

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-885-897

IMPACT OF YAKUTIA WILDFIRES ON ICE CONDITIONS OF PARTS OF THE LAPTEV SEA SHIPPING LANES

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

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

² — Siberian Fire Rescue Academy, Zheleznogorsk, Russian Federation

The article aims to verify the hypothesis about the impact of largescale Yakutia wildfires on the ice concentration in certain parts of the Laptev Sea shipping lanes. The verification was performed using data on ice concentration monthly and daily means obtained from GLORYS12v1 reanalysis and the catalogue of Aqua and Shizuku space missions. Information on the scale and consequences of Yakutia wildfires was obtained from the remote monitoring information system of the Federal Forestry Agency. The research methodology involved the use of statistical methods, including correlation analysis. The study comprised 2001–2023 period. A significant correlation between forest burning indicators and the ice conditions in certain areas of the sea has been confirmed. The most likely cause of the identified relationship was named to be the effect of an ice cover albedo decrease due to depositing of the soot brought by southern winds from burnt forest areas, as well as earlier and warmer floods from large Siberian rivers. It has been established that in the years following periods of large-scale fires, a downward trend in ice concentration manifests itself in a number of sea areas. In the spring–summer period (May — June) they are found in the northwestern and southern parts of the sea (in the areas of formation of fast ice polynyas), which favors an earlier navigation opening. In the autumn months, due to the sea waters having consumed more heat during the summer, active ice formation begins later (October — November), contributing to its later closure. The extent to which wildfires impact changes in the ice concentration of the Laptev Sea against the backdrop of other significant factors (variations in temperature, solar insolation, wind conditions, sea level, etc.) is not straightforward and needs further research. Provided that current trends in climate change persist, it is safe to predict that in the years following periods of intense wildfires, the period of safe autonomous navigation for high ice class vessels (Arc6 and Arc7) in the Laptev Sea will be longer than normal and will comprise all months from May to December.

Key words: Laptev Sea, Northern Sea Route, ice concentration, wildfire, shipping, trend, correlation, navigation period, polynya.

For citation:

Podporin, Sergey A. and A. V. Kholoptsev. “Impact of Yakutia wildfires on ice conditions of parts of the Laptev sea shipping lanes.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.6 (2024): 885–897. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-885-897.

УДК 656.61.052: 614.841.42

ВЛИЯНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ЯКУТИИ НА ЛЕДОВУЮ ОБСТАНОВКУ НА УЧАСТКАХ СУДОХОДНЫХ ТРАСС МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

С. А. Подпорин¹, А. В. Холопцев^{1,2},

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

² — ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России»,
г. Железногорск, Российская Федерация

Целью статьи является проверка гипотезы о влиянии масштабных лесных пожаров в Якутии на ледовитость определенных участков судоходных трасс моря Лаптевых. Проверка выполнена на основе данных о среднемесячной и среднесуточной ледовитости, полученных из базы реанализа GLORYS12v1 и каталога спутниковых миссий Aqua и Shizuku. Информация о масштабах и последствиях лесных пожаров получена из информационной системы Федерального агентства лесного хозяйства. Методика исследования включала использование статистических методов, в том числе корреляционного анализа временных

рядов оцениваемых показателей, составленных за период 2001–2023 гг. Подтверждено наличие значимой корреляции между показателями горимости лесов Якутии и ледовой обстановкой в некоторых районах моря Лаптевых. Наиболее вероятной причиной выявленной взаимосвязи по-видимому является эффект снижения альбедо ледяного покрова за счет оседания на нем сажки, приносимой ветрами южных румбов с горельников, и более ранние и теплые половодья на крупных сибирских реках. Установлено, что в годы, следующие за периодами крупных лесных пожаров, имеет место тенденция к снижению ледовитости на ряде участков акватории моря. В весенне-летний период (май–июнь) такие участки обнаружены в северо-западной и южной частях моря (в районах образования заприпайных полыней), что благоприятствует более раннему открытию навигации. Отмечается, что в осенние месяцы, очевидно, за счет сильнее прогретых в летний период морских вод активное ледообразование начинается позже (октябрь–ноябрь), способствуя более позднему ее закрытию. Обращается внимание на то, что степень влияния лесных пожаров на изменения ледовитости в море Лаптевых на фоне действия других значимых факторов (вариации температурного режима, солнечной инсоляции, ветрового режима, уровня моря и др.) требует дополнительного изучения. Однако при условии, что современные тенденции климатических изменений сохранятся, можно прогнозировать, что в годы, следующие за периодами интенсивных лесных пожаров на территории республики Саха (Якутия), суда с соответствующим ледовым классом смогут осуществлять самостоятельное плавание в море Лаптевых в течение более длительного периода.

Ключевые слова: море Лаптевых, Северный морской путь, ледовитость, лесные пожары, судоходство, тенденция, корреляция, навигационный период, полынья.

Для цитирования:

Подпорин С. А. Влияние лесных пожаров в Якутии на ледовую обстановку на участках судоходных трасс моря Лаптевых / С. А. Подпорин, А. В. Холопцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 885–897. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-885-897.

Введение (Introduction)

Развитие судоходства в Арктике является одним из главных приоритетов транспортной стратегии Российской Федерации. Арктические моря отличаются сложными условиями плавания на протяжении большей части года, вызванными прежде всего ледовой обстановкой. В этой связи совершенствование методик ее долгосрочного прогнозирования является актуальной проблемой для океанографии и безопасности судоходства. Наибольший интерес ее решение представляет для морских и океанических регионов, через которые проходят трассы Северного морского пути (далее — СМП). Одни из наиболее сложных участков СМП расположены в море Лаптевых. В настоящее время устойчивая навигация в этом регионе возможна с июля по октябрь. Запланированное расширение флота арктических судов ледового класса Arc6 и Arc7 и продолжающееся потепление глобального климата позволяют в ближайшие десятилетия допустить смещение сроков начала навигации на май–июнь и ее окончания на ноябрь–декабрь [1], [2]. Важность моря Лаптевых, помимо транзитного судоходства и Северного завоза, обусловлена также наличием на его шельфе многочисленных участков, признанных перспективными для освоения месторождений углеводородов (лицензии принадлежат ПАО «Роснефть») [3]–[5].

