

СВЯЗИ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ С ДВИЖЕНИЕМ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

А. В. Холопцев

Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова»,
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Российская Федерация)

С. А. Подпорин

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Российская Федерация)

Е. О. Ольховик

ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова»
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 27 октября 2022 г.

Рассмотрена проблема развития гидрографического обеспечения судоходства на различных участках акватории Северного морского пути в части совершенствования методик разработки ориентировочных прогнозов межгодовых изменений ледовой обстановки. Отмечено, что одним из подходов к решению этой проблемы является учет факторов, не зависящих от неопределенности перемен регионального климата в будущем. Одним из таких факторов является главный механический процесс в Солнечной системе – орбитальное движение планет.

В работе ставится цель подтвердить существование участков акватории изучаемых морей, изменения ледовитости которых в летне-осенний период могут быть значимо связаны с указанным фактором. Для ее достижения применены статистические методы. В качестве фактического материала использована информация глобальных реанализов GLORYS12v1 (за 1993–2019 гг.) и ICDC (за 1979–2020 гг.).

Выявлены расположения участков изучаемой акватории, для которых достоверность вывода о значимости рассматриваемой связи в определенные месяцы составляет не менее 90%. Установлено, что наиболее высока достоверность такого вывода для некоторых участков акваторий Восточно-Сибирского моря в октябре и Чукотского моря в ноябре. Для подтверждения пригодности выявленных связей при разработке ориентировочных прогнозов тенденций межгодовых изменений ледовой обстановки на Северном морском пути необходима проверка их устойчивости к обновлению фактического материала.

Ключевые слова: акватория, Северный морской путь, гидрографическое обеспечение судоходства, ледовитость, суммарный момент инерции, прогнозирование.

Введение

Северный морской путь (СМП) — стратегически важная морская артерия, связывающая кратчайшим путем порты Европы и Азии. СМП проходит по акваториям морей Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского, на шельфе и побережьях которых расположены многочисленные действующие и перспективные месторождения углеводородов. По СМП осуществляются как на-

ботажная навигация (в том числе северный завоз), так и международные транзитные перевозки [1]. Поэтому совершенствование гидрографического и гидрометеорологического обеспечения судоходства в этом регионе является актуальной проблемой океанографии, а также эксплуатации водного транспорта, обозначенной в перспективном плане развития СМП¹.

¹ Распоряжение Правительства РФ «План развития Северного морского пути на период до 2035 года» от 1 августа 2022 г. № 2115-р. — URL: <http://government.ru/news/46171/>.

Наибольший интерес решение указанной проблемы представляет для зимне-весенних месяцев, особенность которых состоит в наличии на многих участках акватории СМП ледовых условий, препятствующих круглогодичному судоходству [2].

Учет тенденций дальнейших межгодовых изменений ледовитости участков акватории СМП при планировании мероприятий по развитию гидрографического и гидрометеорологического обеспечения судоходства в регионе — одно из необходимых условий их эффективности. Однако существующие методики прогнозирования не позволяют это обеспечить с достаточной точностью. Как следствие, оправдываемость прогнозов, выполняемых с требуемой заблаговременностью, не является приемлемой [3]. Следовательно, разработка методики ориентировочного прогнозирования динамики изменений ледовых условий на различных участках акватории СМП представляет существенный теоретический и практический интерес.

Главная причина недостаточной оправдываемости прогнозов в арктических морях — их существенная зависимость от динамики изменений регионального климата. Возможные сценарии этой динамики весьма разнообразны, а единственный ее сценарий, который в действительности осуществится, не определен [4].

Согласно существующим представлениям о характеристиках ледяного покрова арктических морей наиболее информативной для летне-осенних месяцев является ледовитость [5]. Ее межгодовая изменчивость на том или ином участке акватории СМП определяется его географическими координатами, а также зависит от месяца. Временная изменчивость ледовитости представляет собой многофакторный процесс, который можно считать случайным, поскольку многие его составляющие существенно зависят от неопределенных характеристик сценария дальнейших перемен климата [6; 7]. Вместе с тем некоторые его составляющие от таких перемен не зависят. Примерами последних можно считать вариации сил инерции, действующих на любые океанические течения, обуславливающие перенос дрейфующих льдов из одних районов арктических морей в другие. Такие вариации вызваны межгодовыми изменениями элементов земной орбиты, которые, в свою очередь, приводят к изменениям силы притяжения Земли к Солнцу [8].

Причиной этих изменений может являться гравитационное взаимодействие Солнца с планетами Солнечной системы (в первую очередь с планетами-гигантами: Юпитером, Сатурном, Ураном и Нептуном), которое приводит к смещению центра массы Солнца относительно барицентра Солнечной системы. Последнее может превышать 1,5 радиуса фотосферы. Как следствие, изменяются расстояние между Землей и Солнцем, сила притяжения к Солнцу, а также соответствующие составляющие указанных выше сил инерции. Интегральной характеристикой,

определяющей взаимодействие между планетами и Солнцем, является суммарный момент инерции (СМИ) планет при их движении вокруг барицентра. Значения СМИ зависят от взаимного расположения планет и от их масс и могут быть вычислены для любой даты с высокой точностью [9].

