

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-691-700

STUDYING POLYNIA OCCURRENCE TERMS AND DURATION ON THE SHIPPING ROUTES IN THE LAPTEV SEA

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

¹ — Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”,
Sevastopol, Russian Federation

² — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The dynamics of the development of the Lena polynya formed on the shipping routes of the Northern Sea Route in the Laptev Sea and its influence on the conditions of navigation in the Arctic are studied. During the period of winter-spring navigation in the Laptev Sea, the Great Siberian polynya, which is located near the fast ice border and creates good opportunities for winter navigation on the Northern Sea Route, is formed. This problem is important to ensure year-round navigation in the Eastern Sector of the Northern Sea Route. The hypothesis that the terms of a polynya occurrence can significantly affect the average rate of its growth is tested in the study. When checking, the results of the GLORYS12v1 global reanalysis and standard methods of mathematical statistics are used. On the example of the polynya section located on the estuary seashore of the largest navigable channel of the Lena River Delta — Bykovskaya, the validity of the hypothesis is confirmed. Steady trends in the change in the polynya formation terms towards earlier dates in the modern period are revealed. A high probability of improving the conditions of navigation in this region in 2020–2040 is noted. At the same time, with further warming of the Siberian climate, the opposite process, namely, the freezing of a polynya that formed too early, which will lead to a cooling of the climate in the region and a deterioration in navigation conditions, is possible. Comparing the results obtained with other studies that are devoted to the construction of general routes for ships in various ice conditions, it is possible to identify trends that the actual routes during independent navigation pass along the forming polynyas, regardless of the physical principle of their formation, then the choice of general routes for ships in the areas of polynya distribution will be promote more intensive and safe shipping. What requires accurate forecasts of its size and position. The relevance of the research results for forecasting year-round navigation, both for independent navigation of ships with a high ice class, and in the development of plans for using icebreaking escort of ships, is noted.

Keywords: Northern Sea Route, shipping, the Laptev Sea, Lena polynya, growth rate, total solar radiation, heat balance, climate change.

For citation:

Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Studying polynya occurrence terms and duration on the shipping routes in the Laptev Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 691–700. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-691-700.

УДК 656.61.052: 551.583

ИССЛЕДОВАНИЕ СРОКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЫНИИ НА СУДОХОДНЫХ МАРШРУТАХ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

А. В. Холопцев^{1,2}, С. А. Подпорин^{1,2}

¹ — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

² — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Российская Федерация

Исследуется динамика развития образующейся на судоходных маршрутах Северного морского пути в море Лаптевых Ленской полыньи и ее влияние на условия судоходства в Арктике. В период зимне-весенней навигации в море Лаптевых образуется Великая Сибирская полынья, которая расположена вблизи границы припая и создает хорошие возможности для зимней навигации на Северном морском пути. Данная задача

является важной для обеспечения круглогодичной навигации в Восточном секторе Северного морского пути. В исследовании проверяется гипотеза о том, что сроки возникновения полыньи могут оказывать значительное влияние на среднюю скорость ее роста. При проверке использованы результаты глобального реанализа GLORYS12v1 и стандартные методы математической статистики. На примере участка полыньи, расположенного на приустьевом взморье крупнейшей судоходной протоки дельты реки Лена – Быковской, справедливость гипотезы подтверждена. Выявлены устойчивые тенденции изменения сроков образования полыньи в сторону более ранних дат в современном периоде. Отмечена высокая вероятность улучшения условий судоходства в данном регионе в 2020–2040 гг. Вместе с тем при дальнейшем потеплении климата Сибири возможен обратный процесс — замерзание слишком рано образовавшейся полыньи, что будет приводить к похолоданию климата в регионе и ухудшению условий судоходства. Сравнивая полученные результаты с другими исследованиями, которые посвящены построению генеральных маршрутов судов в различных ледовых условиях, можно выявить тенденции прохождения фактических маршрутов при самостоятельном плавании вдоль образующихся полыней, независимо от физического принципа их образования и тогда выбор генеральных маршрутов для судов в районах распространения полыньи будет способствовать более интенсивному и безопасному судоходству. Для этого требуются точные прогнозы ее размеров и положения. Отмечается актуальность результатов исследований для прогнозирования круглогодичного судоходства как для самостоятельного плавания судов с высоким ледовым классом, так и для разработки планов использования ледокольного сопровождения судов.