Среди прогнозов развития ледовой обстановки в замерзающих морях важное место занимают долгосрочные прогнозы, заблаговременность которых, согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации, составляет от нескольких месяцев до нескольких лет. Долгосрочные прогнозы представляют практический интерес для судоходных компаний и ведомств, планирующих развитие и подготовку флота для будущих периодов навигации. Основой существующих представлений о принципах разработки таких прогнозов являются работы [6]–[9]. Установлено, что ледовая обстановка формируется под воздействием многих факторов, часть из которых являются ненаблюдаемыми. Влияние других при этом может быть вполне очевидным, а тенденции их развития можно достаточно надежно оценивать.

При разработке прогноза важно понимать, в каких именно районах моря действие того или иного фактора (на фоне других) является статистически значимым и, как следствие, требующим учета при оценке развития ледовой обстановки в будущем. Заблаговременный учет как можно большего количества статистически значимых факторов позволит улучшить качество долго-

срочных прогнозов условий плавания, снизить риски для судоходства и повысить эффективность планирования морских переходов.

В настоящей работе оценивается влияние на состояние судоходных трасс моря Лаптевых двух факторов:

- вариаций альбедо ледяного покрова моря;
- изменений средней температуры речного стока, поступающего в море в результате половодий на реках Сибири.

Высказывается гипотеза о том, что оба фактора могут находиться в статистически значимой связи с опасным и являющимся все более распространенным явлением: лесными пожарами на территории республики Саха (Якутия). В первом случае перенос сажи ветрами южных румбов может приводить к ее осаждению на ледяном покрове и последующему более быстрому таянию льда в период полярного дня. Во втором случае более теплый и ранний речной сток во время половодий может вызывать ускоренное развитие полыней (или изменение их конфигурации), и, как следствие, повышение навигационной доступности определенных участков морских акваторий.

Статистическая значимость, а также локализация подобного влияния неочевидны и требуют проверки. В случае, если указанная гипотеза подтвердится, данные о количестве и распространенности лесных пожаров в конкретном году могут использоваться для улучшения качества прогнозов развития ледовой обстановки на участках судоходных трасс на следующий год.

Целью настоящей работы является проверка гипотезы о влиянии масштабных лесных пожаров на территории республики Саха (Якутия) на состояние некоторых участков судоходных трасс моря Лаптевых. Для ее достижения были решены следующие задачи:

1. Выявлены районы моря Лаптевых, в которых в период с мая по декабрь среднемесячная ледовитость значимо коррелирована с количеством лесных пожаров на территории Якутии, имевших место в предыдущем году.
2. Выявлены аналогичные районы, в которых в тот же период года прослеживается значимая корреляция среднемесячной ледовитости с распространенностью (площадью) пожаров, имевших место годом ранее.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В период ледовой обстановки навигация в море Лаптевых возможна, если маршруты плавания составлены с учетом расположения основных ледовых массивов и конфигурации полыней. Образование и распространенность последних зависят в том числе от характеристик стока крупных сибирских рек (Лена, Яна, Анабар, Оленек) в период половодий, а также от интенсивности таяния морского льда в период полярного дня. Оба процесса могут иметь непосредственную связь с происходящими на территории Якутии лесными пожарами. Рассмотрим возможные причины такой связи.

Сроки и масштабы половодий в устьевых областях рек можно достаточно надежно прогнозировать. В зависимости от площади водосборного бассейна, длины реки и ее притоков, воды, собранные в период половодья, достигают ее устья за период от нескольких недель до нескольких месяцев. В этой связи вариации поверхностных температур вод моря Лаптевых на приустьевом взморье, определяющие интенсивность разрушения в этом районе ледяного покрова, запаздывают по отношению к изменениям температур поступающего в реку поверхностного стока приблизительно на такое же время [10]. Следовательно, можно считать, что одним из факторов межгодовых изменений среднемесячных значений ледовитости (далее — СМЛ) отдельных участков акватории моря Лаптевых являются вариации средней температуры поверхностного стока, поступающего во впадающие в море крупные реки [10], [11].

Существование участков территории водосборного бассейна р. Лены, где межгодовые вариации их термического режима для весенних месяцев значимо связаны с изменениями поверхностных температур участков ее приустьевых взморья в море Лаптевых, запаздывающих на несколько месяцев, установлено в [12], [13]. Обнаружены такие участки и на территории бассейна р. Яны [12]. Известно, что причинами изменений термического режима некоторого участка водосборного бассейна реки

могут служить не только вариации существующих в нем метеоусловий, но и перемены состояния соответствующего фитоценоза [14]. В лесу, пострадавшем в предыдущем году от пожара, весной снежный покров сходит раньше, а соответствующая лесная подстилка прогревается быстрее, что приводит к повышению средней температуры образующегося поверхностного стока.

Масштаб лесных пожаров и степень их влияния на температуру речного стока можно объективно оценивать по двум показателям: количеству лесных пожаров (далее — КЛП), имевших место на территории бассейна реки в предыдущем году, и суммарной площади, пройденной огнем (далее — ППО). Таким образом, можно предположить, что межгодовые изменения средних значений КЛП и ППО на территории Якутии являются значимыми факторами вариаций СМЛ на некоторых участках акватории моря Лаптевых. Еще одним изучаемым фактором изменчивости СМЛ, обусловленным влиянием масштабных лесных пожаров, могут служить вариации альbedo ледяного покрова моря [15], вызванные изменениями потоков сажи и других частиц пирогенных аэрозолей, которые в осенне — зимние месяцы приносит на акваторию моря ветер. Как известно, в эти месяцы над внутренними регионами Евразии господствует Сибирский антициклон [16], вследствие чего над территорией Якутии и акваторией моря Лаптевых преобладают ветры южных румбов. Следовательно, допустимым является следующее предположение: чем больше значения показателей горимости лесов Якутии (КЛП и ППО) в отдельно взятом году, тем больше сажи будет вынесено на морской ледяной покров в следующем году.

