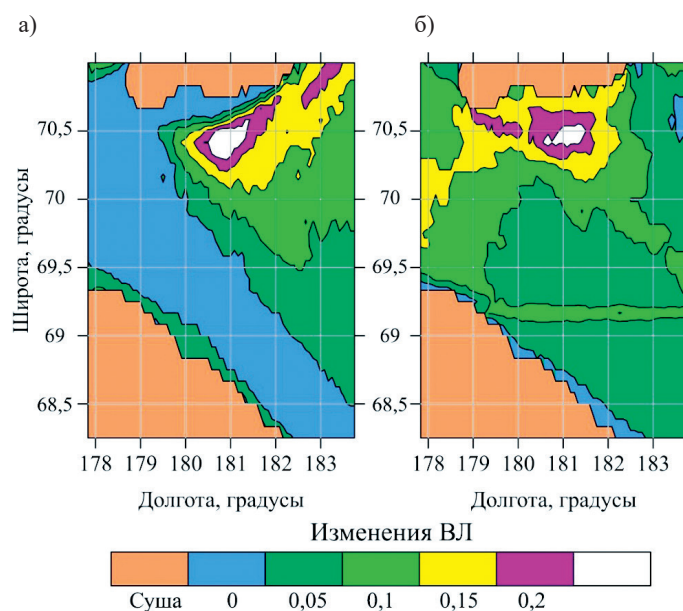


Рис. 6. Соответствующие ноябрю и СЛП = 0,6 распределения значений по акватории пролива Лонга: а — Δ_1 ; б — Δ_2

Из рис. 6 видно, что в периоды, соответствующие обоим максимумам ВЛ, повышение значений этих показателей происходило в основном на участках, расположенных в проливе Лонга и на подходах к нему. Доли участков, где в ноябре 1998–2001 и 2010–2013 гг. наблюдались повышения ВЛ, составили, соответственно, 52 % и 96 %. Участки акватории с максимальным повышением рисков для судоходства в ноябре были расположены в северной части пролива Лонга, у южного берега острова Врангеля на траверзе бухт Красина и Сомнительная (несколько восточнее линии перемены дат). В этом районе проходит один из рекомендованных маршрутов движения транзитных судов в данный сезон.

Следует отметить, что в период 2015–2018 гг. значения ВЛ, а следовательно, и риски для судоходства в ноябре на этих участках были минимальными. Аналогичный вывод справедлив и для октября. Для этого месяца доли участков, где в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. наблюдались повышения ВЛ, составили, соответственно, 63 % и 88 %. Таким образом, в ноябре риски для судоходства возросли примерно на 33 % по сравнению с октябрем. Аналогичные распределения Δ_1 и Δ_2 для июля приведены на рис. 7.

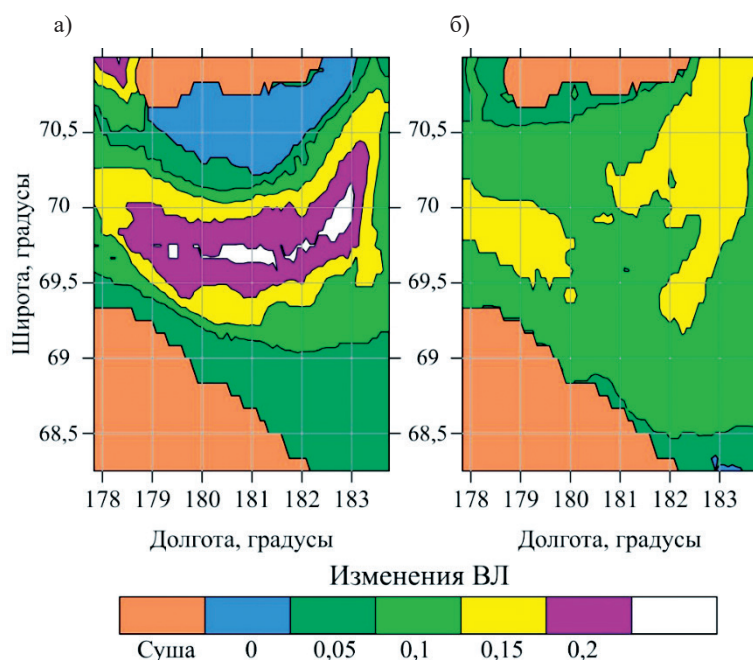


Рис. 7. Соответствующие июлю и СЛП = 0,6
распределения значений по акватории пролива Лонга: а — Δ_1 ; б — Δ_2