Ключевые слова: Северный морской путь, судоходство, море Лаптевых, Ленская полынья, скорость роста, суммарная солнечная радиация, тепловой баланс, перемены климата.

Для цитирования:

Холопцев А. В. Исследование сроков возникновения и продолжительности полыньи на судоходных маршрутах в море Лаптевых / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 691–700. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-691-700.

Введение (Introduction)

Море Лаптевых наряду с Восточно-Сибирским является наиболее сложным среди морей Северного ледовитого океана для осуществления судоходства по Северному морскому пути в течение всего периода навигации. Тяжелая ледовая обстановка моря Лаптевых представляет проблему для судов даже с самым высоким ледовым классом. Вместе с тем развитие арктического судоходства предполагает расширение круглогодичной навигации, в том числе в восточных арктических морях. Последнее возможно при значительном повышении качества гидрометеорологического обеспечения судоходства и наличии более точных прогнозов ледовой обстановки, позволяющих выбирать наиболее безопасные маршруты.

Наиболее эффективным и безопасным видом плавания в замерзающих арктических морях является навигация по полыньям. В этой связи судоводителям крайне важно иметь точные прогнозы их состояния и развития. Усовершенствование методик прогнозирования средних скоростей роста (далее — ССР) полыней представляет собой актуальную проблему гидрографии, океанографии и безопасности судоходства. Зимой и весной в море Лаптевых образуется Великая Сибирская полынья, которая находится вблизи границы припая [1]–[3] и создает возможности для зимней навигации на Северном морском пути (далее — СМП) [4]–[6]. Полыньи образуются также летом на приустьевых взморьях рек. Крупнейшая из таких полыней расположена на взморье реки Лена, непосредственно на маршруте движения судов, следующих в порт Тикси. Через нее проходит также участок прибрежного маршрута СМП. Судоходство в рассматриваемом районе моря Лаптевых в настоящее время осуществляется в основном в летне-осенние месяцы. Развитие существующих представлений о закономерностях роста Ленской полыньи позволяет повысить эффективность управления движением судов по данным маршрутам.

Выявлению закономерностей, проявляющихся в изменениях характеристик ледяного покрова моря Лаптевых в летние месяцы, посвящены работы [3], [7]–[10]. Установлено, что Ленская полынья развивается в основном под влиянием двух процессов, первым из которых является поглощение суммарной солнечной и тепловой радиации (далее — СТР) ее водами, вторым — потери ими тепла при испарении с поверхности, а также при теплообмене с окружающей водной средой

и атмосферой. Образование Ленской полыньи начинается на приустьевых взморьях протоков дельты Лены в периоды половодий. Главную роль в этом играют половодья, образующиеся в судоходных протоках дельты Быковской, Трофимовской и Оленекской. Наиболее глубокой и широкой из них является Быковская протока, по которой проходит кратчайший путь движения судов из реки Лена в порт Тикси. Во время половодья на приустьевом взморье каждой из этих протоков уровень водной поверхности повышается. В результате взламывается образовавшийся здесь припай и образуются стоковые течения, уносящие обломки льда от берегов. На приустьевых взморьях указанных протоков формируются полыньи, которые в дальнейшем объединяются в единую Ленскую полынью.

Альbedo свободной водной поверхности существенно меньше, чем альbedo морского льда. Поэтому образовавшийся участок полыньи начинает более интенсивно поглощать СТР. Возрастает и интенсивность потерь полыньями тепла, поскольку со свободной водной поверхности при прочих равных условиях поток испаряемой влаги значительно больше, чем с поверхности льда. Поскольку воды полыньи при поглощении СТР нагреваются, повышается интенсивность их теплообмена с атмосферой и окружающими морскими водами. Чем больше значение разности потоков тепла, выделяющегося в водах полыньи и теряемого ими, тем быстрее происходит таяние льда, окружающего полынью, а также ее дальнейший рост.