Связь межгодовых изменений КЛП и ППО в Якутии с запаздывающими по отношению к ним вариациями СМЛ в ряде районов моря Лаптевых можно считать причинной. Однако статистическая значимость подобной связи на фоне воздействия других влияющих на СМЛ факторов [6], [9] далеко не очевидна и требует подтверждения. Если значимость указанной связи для каких-либо районов подтвердится, то данный факт можно будет учитывать при разработке (или корректировке) долгосрочных прогнозов межгодовых вариаций СМЛ, соответствующих консервативному сценарию развития будущего. Последний предполагает, что связи изучаемого процесса с факторами, которые были значимы в прошлом, останутся таковыми и в будущем. Поскольку климат изменяется, очевидно, что такой сценарий может соответствовать фактическим изменениям ледовой обстановки в будущем лишь приближенно. Тем не менее, чем меньше заблаговременность разрабатываемого прогноза, тем, как правило, ближе фактический сценарий дальнейших изменений к консервативному.

В качестве источника данных об СМЛ в настоящем исследовании использованы данные реанализа GLORYS12v1, поддерживаемого европейской службой Copernicus¹, а также данные фактических измерений на полярных станциях Росгидромета². Охват последних крайне ограничен в силу немногочисленности мониторинговой сети. Вместе с тем данные физических измерений позволили провести выборочное тестирование результатов реанализа и в целом подтвердить их валидность. В частности, было установлено, что для месяцев май — декабрь относительные погрешности оценок СМЛ, основанных на информации реанализа для периода 2000–2023 гг., составляют не более 7 %, а их смещения не превышают 5 %. Данные GLORYS12v1 доступны за каждый час с 1.01.1993 г. по настоящее время с дискретностью по координатам 0,0833°.

Данные о КЛП и ППО на территории Якутии, соответствующие периоду 2000–2023 гг., получены из информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства³. По данным реанализа для всех пунктов его координатной сетки, относящихся к морю Лаптевых, и каждых суток, соответствующих месяцам май — декабрь периода 2000–2023 гг., были сформированы временные ряды СМЛ. Аналогично сформированы ряды КЛП и ППО. Далее с использованием стандартных методов математической статистики выполнен их корреляционный анализ.

¹ База данных реанализа GLORYS12v1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030/INFORMATION.

² ЕСИМО — «Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://portal.esimo.ru/portal/>.

³ Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства: официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml.

В качестве показателя тесной связи между изучаемыми процессами рассматривалось значение коэффициента корреляции (далее — КК) соответствующих временных рядов. В последних предварительно были скомпенсированы линейные тренды [17]. Решение о статистической значимости связи принималось, если значение КК, полученное для периода 2000–2023 гг., по модулю превышало пороговый уровень, определенный по критерию Стьюдента с учетом количества степеней свободы изучаемых временных рядов, оцениваемого по автокорреляционным функциям. Порог значимости корреляции выбран 0,95. Установлено, что рядам СМЛ, КЛП и ППО соответствует количество степеней свободы не менее 18. Порог значимости модуля КК в этом случае равен 0,46. Отдельно рассмотрен также порог 0,55, соответствующий достоверности вывода о значимости корреляции 0,99.

Из теории статистики известно [17], что выбранная характеристика тесной статистической связи корректна при условии, что изучаемые процессы стационарны. Исследуемые в настоящей работе вариации СМЛ, КЛП и ППО можно считать таковыми только приближенно, в связи с чем полученные результаты также следует интерпретировать только на качественном уровне.

Результаты исследования и их анализ (Research Results And Analysis)

В рамках решения первой задачи в соответствии с изложенной методикой выявлялись районы моря Лаптевых, в которых имела место статистически значимая корреляция межгодовых изменений СМЛ с опережающими их изменениями КЛП на территории Якутии для месяцев с мая по декабрь. Оценка выполнялась в период 2001–2023 гг. Результаты представлены на рис. 1, где красными линиями схематично показаны трассы СМП: 0 — пролив Вилькицкого и подходы к нему; 1 — транзитный высокоширотный маршрут к северу от Новосибирских островов; 2 — транзитный путь через пролив Санникова; 3 — прибрежные трассы с заходом в порты и реки.