Данные рис. 7 свидетельствуют о том, что в обоих периодах, соответствующих максимумам многолетних изменений ВЛ в июле, повышение значений этих показателей по сравнению с предыдущими периодами произошло в основном в центральной зоне изучаемого района. При этом участки акватории, соответствующие наибольшим значениям Δ_1 и Δ_2 , располагались непосредственно в проливе, а также на прилегающих к нему акваториях Чукотского и Восточно-Сибирского морей. Доли участков акватории, где в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. наблюдались повышения ВЛ, составили, соответственно, 72 % и 98 %. При этом в оба периода, когда значения ВЛ в июле достигали максимумов, существенного увеличения этих показателей на рекомендованном маршруте движения судов (вдоль арктического берега полуострова Чукотка) не наблюдалось. Поэтому происходившее в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. осложнение ледовых условий в проливе Лонга на безопасность судоходства практически не повлияло.

Эффект повышения ВЛ в проливе Лонга возникал синхронно на большей части его акватории, а расположения участков, на которых он проявлялся в наибольшей степени, в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. совпадали. При этом доли общего количества участков акватории, на которых эффект проявлялся, в 2010–2013 гг. заметно увеличились.

Выводы (Conclusion)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В проливе Лонга за период 1993–2018 гг. наблюдается устойчивая тенденция к сокращению сплоченности ледяного покрова в летне-осенний навигационный период. Риски для судоходства, связанные с возможностью встретить лед с характеристиками, превышающими допустимые по ледовому классу, снижаются по всей акватории пролива. Доступный с августа по октябрь период безледокольной навигации постепенно увеличивается.
2. В июле и ноябре вероятность встретить опасный лед в проливе уменьшается по мере продвижения с востока на запад. В июле она уменьшается также по мере уменьшения широты (наиболее благоприятные условия существуют на рекомендованном пути вдоль побережья полуострова Чукотка). В ноябре ледовые риски для судов в проливе по мере уменьшения широты, наоборот, возрастают. Наиболее благоприятные условия для судоходства в этом месяце существуют у южного берега острова Врангеля.
3. В 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. зафиксированы временные ухудшения ледовой обстановки. Наибольшее увеличение ледовых рисков (до 20 %) имело место в ноябре у южного берега острова Врангеля (на траверзе бухты Сомнительная), а в июле — в зоне, расположенной в центральной части пролива к северу от рекомендованного маршрута, однако на условия навигации они не оказали существенного влияния.
4. Реанализ GLORYS12.v1 вполне адекватно описывает состояние ледяного покрова в проливе Лонга и может в дальнейшем использоваться при оценке тенденций его изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shibata H. Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980–2011 / H. Shibata, K. Izumiya, K. Tateyama, H. Enomoto, S. Takahashi // *Annals of Glaciology*. — 2013. — Vol. 54. — Is. 62. — Pp. 139–148. DOI: 10.3189/2013AoS62A123.
2. Aksenov Y. On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice / Y. Aksenov, E. E. Popova, A. Yool, A. G. Nurser, T. D. Williams, L. Bertino, J. Bergh // *Marine Policy*. — 2017. — Vol. 75. — Pp. 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
3. Melia N. Future of the Sea: Implications from Opening Arctic Sea Routes / N. Melia, K. Haines, E. Hawkins. — Foresight, Government Office for Science, 2017. — 39 p.
4. Stephenson S. R. Marine accessibility along Russia's Northern Sea route / S. R. Stephenson, L. W. Brigham, L. C. Smith // *Polar Geography*. — 2014. — Vol. 37. — Is. 2. — Pp. 111–133. DOI: 10.1080/1088937X.2013.845859.
5. Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
6. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.
7. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
8. Шаронов А. Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
9. Юлин А. В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря / А. В. Юлин, М. В. Шаратунова, Е. А. Павлова, В. В. Иванов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2018. — Т. 64. — № 3 (117). — С. 229–240. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240.