Половодье в дельте реки Лены происходит в период полярного дня (июнь–июль). Очевидно, что чем позже оно начнется, тем меньшее количество СТР будет поглощено полыньей и меньше будет разность потоков образовавшегося в ней и утраченного тепла и следовательно, это вызовет замедление ее роста. Данные закономерности позволяют выдвинуть следующую гипотезу: чем раньше образуется Ленская полынья, тем больше будет средняя скорость ее роста, и связь между этими процессами может являться статистически значимой. Эта гипотеза не является тривиальной, так как образование Ленской полыньи — процесс многофакторный. К числу значимых факторов ее ССР относятся запасы снега, накопившиеся к началу половодья в области питания Лены, интенсивность лесных пожаров в Сибири и другие процессы. Следовательно, несмотря на наличие причинной связи между изучаемыми процессами, она может не являться значимой.

Сроки половодий в дельте реки Лены зависят от сроков половодий в соответствующих областях ее бассейна. Мониторинг изменений температурного режима в бассейне Лены, непосредственно определяющий эти сроки, осуществляют расположенные в этом районе метеостанции Росгидромета [11]. Таким образом, если данная гипотеза окажется справедливой, то информацию с этих станций можно будет использовать при прогнозировании как ССР, так и размеров, которых Великая Сибирская полынья может достигнуть к определенной дате, что, в свою очередь, позволит принимать более обоснованные решения о сроках открытия навигации. Проверка подобной гипотезы ранее не проводилась.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Целью настоящей работы является проверка выдвинутой гипотезы, а также определение участков акватории моря Лаптевых, для которых изменения дат образования Великой Сибирской полыньи оказывают значительное влияние на межгодовые изменения среднемесячной сплоченности их ледяного покрова. Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

- 1) выполнена оценка дат образования полыньи в районе устья Быковской протоки и расположенном севернее районе моря Лаптевых, через который проходит прибрежный маршрут СМП;
- 2) выполнена оценка значимости статистической связи межгодовых изменений ССР Великой Сибирской полыньи с вариациями дат ее образования;
- 3) выполнена определение участков акватории моря Лаптевых, для которых статистические связи вариаций дат образования полыньи и межгодовых изменений сплоченности их ледяного покрова (Sea ice Concentration, далее — СЛП/SIC) являлись значимыми.

При решении указанных задач в качестве фактического материала использованы оценки среднесуточных значений СЛП Мирового океана, представленные в реанализе GLORYS12v1 [12], разработанном с применением математических моделей семейства NEMO [13], верифицируемых

по результатам спутникового мониторинга СЛП. В процессе мониторинга измерения СЛП выполнялись с применением пассивного метода спутниковой радиометрии [14], [15], реализованного в инструментах SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager) и SSMI/S (Special Sensor Microwave Imager/Sounder), функционирующих на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) [15]. В реанализе GLORYS12v1 оценки СЛП представлены за каждые сутки периода 1.01.1993–31.12.2019 гг. для всех участков изучаемой акватории, соответствующих узлам его координатной сетки с шагом 5 угл. мин. При тестировании эти оценки были сопоставлены с информацией о распределениях в акватории моря Лаптевых значений СЛП, представленных в [16]. Тестирование подтвердило их адекватность.

Как известно [8], полыньей принято называть участок ледяного покрова водоема, на котором льды являются разреженными или молодыми. Тем не менее при разработке методики решения первой задачи было принято упрощающее допущение о том, что на дату образования полыньи в ледяном покрове некоторого района моря среднесуточные значения СЛП всех его участков впервые за сезон снижаются до нуля.

Оценки $D_1(t)$ и $D_2(t)$ определялись для каждого года t периода 1993–2019 гг. для двух районов. Первый район расположен в непосредственной близости от устья Быковской протоки. Его границами являются меридианы 130° в. д. и 132° в. д., а также параллели 72° с. ш. и 72.08333° с. ш. Второй район расположен между теми же меридианами, но севернее — непосредственно на прибрежном маршруте СМП между параллелями 73° с. ш. и 73.08333° с. ш. К юго-западу от второго района расположено устье еще одной судоходной, но, как правило, менее полноводной протоки дельты Лены — Трофимовской. Вследствие различия протяженности (106 км и 142 км соответственно), а также неизменности многих гидрологических характеристик Быковского и Трофимовского протоков [17] даты половодий, наблюдающихся там в разные годы, имеют практически одинаковый временной интервал. Предполагалось, что влияние половодья на Трофимовской протоке на ледяной покров второго района, по сравнению с половодьем на Быковской протоке, является малым.