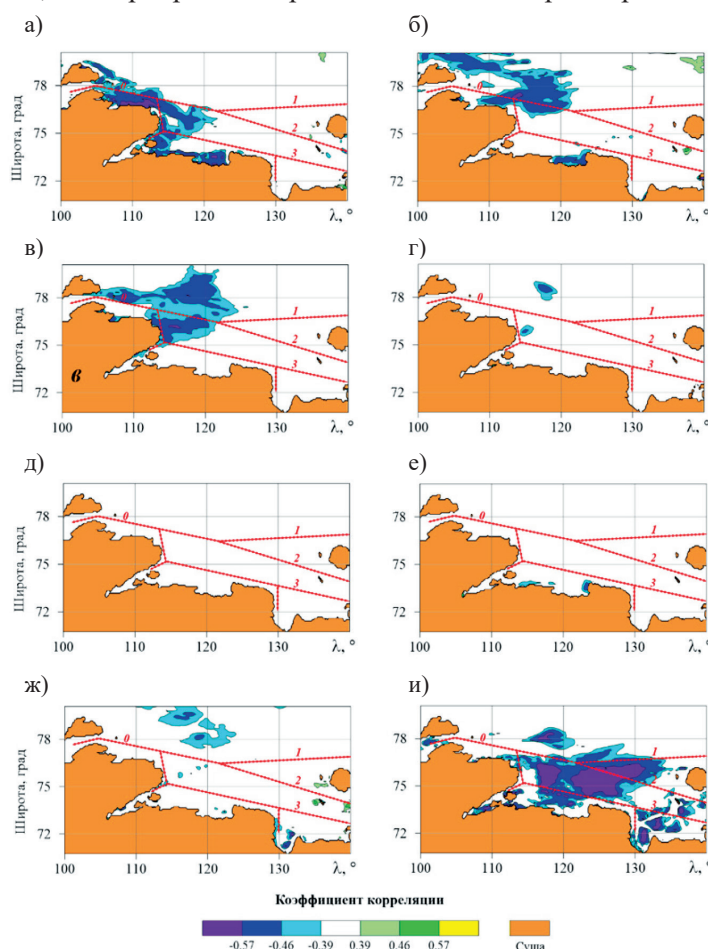


Рис. 1. Районы значимой корреляции межгодовых изменений среднемесячной ледовитости с опережающими их на один год изменениями количества лесных пожаров на территории Якутии для месяцев: а — май; б — июнь; в — июль; г — август; д — сентябрь; е — октябрь; ж — ноябрь; и — декабрь

Как следует из рис. 1, а, районы, в которых в мае обнаружена значимая отрицательная корреляция межгодовых изменений СМЛ в 2001–2023 гг. с вариациями КЛП в Якутии в 2000–2022 гг., находятся вдоль восточных побережий архипелага Северная Земля, восточного побережья п-ва Таймыр, у южного побережья моря Лаптевых, от о-ва Большой Бегичев до западного края дельты р. Лены. Такие районы примерно соответствуют местам формирования заприпайных полыней в ледяном покрове западной части моря Лаптевых. Расположение последних, в соответствии с [18], показано на рис. 2.



Рис. 2. Схема расположения заприпайных полыней моря Лаптевых:
ВСЗП — Восточная Североземельская; СВТП — Северо-Восточная Таймырская;
ВТП — Восточная Таймырская; АНЛП — Анабарско-Ленская;
ЗНЛП — Западная Новосибирская; СНЛП — Северная Новосибирская

Соответствие выявленных районов местам формирования заприпайных полыней можно объяснить переносом частиц сажи в осенне-зимние месяцы и их последующим осаждением на ледяной покров, в том числе на молодой лед, образующийся в полынях. В условиях начала полярного дня и активной инсоляции ледяного покрова таяние последнего ускорится.

На рис. 1, б показано, что в июне районы значимой корреляции сохраняются на северо-западе моря к востоку от архипелага Северная Земля и п-ва Таймыр. В южной части моря их площадь значительно меньше, вероятно, ввиду того, что в июне над регионом продолжается полярный день, а в устьевых областях впадающих крупных рек происходят половодья. В результате влияние осевших на ледяной покров частиц сажи на процесс таяния ледяного покрова ослабевает на фоне совокупности других факторов, влияние которых становится преобладающим.

Из рис. 1, в следует, что в июле районы корреляции сохраняются в северо-западной части моря, в то время как в его южной части площади образовавшихся полыней и разводий уже столь велики, что влияние изучаемого фактора не ощущается. На рис. 1, г–е показано, что в августе – октябре районы значимой корреляции практически отсутствуют. Море в значительной степени свободно от ледяного покрова. Рис. 1, ж свидетельствует о том, что в ноябре искомые районы присутствуют в северной части моря, а также на некоторых участках прибрежных акваторий, где начинает формироваться припай. Данные рис. 1, и указывают на то, что в декабре изменения КЛП предыдущего года продолжают влиять на образование ледяного покрова на значительной части акватории моря. Интерпретировать подобный результат можно следующим образом: чем больше в предшествующем году было лесных пожаров, тем интенсивнее таял ледяной покров моря в мае –

июле и тем больших размеров достигали полыньи к августу. По этой причине в августе и сентябре количество суммарной солнечной радиации, поглощенной водами моря, было больше, поверхностная температура выше, а ледообразование начиналось позднее. Последнее, по-видимому, и является причиной уменьшения СМЛ в декабре на многих участках моря.

Как видно из рис. 1, *а–в, и*, в мае – июле и декабре районы корреляции находятся на пути сухоходных трасс: в мае – июле они расположены по маршрутам 0 (подходы к проливу Вилькицкого и трасса вдоль побережья п-ва Таймыр) и частично 3 (подходы к Хатангскому заливу), в декабре – в южной и центральной частях моря на маршрутах 1–3. Данный факт целесообразно учитывать при прогнозировании условий судоходства в указанных районах.

В рамках решения второй задачи для тех же месяцев выявлялись районы значимой корреляции СМЛ и ППО. Результаты представлены на рис. 3.