10. Егоров А. Г. Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в. / А. Г. Егоров, Е. А. Павлова // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2019. — Т. 65. — № 4. — С. 389–404. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404.
11. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под редакцией В. Г. Смирнова. — СПб.: ААНИИ, 2011. — 240 с.
12. Telet P. R. Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing / P. R. Telet, A. J. Luis // International Journal of Geosciences. — 2013. — Vol. 4. — No. 7. — Pp. 1031–1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.
13. Andersen S. Intercomparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high-concentration Arctic sea ice / S. Andersen, R. Tonboe, L. Kaleschke, G. Heygster, L. T. Pedersen // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2007. — Vol. 112. — Is. C8. DOI: 10.1029/2006JC003543.
14. Meier W. N. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic Peripheral Seas // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. — 2005. — Vol. 43. — Is. 6. — Pp. 1324–1337. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846151.
15. Spreen G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels / G. Spreen, L. Kaleschke, G. Heygster // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2008. — Vol. 113. — Is. C2. DOI: 10.1029/2005JC003384.
16. Agnew T. The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data / T. Agnew, S. Howell // Atmosphere–Ocean. — 2003. — Vol. 41. — Is. 4. — Pp. 317–331. DOI: 10.3137/ao.410405.
17. Ivanova N. Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms / N. Ivanova, O. M. Johannessen, L. T. Pedersen, R. T. Tonboe // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2014. — Vol. 52. — Is. 11. — Pp. 7233–7246. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310136.
18. Knuth M. A. Summer and early-fall sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates / M. A. Knuth, S. F. Ackley // Annals of Glaciology. — 2006. — Vol. 44. — Pp. 303–309. DOI: 10.3189/172756406781811466.
19. Ivanova N. Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: an optimal algorithm and challenges / N. Ivanova, L. T. Pedersen, R. T. Tonboe, S. Kern, G. Heygster, T. Laverigne, A. Sørensen, R. Saldo, G. Dybkjaer, L. Brucker, M. Shokr // The Cryosphere Discussions. — 2015. — Vol. 9. — Pp. 1269–1313. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.
20. Тихонов В. В. Мониторинг морского льда полярных регионов с использованием спутниковой микроволновой радиометрии / В. В. Тихонов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12. — № 5. — С. 150–169.
21. Vichi M. Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model (Nucleus for the European Modelling of the Ocean). BFM report series. No. 2. Release 1.0. / M. Vichi, T. Lovato, E. Gutierrez Mlot, W. McKiver. — The BFM System Team, 2015. — 31 p.
22. Бокс Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / пер. с англ. / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; под ред. В. Ф. Писаренко. — М.: Мир, 1974. — Кн. 1. — 406 с.
23. Думанская И. О. Ледовые условия морей азиатской части России / И. О. Думанская. — М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2017. — 640 с.

REFERENCES

1. Shibata, Hiroki, Koh Izumiyama, Kazutaka Tateyama, Hiroyuki Enomoto, and Shuhei Takahashi. “Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980–2011.” *Annals of Glaciology* 54.62 (2013): 139–148. DOI: 10.3189/2013AoG62A123.
2. Aksenov, Yevgeny, E. E. Popova, A. Yool. A. J. G. Nurser, Timothy D. Williams, Laurent Bertino, and Jon Berg. “On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice.” *Marine Policy* 75 (2017): 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
3. Melia, Nathanael, Keith Haines, and Ed Hawkins. *Future of the Sea: Implications from Opening Arctic Sea Routes*. Foresight, Government Office for Science, 2017.
4. Stephenson, Scott R., Lawson W. Brigham, and Laurence C. Smith. “Marine accessibility along Russia’s Northern Sea route.” *Polar Geography* 37.2 (2014): 111–133. DOI: 10.1080/1088937X.2013.845859.