При решении второй задачи значение ССР оценивалось как средняя скорость продвижения северной кромки полыньи, образовавшейся при половодье на Быковской полынье, из района 1 в район 2. Указанный показатель вычислялся в виде $ССР(t) = 111 / (D_2(t) - D_1(t))$. При оценке значимости связи между временными рядами, отражающими изменения $D_1(t)$ и $ССР(t)$ в 1993–2019 гг., был применен метод корреляционного анализа и критерий Стьюдента [18]. Предварительно в сопоставляемых временных рядах скомпенсированы присутствующие в них линейные тренды. Значение коэффициента корреляции полученных рядов сопоставлялось с пороговыми уровнями, соответствующими той или иной степени достоверности вывода о значимости связи между ними.

При решении третьей задачи такой же подход применен для выявления участков акватории моря Лаптевых, где в 1993–2019 гг. межгодовые изменения $D_1(t)$ были значимо связаны с вариациями их СЛП. Выявлялись районы, для которых вывод о значимости таких связей характеризуется достоверностью не ниже 0,90, 0,95 и 0,99. С этой целью для всех районов были вычислены значения коэффициента корреляции данных процессов, впоследствии сопоставленные с соответствующими пороговыми уровнями, которые определены с учетом числа степеней свободы рассматриваемых временных рядов и составляют 0,36, 0,40 и 0,53. Результаты корреляционного анализа на картах района представлены в виде выделенных областей с теми или иными значениями коэффициента корреляции.

Рассмотренная методика не учитывает многофакторности изучаемых процессов и основана на упрощающем допущении, которое справедливо не всегда. К тому же критерий, применяемый при определении даты образования в том или ином районе полыньи — полное исчезновение его ледяного покрова — излишне жесткий. Тем не менее для выявления качественных закономерностей и достижения цели данной работы применяемая методика вполне пригодна.

Результаты исследования и их анализ (Research Results and Their Analysis)

В процессе решения первой задачи для каждого года периода 1993–2019 гг. были изучены изменения усредненных по изучаемым районам моря Лаптевых среднесуточных значений их СЛП.

Так, на рис. 1 сопоставлены изменения указанных показателей, происходившие в период с 1 мая по 31 августа в районе 1 для двух временных интервалов: 1994–1999 гг. и 2015–2019 гг.

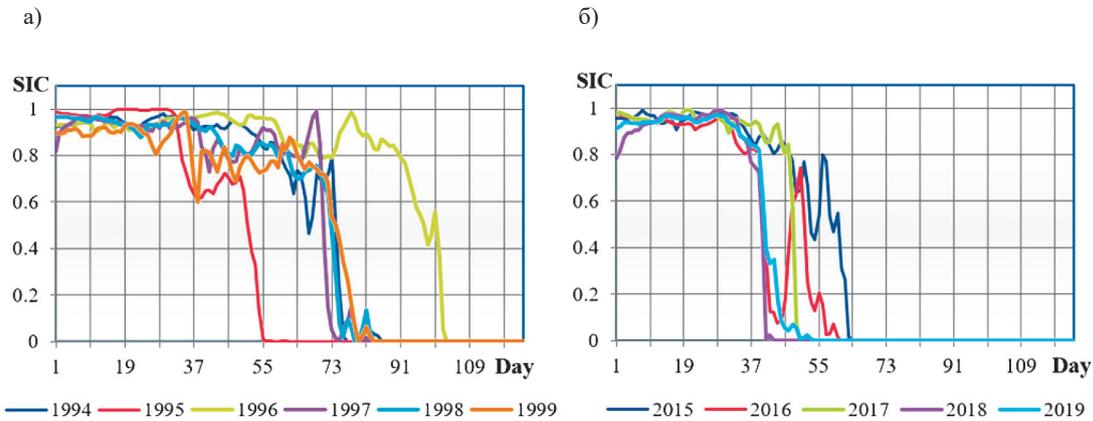


Рис. 1. Зависимости СЛП района моря Лаптевых, расположенного к востоку от бухты Тикси на параллели 72° с. ш., от даты, отсчитываемой от 1 мая, для периодов: а — 1994–1999 гг.; б — 2015–2019 гг.