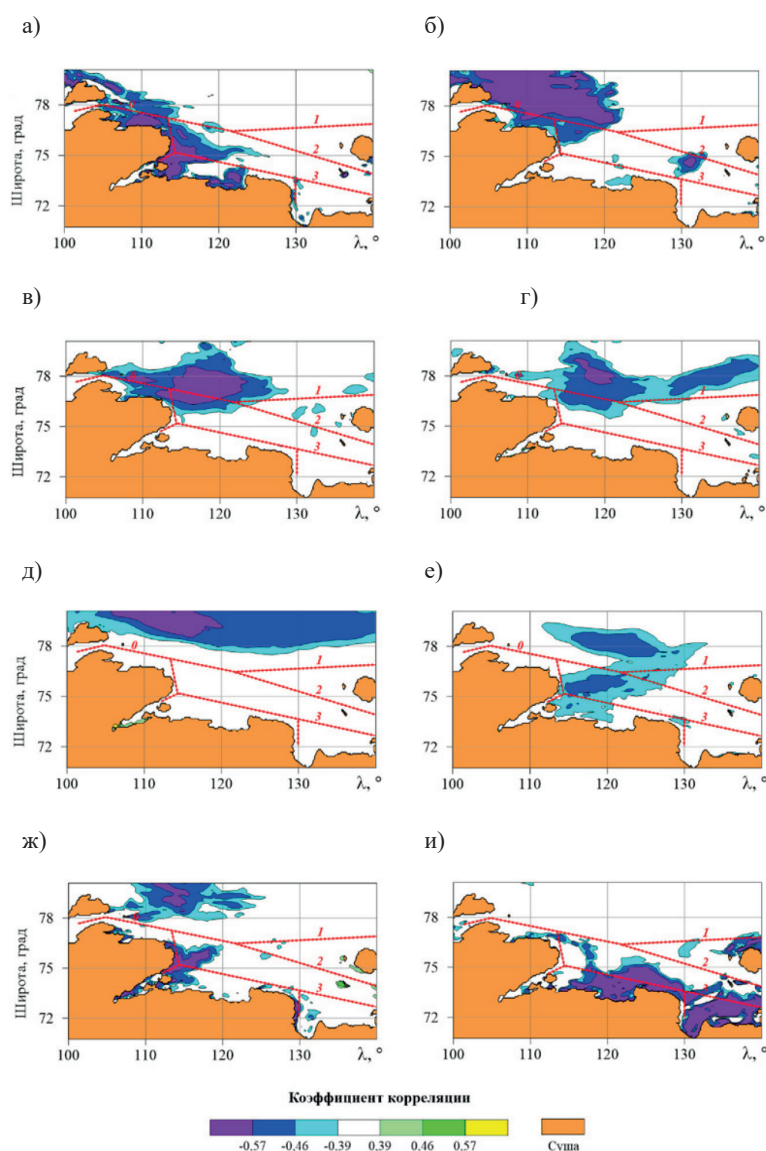


Рис. 3. Районы значимой корреляции межгодовых изменений среднемесячной ледовитости с опережающими их на один год изменениями площади, пройденной огнем лесных пожаров на территории Якутии, для месяцев:

а — май; *б* — июнь; *в* — июль; *г* — август; *д* — сентябрь;
е — октябрь; *ж* — ноябрь; *и* — декабрь

Как следует из рис. 3, *а–в*, расположения районов значимой отрицательной корреляции в мае – июле были в целом подобны расположениям, приведенным на рис. 1, однако суммарные

площади таких районов и степень корреляции были больше. В июне район значимой корреляции обнаружен также на приустьевом взморье р. Лены. В августе (см. рис. 3, *з*), сентябре (см. рис. 3, *д*) и октябре (см. рис. 3, *е*) в северной и центральной части моря выявлена сильная корреляция, которой не было при оценке влияния КЛП. В ноябре (см. рис. 3, *ж*) искомые районы обнаружены к востоку от архипелага Северная Земля, к востоку от п-ва Таймыр, включая приустьевое взморье р. Хатанги, а также на приустьевом взморье р. Лены. В декабре (см. рис. 3, *и*) такие районы выявлены во всей южной части моря, включающей приустьевые взморья р. Анабар, Оленёк, Лена и Яна, а также к северу от о-ва Котельный (район образования Северной Новосибирской заприпайной полыньи).

Анализ рис. 3 показывает, что многие районы значимой корреляции в мае – июле, а также октябре – декабре расположены непосредственно на трассах СМП. В мае они находятся на маршрутах 0 и 3; в июне, июле — на маршруте 3; в августе — на маршрутах 0 и 1; в октябре — на маршрутах 1–3; в ноябре — на маршруте 1; в декабре — на маршрутах 1 и 3. Наибольшее количество таких районов выявлено в западной части моря на подходах к проливу Вилькицкого, а также в прибрежных районах и местах формирования заприпайных полыней.

Актуальность проблемы лесных пожаров на территории Якутии подтверждается данными рис. 4, на котором представлена динамика изменений показателей КЛП и ППО по годам. Как следует из данного рисунка, наибольшие значения КЛП и ППО соответствуют периоду 2020–2021 гг. В 2022–2023 гг. имел место их резкий спад. Временные зависимости КЛП и ППО коррелированы между собой (коэффициент корреляции равен 0,81), но не являются линейно зависимыми.

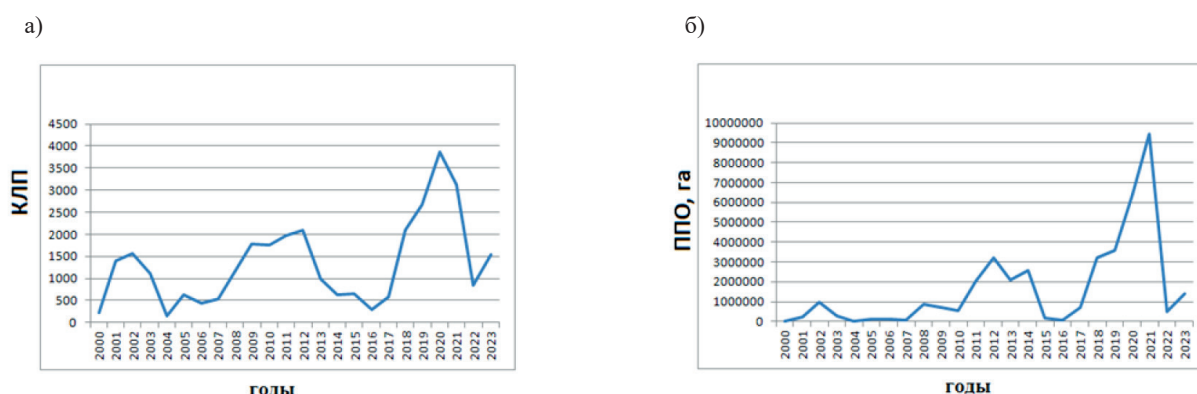


Рис. 4. Изменения показателей горимости лесов Якутии с 2000 по 2022 гг.: а — КЛП; б — ППО

В соответствии с проверяемой гипотезой, после периода с высокими значениями КЛП и ППО в районах моря, где была выявлена значимая корреляция, должна наблюдаться пониженная ледовитость. Этот факт был проверен на примере всплеска КЛП и ППО в 2020–2021 гг. и их спада в 2022–2023 гг. Сравнивались карты ледовитости моря Лаптевых для одних и тех же дат 2022 и 2024 гг.