5. Ol'khovik, Evgeniy O. "Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 975-982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
6. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Prospects for unescorted navigation of transit vessels in the region of the New Siberian islands." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 683-695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.
7. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Prospects for unescorted navigation of arc7 ice-class vessels in the region of the new siberian islands during the winter period." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 867-879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
8. Sharonov, Andrei Yu., and Vladimir A. Shmatkov. "The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 170-182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
9. Yulin, A.V., M. V. Sharatunova, E. A. Pavlova, and V. V. Ivanov. "Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' ledyanykh massivov Vostochno-Sibirskogo moray." *Arctic and Antarctic Research* 64.3(117) (2018): 229-240. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240.
10. Egorov, A. G., and E. A. Pavlova. "Change in the time of stable ice formation in the Russian Eastern Arctic seas at the beginning of 21st century." *Arctic and Antarctic Research* 65.4 (2019): 389-404. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404.
11. *Sputnikovyie metody opredeleniya harakteristik ledyanogo pokrova morej*. Smirnov, V.G., ed. SPb.: AANII, 2011.
12. Teleti, Praveen Rao, and Alvarinho J. Luis. "Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing." *International Journal of Geosciences* 4.7 (2013): 1031-1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.
13. Andersen, Soren, Rasmus Tonboe, Lars Kaleschke, Georg Heygster, and Leif Toudal Pedersen. "Inter-comparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high-concentration Arctic sea ice." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 112.C8 (2007). DOI: 10.1029/2006JC003543.
14. Meier, Walter N. "Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic Peripheral Seas." *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 43.6 (2005): 1324-1337. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846151.
15. Spreen, Gunnar, Lars Kaleschke, and Georg Heygster. "Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113.C2 (2008). DOI:10.1029/2005JC003384.
16. Agnew, Tom, and Stephen Howell. "The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data." *Atmosphere-Ocean* 41.4 (2003): 317-331. DOI: 10.3137/ao.410405.
17. Ivanova, Natalia, Ola M. Johannessen, Leif Toudal Pedersen, and Rasmus T. Tonboe. "Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52.11 (2014): 7233-7246. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310136.
18. Knuth, Margaret A., and Stephen F. Ackley. "Summer and early-fall sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates." *Annals of Glaciology* 44 (2006): 303-309. DOI: 10.3189/172756406781811466.
19. Ivanova, N., L. T. Pedersen, R. T. Tonboe, S. Kern, G. Heygster, T. Lavergne, A. Sørensen, R. Saldo, G. Dybkjaer, L. Brucker, and M. Shokr. "Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: an optimal algorithm and challenges." *The Cryosphere Discussions* 9 (2015): 1269-1313. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.
20. Tikhonov, V. V., M. D. Raev, E. A. Sharkov, D. A. Boyarskii, I. A. Repina, and N. Yu. Komarova. "Polar sea ice monitoring using satellite microwave radiometer data." *Current problems in remote sensing of the Earth from space* 12.5 (2015): 150-169.
21. Vichi, M., T. Lovato, E. Gutierrez Mlot, and W. McKiver. *Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model (Nucleus for the European Modelling of the Ocean)*. BFM report series. No. 2. Release 1.0. The BFM System Team, 2015.
22. Box, George E. P., Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel, and Greta M. Ljung. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 5th Edition. John Wiley and Sons Inc., 2015.
23. Dumanskaya, I. O. *Ledovye usloviya morei aziatskoi chasti Rossii*. M.; Obninsk: IG-SOTsIN, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor
Sevastopol branch of FSBI
“N. N. Zubov’s State Oceanographic
Institute”
61 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 21 марта 2021 г.
Received: March 21 2021.*