Из рис. 1 видно, что сроки образования полыньи в районе устья Быковской протоки за период 1993–2019 гг. изменились. Как следует из рис. 1, а, в 1994–1999 гг. в этом районе полное исчезновение его ледового покрова происходило в период 55–104 сут, однако чаще всего подобное наблюдалось на 79–81-е сутки. На рис. 1, б видно, что в период 2015–2019 гг. полынья в районе сформировалась на 41-е–63-и сутки, т. е. в среднем на 15 суток раньше уменьшилось как среднее значение дат ее образования, так и разброс наиболее ранней и наиболее поздней дат. Так как полярный день в рассматриваемом районе начинается 9–10 мая, каждый квадратный метр поверхности рассматриваемой полыньи в период 2015–2019 гг. поглощал в течение летних месяцев гораздо больше СТР, чем в период 1994–1999 гг. В результате от него в атмосферу поступило большее количество тепла, что отразилось на процессе потепления климата данного региона Арктики. Аналогичные оценки выполнены также для второго района, что позволило для каждого из них сформировать временные ряды $D_1(t)$ и $D_2(t)$, а также вычислить соответствующие значения ССР.

На рис. 2 показаны полученные таким образом зависимости от времени значений $(D_2(t) - D_1(t)) / (D_2(t) - D_1(t))_{\max}$ и $D_1(t) / D_{1\max}$ (здесь $(D_2(t) - D_1(t))_{\max} = 14$, $D_{1\max} = 102$). Видно, что рассматриваемым зависимостям свойственно подобие (в обеих присутствуют убывающие тренды).

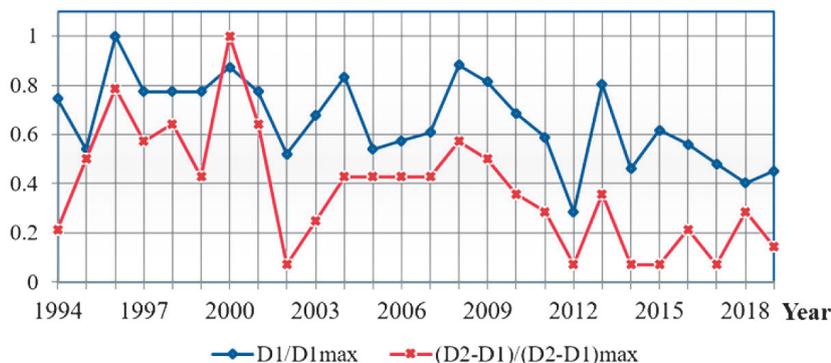


Рис. 2. Изменения $(D_2(t) - D_1(t)) / (D_2(t) - D_1(t))_{\max}$ и $D_1(t) / D_{1\max}$ в период 1994–2019 гг.

Присутствие убывающего тренда в запаздывании даты образования полыньи во втором районе по отношению к дате аналогичного события в первом районе подтверждает справедливость

принятого допущения о малости влияния половодья на Трофимовской протоке на СЛП рассматриваемого района моря Лаптевых. Из рис. 2 видно, что расположения экстремумов представленных на нем графиков практически совпадают. Вследствие этого коэффициент корреляции соответствующих временных рядов равен 0,61, откуда следует, что вывод о значимости статистической связи между ними характеризуется достоверностью не менее 0,99 (соответствующее пороговое значение коэффициента их корреляции 0,53).

Таким образом, полученный результат подтверждает справедливость выдвинутой гипотезы. Установлено, что межгодовые изменения ССР Ленской полыньи представляют собой сложное колебание, в котором присутствует возрастающий тренд. В 2004, 2012, 2014, 2015 и 2017 гг. соответствующие минимальным значениям D_1 оценки ССР составляли 111 км/сут. Последнее свидетельствует о значительном влиянии на процесс развития полыньи динамического фактора — стокового течения, обусловленного резким повышением уровня на приустьевом взморье Быковской протоки, которое за сутки, предшествующие D_1 , в указанные годы превышало 0,4 м.