Данные о фактической среднесуточной ледовитости получены из каталога спутниковых миссий Aqua (NASA) и Shizuku (JAXA), доступного на сайте Бременского университета⁴. Для сравнения взяты даты, относящиеся к периодам активного таяния и образования ледяного покрова: 30 мая и 20 октября соответственно. Результаты представлены на рис. 5. Как видно из рис. 5, 30 мая 2022 г. (см. рис. 5, *а*), в период начала половодий и активного таяния ледяного покрова, ледовитость в районе п-ва Таймыр на участках, где выявлена значимая корреляция между КЛП/ППО и СМЛ, была значительно меньше, а размер полыней больше, чем в ту же дату в 2024 г. (см. рис. 5, *б*).

⁴ Sea Ice Remote Sensing at the University of Bremen. Ice concentration [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://seaice.uni-bremen.de/sea-ice-concentration/amsre-amsr2/>.

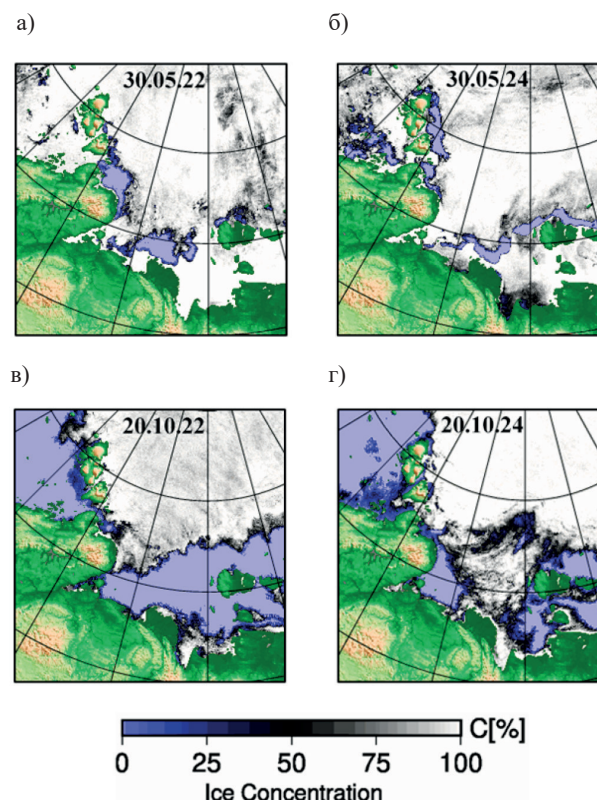


Рис. 5. Карты ледовитости моря Лаптевых, соответствующие датам:
а — 30.05.2022 г.; б — 30.05.2024 г.; в — 20.10.2022 г.; г — 20.10.2024 г.

Таким образом, таяние ледяного покрова в 2022 г. происходило быстрее, а количество поглощенного водами моря в летний сезон тепла было больше, чем в 2024 г. Очевидно, по этой причине активное ледообразование в 2022 г. началось позже, чем в 2024 г., что подтверждено на рис. 5, в. Из рис. 5, г наглядно видно, что 20 октября 2024 г. ледовитость акватории моря Лаптевых была существенно больше, чем в ту же дату в 2022 г.

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Проведенные исследования подтверждают значимость влияния показателей горимости лесов Якутии на ледовую обстановку определенных участков трасс Северного морского пути. Среди этих показателей наиболее значимым является ППО, пропорциональный среднему потоку сажи, образовавшейся в регионе за год при лесных пожарах и поступившей в атмосферу. Его корреляция с изменениями ледовитости определенных районов моря Лаптевых прослеживается во все месяцы периода, потенциально доступного для автономной навигации судов класса Arc6 и Arc7 (с мая по декабрь). Наиболее сильная корреляция выявлена с мая по июль и в декабре на подходах к проливу Вилькицкого, в северо-западной и в южной частях моря в местах формирования заприпайных полыней.

Корреляция, выявленная в мае, может быть объяснена эффектом снижения альбедо ледяного покрова за счет осевшей на него в предыдущие месяцы сажи. Последняя выносятся с горельников ветрами южных румбов, преобладающих в осенне-зимний сезон. Более темный лед в условиях полярного дня быстрее, образуя полыньи и разводья. Корреляцию в июне и июле, когда ледяной покров быстро разрушается, можно объяснить эффектом более ранних половодий, приносящих более теплый сток с бассейнов крупных сибирских рек (Лена, Яна, Анабар, Оленёк). Последний образуется за счет более раннего таяния снежного покрова на участках, пройденных огнем лесных пожаров в предшествующем году.

Вполне логично, что в период отсутствия ледяного покрова (август, сентябрь, частично октябрь) корреляция менее выражена или отсутствует. Когда ледяной покров вновь сформировался (ноябрь, декабрь), она снова становится значимой. Наличие корреляции, очевидно, вызвано уже не эффектом альбедо и ранним стоком рек, а более поздним ледообразованием ввиду того, что воды моря, освободившиеся в текущем сезоне ото льда раньше (в июне–июле), сильнее прогрелись в период полярного дня.

Полученные результаты исследования в целом соответствуют существующим представлениям о влиянии ландшафтных пожаров на загрязнение атмосферы частицами пироаэрозоля и способность лесных фитоценозов снижать интенсивность таяния снежного покрова на соответствующих территориях [14], а также подтверждают справедливость выводов [10], [12], [13], [20]–[21] о значимости влияния характеристик стока сибирских рек на изменения средних температур подстилающей поверхности на их приустьевых взморьях. Они представляют практический интерес для судоходства при планировании ранней и поздней навигации. Факт наличия больших площадей выгоревших лесов Якутии в текущем году, несмотря на негативные последствия для природы и экономики региона, может свидетельствовать о более благоприятных условиях плавания на некоторых участках судоходных трасс моря Лаптевых в следующем году.

Несмотря на то, что факторы, рассмотренные в настоящей работе, признаны статистически значимыми, они не являются единственными, способными влиять на ледовую обстановку в регионе. Их вклад на фоне других (например, изменение потоков солнечной радиации, общее повышение температуры воздуха в регионе, изменение ветрового режима, водообмен с соседними морями, изменения уровня моря и др.) требует дополнительного изучения.

Комплексный учет всех известных и наблюдаемых факторов может существенно улучшить качество долгосрочного прогнозирования ледовой обстановки на арктических судоходных трассах. В случае консервативного сценария развития будущего такой учет возможен, в частности, с использованием метода линейной множественной регрессии, в которой известные факторы выполняют роль предикторов регрессионных моделей.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Гипотеза о наличии значимой корреляции между показателями горимости лесов Якутии и ледовой обстановкой на некоторых участках судоходных трасс моря Лаптевых находит свое подтверждение. Наиболее вероятной причиной этого является эффект снижения альбедо ледяного покрова за счет оседания на нем сажи, приносимой ветрами южных румбов с горельников, и более ранние и теплые половодья на крупных сибирских реках.

2. Установлено, что в годы, следующие за периодами крупных лесных пожаров, наблюдается тенденция к снижению ледовитости некоторых районов моря. В весенне-летний период (май–июнь) они расположены в основном в северо-западной и южной частях моря (в районах образования заприпайных полыней), что способствует более раннему открытию навигации. В осенние месяцы за счет сильнее прогретых в течение летнего сезона морских вод активное ледообразование начинается позже (октябрь–ноябрь), способствуя более позднему ее закрытию.

3. Степень влияния лесных пожаров на изменения ледовитости в море Лаптевых на фоне действия других значимых факторов (вариации температурного режима, солнечной инсоляции, ветрового режима, уровня моря и др.) требует дополнительного изучения. Однако при условии, что современные тенденции климатических изменений сохраняются, можно прогнозировать, что в годы, следующие за периодами интенсивных лесных пожаров на территории республики Саха (Якутия), для судов с высоким ледовым классом (Arc6 и Arc7) самостоятельное плавание в море Лаптевых будет возможно в течение более длительного периода (с мая по декабрь).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мохов И. И.* Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий / И. И. Мохов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — Т. 66. — С. 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462. — EDN ECQGVQ.
2. *Алексеев Г. В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике / Г. В. Алексеев // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2015. — Т. 1. — С. 11–26. — EDN ULVSOP.
3. *Плисецкий Е. Е.* Приоритеты развития Северного морского пути в стратегическом управлении и планировании / Е. Е. Плисецкий // Арктика и Север. — 2016. — № 22. — С. 101–111. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2016.22.101 — EDN VLFJBR.
4. *Прищепа О. М.* Перспективы дальнейшего изучения и освоения углеводородного потенциала арктического шельфа Печоро-Баренцевоморского региона / О. М. Прищепа, Ю. В. Нефедов, Г. А. Григорьев // Научный журнал Российского газового общества. — 2019. — № 3–4(22–23). — С. 5–20. — EDN CFCUTD.
5. *Григорьев Г. А.* Перспективы освоения углеводородных ресурсов российского арктического шельфа — стратегическая пауза неизбежна / Г. А. Григорьев // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2019. — № 2 (165). — С. 37–45. — EDN ZCDIRN.
6. *Гудкович З. М.* Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей / З. М. Гудкович, А. А. Кириллов, Е. Г. Ковалев [и др.]. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 347 с.
7. *Киктев Д. Б.* Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов / Д. Б. Киктев, А. В. Муравьев, А. Ю. Бундель. — М.: Типография АМА ПРЕСС, 2021. — 94 с.
8. *Горбунов С. В.* Анализ технологий прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера / С. В. Горбунов, Ю. Д. Макиев, В. П. Малышев // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. — 2011. — С. 43–53. — EDN OJWKOF.
9. *Моря Российской Арктики в современных климатических условиях* / Под ред. И. М. Ашика. — СПб.: Изд. ААНИИ, 2021. — 360 с.
10. *Холопцев А. В.* Влияние половодий в дельте Колымы на условия судоходства в Восточно-Сибирском море / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 563–569. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-563-570. — EDN JFMEGZ.
11. Gelfan A. Climate change impact on water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues / A. Gelfan, D. Gustafsson, Yu. Motovilov [et al.] // Climatic change. — 2017. — Vol. 141(3). — Pp. 499–515. DOI: 10.1007/s10584-016-1710-5.
12. *Kholoptsev A. V.* Ice Coverage near the New Siberian Islands and Winter Precipitation in the Lena and Yana River Basins / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, R. G. Shubkin // Russian Meteorology and Hidrology. — 2023. — Vol. 48. — Is. 1. — Pp. 45–52. DOI: 10.3103/S1068373923010065.
13. *Kholoptsev A. V.* Climatic Changes in the Arctic Zone of Russia and Climate Warming in Siberia / A. V. Kholoptsev, R. G. Shubkin, S. V. Babenyshev, A. N. Baturo // Springer Geology. Processes in GeoMedia. — 2022. — Vol. VI. — P. 217–228. DOI: 10.1007/978-3-031-16575-7_20.
14. *Валендик Э. Н.* Ландшафтные пожары тайги Центральной Сибири / Э. Н. Валендик, Е. К. Кириляхов, В. А. Рыжкова [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2014. — № 3. — С. 73–86.
15. *Agarwal S.* Decadal to seasonal variability of Arctic sea ice albedo / S. Agarwal, W. Moon, J. S. Wettlaufer // Geophys. Res. Lett. — 2011. — Vol. 38. — L20504. DOI: 10.1029/2011GL049109.
16. *Salby M. L.* Fundamentals of Atmospheric Physics / M. L. Salby. — New York: Academic Press, 1996. — 560 p.
17. *Айвазян С. А.* Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.
18. *Беликов С. Е.* Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики / С. Е. Беликов, М. В. Гаврило, С. Л. Горин [и др.]. — М.: изд-во WWF России, 2011. — 64 с.
19. *Исаулова К. Я.* Исследование навигационно-гидрографических характеристик заприпайных полынй восточного сектора Северного морского пути / К. Я. Исаулова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402. — EDN WITCQM.