В процессе решения третьей задачи было определено расположение участков акватории моря Лаптевых, для которых связи межгодовых изменений их СЛП и $D_1(t)$ являлись статистически значимыми. Наибольшее количество таких участков выявлено в июне (рис. 3), в июле их меньше, в другие месяцы их практически нет.

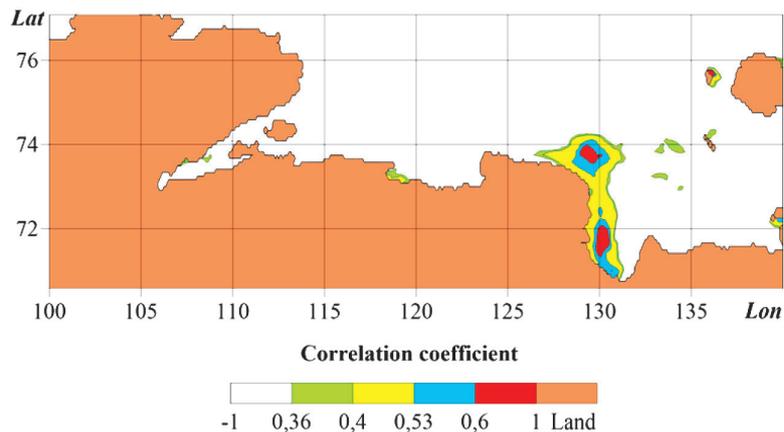


Рис. 3. Участки значимой корреляции межгодовых изменений СЛП в июне с датами образования полыньи в дельте Лены

Как следует из рис. 3, участки изучаемой акватории, для которых связи межгодовых изменений их СЛП в июне с вариациями $D_1(t)$ являются статистически значимыми, занимают западную часть губы Буор-Хая и прилегающие к ней районы моря Лаптевых. Через эти участки проходит прибрежный маршрут СМП и подходные пути к порту Тикси, что позволяет оценивать изменения их СЛП с использованием полученных зависимостей $D_1(t)$ и ССР (t).

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что существенной причиной современного потепления климата изучаемого района Арктики может являться образование в нем полыньей в более ранние даты, которые приходятся на период полярного дня. Сравнивая полученные результаты с работами [19]–[21], в которых исследовано построение генеральных маршрутов судов в различных ледовых условиях, можно выявить тенденцию прохождения фактических маршрутов судов при самостоятельном плавании вдоль образующихся полыньей, независимо от физического принципа их образования. Для восточного сектора Арктики в работах [22]–[24] также имеются сходные результаты, которые могут быть связаны как с изменением уровня воды моря Лаптевых и Восточно-Сибирского морей, так и с элементами глобального потепления и стока сибирских рек.

При сохранении текущих тенденций потепления климата в бассейне реки Лены в будущем сроки начала образования Великой Сибирской полыньи будут смещаться в сторону более ранних дат. Тем не менее из рис. 1 следует, что в ближайшие двадцать лет этот процесс будет, как и в настоящее время, происходить в период полярного дня, который начинается здесь 9–10 мая. Следовательно, ледовые условия в рассматриваемом районе моря Лаптевых в начале лета будут становиться еще более благоприятными для судоходства, но потепление климата данного района продолжится. Поскольку Лена является наиболее полноводной рекой бассейна моря Лаптевых, из полученных результатов следует, что среднее значение потока СТР, преобразуемой подстилающей поверхностью данного моря в тепло, согревающее атмосферу над ним, в 2021–2040 гг. будет увеличиваться. Поэтому вывод о потеплении климата справедлив как минимум для всей юго-восточной части рассматриваемого моря. Последнее соответствует существующим прогнозам изменений климата и ледяного покрова арктических морей [3]–[10]. Вместе с тем в процессе дальнейшего потепления климата в бассейне Лены рассматриваемая полынья начнет формироваться еще до начала полярного дня. Вследствие этого поток СТР, поглощаемой водами полыньи в дату ее образования, начнет снижаться, в отличие от потока тепла, теряемого ими, в результате чего потепление климата в изучаемом регионе Арктики замедлится и может смениться его похолоданием.

Заключение (Conclusion)

В результате исследования установлено, что скорость увеличения Великой Сибирской полыньи в летние месяцы зависит от сроков ее образования. Выявленные тенденции изменения дат образования полыньи подтверждают справедливость существующих прогнозов дальнейшего потепления климата Арктики для периода 2021–2040 гг. В эти годы изменения состояния ледяного покрова ее морей в летние месяцы будут благоприятствовать развитию судоходства Северного морского пути и освоению их природных ресурсов. При дальнейшем потеплении климата Сибири темпы потепления климата рассматриваемого региона Арктики могут, наоборот, начать снижаться, что в свою очередь может даже вызвать похолодание. С учетом этого осуществляемая в России программа развития ее ледокольного флота представляется весьма своевременной и крайне необходимой для обеспечения жизнедеятельности населения всех ее арктических регионов, а также устойчивого функционирования их экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуков А. Ю. Великая Сибирская полынья, век XXI / А. Ю. Гуков // Наука и техника Якутии. — 2009. — № 1 (16). — С. 99–103.
2. Колчак А. В. Лед Карского и Сибирского морей / А. В. Колчак // Записки Российской Академии наук. Научные результаты Русской полярной экспедиции 1900–1903 гг. под начальством Э. В. Толля: VIII серия. — СПб., 1909. — Т. XXVI. — С. 26–58.
3. Думанская И. О. Ледовые условия морей азиатской части России / И. О. Думанская. — М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2017. — 640 с.
4. Beveridge L. Interest of Asian shipping companies in navigating the Arctic / L. Beveridge, M. Fournier, F. Lasserre, L. Huang, P. L. Têtu // Polar Science. — 2016. — Vol. 10. — Is. 3. — Pp. 404–414. DOI: 10.1016/j.polar.2016.04.004.
5. 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.
6. 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.
7. SOTC: Sea Ice [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://inside.org/sotc/sea_ice.html (дата обращения: 01.09.2022).
8. Фролов И. Е. Океанография и морской лед / И. Е. Фролов. — М.: Paulsen, 2011. — 432 с.
9. Шалина Е. В. Изменение ледовитости северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга / Е. В. Шалина // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 67. DOI: 10.7868/S0205961415040090.

10. Третьяков В. Ю. Изменчивость ледовых условий плавания по трассам Северного Морского пути за период 1997–2018 гг. / В. Ю. Третьяков, С. В. Фролов, М. И. Сарафанов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2019. — Т. 65. — № 3. — С. 328–340. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340.
11. База данных 2014620942 Российская Федерация. Суточная температура воздуха и количество осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR) / О. Н. Булыгина, В. Н. Разуваев, Т. М. Александрова; заяв. и патентообл. Всеросс. науч.-исследов. ин-т гидрометеоролог. инф. — Мировой центр данных. — № 2014620371; заявл. 31.03.2014; опублик. 20.07.2014.
12. Global Ocean Physics Reanalysis [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://resources.marine.copernicus.eu/products> (дата обращения: 22.02.2022).
13. 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.
14. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под редакцией В. Г. Смирнова. — СПб.: ААНИИ, 2011. — 240 с.
15. 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. Lavergne, A. Sørensen, R. Saldo, G. Dybkjaer, L. Brucker, M. Shokr // The Cryosphere Discuss. — 2015. — Vol. 9. — Pp. 1296–1313. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015
16. National Snow and Ice Data Center [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://nsidc.org/home> (дата обращения: 01.09.2022).
17. Антонов В. С. Устьевая область реки Лены (гидрологический очерк) / В. С. Антонов. — Л., 1967. — 107 с.
18. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.
19. Tezиков А. Studying the factors affecting the navigation duration along the Northern Sea Route / A. Tezиков, E. Ol'khovik // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 678. — Is. 1. — Pp. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/678/1/012013.
20. Ol'khovik E. Predicting the speed of ships on the Northern Sea Route using ice concentration isolines / E. Ol'khovik // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14–18, 2021, Moscow, Russia. — 2021.
21. Ol'khovik E. Shipping development trends in the Eastern sector of the Northern Sea Route / E. Ol'khovik, A. Tezиков // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14–18, 2021, Moscow, Russia. — 2021.
22. Kholoptsev A. V. Current trends in the ice thickness and concentration on the waterways of the arctic / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, V. V. Karetnikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 867. — Is. 1. — Pp. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012013.
23. Kholoptsev A. V. Variation in the sea level, ice concentration and ice drift speed near northern land archipelago in the autumn-winter period / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, V. V. Karetnikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 867. — Is. 1. — Pp. 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012025.
24. 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.