20. Холопцев А. В. Современные тенденции изменений пожароопасности в Восточной Сибири, а также ледовитости и поверхностной солености ее морей в летние месяцы / А. В. Холопцев, Р. Г. Шубкин, А. Н. Батуро, И. Ю. Сергеев // Процессы в геосредах. — 2022. — № 1(31). — С. 1511–1527. — EDN NPAWDI.

21. Холопцев А. В. Связи изменений ледовой обстановки на Северном морском пути с движением планет Солнечной системы / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин, Е. О. Ольховик // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13. — № 2. — С. 310–321. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-310-321. — EDN XUEWKE.

REFERENCES

1. Mokhov, Igor I. “Features of modern climate change in the Arctic and their consequences.” *Arctic and Antarctic Research* 66 (2020): 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.

2. Alekseev, G. V. “Development and amplification of global warming in the Arctic.” *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* 1 (2015): 11–26.

3. Plisetsky, Evgeniy E. “Priorities of the strategic management and planning of the Northern Sea route.” *Arktika i sever* 22 (2016): 101–111. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2016.22.101.

4. Prishchepa, O. M., Yu. V. Nefedov and G. A. Grigorev “Pechoro-Barentsevomorskogo regiona.” *Nauchnyy zhurnal Rossijskogo gazovogo obshchestva* 3–4(22–23) (2019): 5–20.

5. Grigoriev, Gennady A. “Prospects for the development of hydrocarbon resources on the Russian arctic shelf — a strategic pause is inevitable.” *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* 2(165) (2019): 37–45.

6. Gudkovich, Zalman M., A. A. Kirillov, E. G. Kovalev, A. V. Smetannikova, and V. A. Spichkin *Osnovy metodiki dolgosrochnnykh ledovykh prognozov dlia arkticheskikh morei*. L.: Gidrometeoizdat, 1972.

7. Kikteev, Dmitry B., Anatoliy V. Muravyov, and Anastasiya Yu. Bundel *Metodicheskiye rekomendatsii po verifikatsii meteorologicheskikh prognozov*. M.: Tipografiya AMA PRESS, 2021.

8. Gorbunov, Sergey V., Yury D. Makiev, and Vladlen P. Malyshev “Analysis of technologies for forecasting of man-made and natural emergencies.” *Strategiya grazhdanskoj zashchity: problemy i issledovaniya* (2011): 43–53.

9. Ashik Igor M., ed. *Morya Rossiyskoy Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh*. SPb.: AANII, 2021.

10. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Impact of floods in the Kolyma river delta on navigation conditions in the East Siberian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 563–569. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-563-570.

11. Gelfan, Alexander, David Gustafsson, Yury Motovilov, Berit Arheimer, Andrey Kalugin, Inna Krylenko, and Alexander Lavrenov “Climate change impact on water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues.” *Climatic change* 141.3 (2017): 499–515. DOI: 10.1007/s10584-016-1710-5.

12. Kholoptsev, Aleksandr V., Sergey A. Podporin, and Roman G. Shubkin “Ice coverage near the New Siberian islands and winter precipitation in the Lena and Yana river basins.” *Russian Meteorology and Hydrology*. 48.1 (2023): 45–52. DOI: 10.3103/S1068373923010065.

13. Kholoptsev, Aleksandr V., Roman G. Shubkin, Sergey V. Babenyshev, and Aleksey N. Baturо “Climatic Changes in the Arctic Zone of Russia and Climate Warming in Siberia.” *Springer Geology. Processes in GeoMedia* 4 (2022): 217–228. DOI:10.1007/978-3-031-16575-7_20.

14. Valendik, Erik N., Yegor K. Kisilyakhov, Vera A. Ryzhkova, Yevgeny I. Ponomarev, and Irina V. Danilova “Landscape fires in the taiga of Central Siberia.” *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* 3(2014): 73–86.

15. Agarwal, Sahil, W. Moon, J. S. Wettlaufer “Decadal to seasonal variability of Arctic sea ice albedo.” *Geophys. Res. Lett.* 38 (2011): L20504. DOI: 10.1029/2011GL049109.

16. Salby, Murry L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. New York: Academic Press, 1996.

17. Aivazyan, S. A., and V. S. Mhitaryan. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki*. M.: Yuniti, 1998.

18. Belikov S. Ye., M. V. Gavrilо, S. L. Gorin, et al. *Atlas biologicheskogo raznoobraziya morei i poberezhij rossiyskoy Arktiki*. M.: izd-vo WWF Rossii, 2011.

19. Isaulova, Kristina Ya. “Research of navigational and hydrographic characteristics of flaw polynyas of the eastern sector of the Northern Sea Route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.

20. Kholoptsev, Aleksandr V., Roman G. Shubkin, Aleksey N. Baturо, and Ivan Yu. Sergeev “Current trends in fire hazard changes in Eastern Siberia, as well as ice cover and surface salinity of its seas in the summer months.” *Protsessy v geosredakh* 1.31 (2022): 1511–1527.

21. Kholoptsev A, S. A. Podporin and E. O. Ol'khovik "Svyazi izmeneniy ledovoy obstanovki na Severnom morskoy puti s dvizheniem planet Solnechnoy sistemy". *Arktika: ekologiya i ekonomika* 13.2 (2023): 310–321. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-310-321.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
e-mail: s.a.podporin@gmail.com
Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России»
662972, Российская Федерация, Красноярский
край, г. Железнодорожск, ул. Северная, 1
e-mail: kholoptsev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor,
leading researcher
Sevastopol branch of FSBI
“N. N. Zubov’s State
Oceanographic Institute”
61 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com
Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor,
leading researcher
Sevastopol branch of FSBI
“N. N. Zubov’s State
Oceanographic Institute”
61 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
Siberian Fire Rescue Academy
1 Severnaya Str., Krasnoyarsk Krai,
Zheleznogorsk, 662972,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31 Октября 2024
Received: Oct. 31, 2024