REFERENCES

1. Gukov, A. Yu. “Velikaya Sibirskaya polyn’ya, vek XXI.” *Nauka i tekhnika Yakutii* 1(16) (2009): 99–103.
2. Kolchak, A.V. “Led Karskogo i Sibirskogo morei.” *Zapiski Rossiiskoi Akademii nauk: VIII seriya*. Vol. XXVI. SPb., 1909. 26–58.
3. Dumanskaya, I. O. *Ledovye usloviya morei aziatskoi chasti Rossii*. M.; Obninsk: IG–SOTsIN, 2017.
4. Beveridge, Leah, Mélanie Fournier, Frédéric Lasserre, Linyan Huang, and Pierre-Louis Têtu. “Interest of Asian shipping companies in navigating the Arctic.” *Polar Science* 10.3 (2016): 404–414. DOI: 10.1016/j.polar.2016.04.004
5. 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.

6. Melia, Nathanael, Keith Haines, and Ed Hawkins. *Future of the Sea: Implications from Opening Arctic Sea Routes*. Foresight, Government Office for Science, 2017.
7. SOTC: Sea Ice. Web. 1 Sept. 2022 <http://nsidc.org/sotc/sea_ice.html>.
8. Frolov, I. E. *Okeanografiya i morskoi led*. M.: Paulsen, 2011.
9. Shalina, E. V. "Ice Retreat in the Seas of the Russian Arctic and Increased Availability of the Northern Sea Route from Satellite Passive Microwave Observations." *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics* 4 (2015): 67. DOI: 10.7868/S0205961415040090
10. Tretyakov, V. Yu., S. V. Frolov, and M. I. Sarafanov. "The variability of ice conditions along the Northern Sea Route for the period 1997–2018." *Arctic and Antarctic Research* 65.3 (2019): 328–340. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340.
11. Bulygina, O. N., V. N. Razuvaev, and T. M. Aleksandrova. Database 2014620942. Sutochnaya temperatura vozdukhа i ko-lichestvo osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR). Russian Federation, assignee. Publ. 20 July 2014.
12. Global Ocean Physics Reanalysis. Web. 22 Feb. 2022 <<https://resources.marine.copernicus.eu/products>>.
13. 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.
14. Smirnov, V. G. *Sputnikovye metody opredeleniya kharakteristik ledyanogo pokrova morei*. SPb.: AANII, 2011.
15. Ivanova, N. L. T. Pedersen, R. T. Tonboe, S. Kern, G. Heygster, T. Lavergne, A. Sørensen, R. Saldo, G. Dyb-kjaer, L. Brucker, and M. Shokr. "Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: An optimal algorithm and challenges." *The Cryosphere Discuss.* 9 (2015): 1296–1313. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.
16. National Snow and Ice Data Center. Web. 1 Sept. 2022 <<https://nsidc.org/home>>.
17. Antonov, V. S. *Ust'evaya oblast' reki Leny (gidrologicheskii ocherk)*. L., 1967.
18. Aivazyan, S. A., and V. S. Mkhitaryan. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki*. M.: Yuniti, 1998.
19. Tezиков, Aleksandr, and Evgeniy Ol'Khovik. "Studying the factors affecting the navigation duration along the Northern Sea Route." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 678. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/678/1/012013.
20. Ol'khovik, Evgeniy. "Predicting the speed of ships on the Northern Sea Route using ice concentration iso-lines." *Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. 2021.
21. Ol'khovik, Evgeniy, and Aleksandr Tezиков. "Shipping development trends in the Eastern sector of the Northern Sea Route." *Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. 2021.
22. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and V. V. Karetnikov. "Current trends in the ice thickness and concentration on the waterways of the arctic." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 867. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012013.
23. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and V. V. Karetnikov. "Variation in the sea level, ice concentration and ice drift speed near northern land archipelago in the autumn-winter period." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 867. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012025.
24. 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.

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

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

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

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 19 сентября 2022 г.
Received: September 19, 2022.*