Хотя орбитальное движение планет является наиболее мощным и предсказуемым механическим процессом в Солнечной системе, значимость влияния вариаций СМИ на изменения расходов и направлений морских течений, определяющие характеристики дрейфа льда в арктических морях, ранее не исследовалась. Следует отметить, что любые навигационные риски в Арктике приводят также к неминуемым экологическим рискам.

Цель настоящей работы — исследование возможности уточнения краткосрочных и среднесрочных прогнозов ледовой обстановки для обеспечения безопасного судоходства и навигационно-гидрографического обеспечения плавания судов в полярных водах, в том числе выявление участков акватории СМП, где связи тенденций межгодовых вариаций ледовитости для месяцев летне-осеннего навигационного периода с изменениями СМИ могут являться значимыми.

Методы и материалы

В исследовании анализировалось состояние ледяного покрова морей Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского.

Ледовая обстановка в определенном районе, как известно, характеризуется информацией о его средней ледовитости и толщине льда. В настоящем исследовании использовались данные о среднемесячных значениях ледовитости (СМЛ), полученные из баз данных реанализов GLORYS12v1 [10] и ICDC [11].

Глобальный реанализ GLORYS12v1, верифицированный по данным спутникового мониторинга, является наиболее полным источником данных о ежесуточных значениях ледовитости изучаемых морей. Его недостаток — сравнительно малый временной охват, который на момент исследования включал период с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2019 г. Технологии космической радарной съемки и анализа таких данных для Арктики подробно представлены, в частности, в работах [12; 13].

Для более полной оценки изучаемых процессов и расширения ряда ледовых наблюдений с целью частичного включения в него периода тяжелых ледовых условий во второй половине XX в. дополнительно использовался реанализ Объединенного центра климатических данных (Integrated Climate Data Center — ICDC) Гамбургского университета. Его данные были доступны за 1 января 1979 г. — 31 декабря 2020 г. Этот реанализ выполнен на основе информации от наземных и авиационных средств мониторинга. Информация в нем представлена лишь для пяти сроков в каждый месяц.

Выборочная проверка достоверности информации обоих реанализов, выполненная путем сопоставления с данными источника [14], показала, что оценки СМЛ из базы данных GLORYS12v1 точнее, чем данные ICDC. Поэтому GLORYS12v1 был использован как основной источник данных, а реанализ ICDC использовался для подтверждения справедливости полученных выводов на основе более длинного временного ряда СМЛ, превышающего периоды обращения планет Юпитер (11,86 года) и Сатурн (29 лет).

Среднемесячные значения СМИ определялись для каждых суток периода 1 января 1979 г. — 31 декабря 2020 г. по информации из [9].

В рамках исследования требовалось выделить вклад вариаций СМИ в изменчивость среднемесячных значений ледовитости арктических морей в районах, по которым проходят трассы СМП. При разработке методики были учтены следующие соображения.

Поскольку изменения ледовитости акваторий СМП определяются совместным действием многих факторов, среди которых некоторые являются ненаблюдаемыми, указанный процесс рассматривался как случайный, а при его прогнозировании были применены статистические методы. Вклад вариаций СМИ признавался значимым, если выявлялась достаточно сильная статистическая связь между ними и изменениями СМЛ.

Наиболее сильными, как правило, являются связи временной изменчивости ледовитости с гидрометеорологическими факторами, формирующими мощные короткопериодные составляющие ее спектров [15]. Статистические свойства гидрометеорологических факторов, воздействующих на ледяной покров, непрерывно изменяются вследствие климатических изменений, сценарий которых не предопределен. В этой связи характеристики временной изменчивости ледовитости можно считать тем менее предсказуемыми, чем более существенно на них влияют гидрометеорологические факторы.

Чтобы доказать значимость влияния изменений СМИ на фоне плохо предсказуемых короткопериодных гидрометеорологических изменений, потребовалась фильтрация спектра межгодовой изменчивости СМЛ. Для этого применен статистический метод сглаживания в скользящем окне.

Из массива исходных данных средствами MATLAB были сформированы временные ряды СМИ и СМЛ для всех участков акваторий арктических морей, которые далее подвергались сглаживанию в скользящем окне длиной T от 1 до 8 лет. При этом ослаблялись или полностью подавлялись составляющие спектра временной изменчивости СМЛ с периодом, меньшим T . Средние мощности длиннопериодных составляющих при этом не изменялись. Полученные таким образом «сглаженные» временные ряды СМИ и СМЛ использовались при оценке значимости статистических связей между ними.

Согласно существующим представлениям о принципах обнаружения сигналов на фоне помех [16] уровень значимости связей между «сглаженными» временными рядами СМИ и СМЛ, при котором вероятности ошибок первого и второго рода не превышают те или иные значения, зависит от статистических свойств этих рядов. Поскольку такие свойства для разных участков акватории региона различны и к тому же в условиях перемен климата не являются постоянными, различны и изменчивы также соответствующие достаточные значения достоверности статистического вывода о значимости изучаемых связей. Следовательно, на одних участках эти значения могут превышать некоторый фиксированный уровень достоверности, а на других — нет. В подобных условиях выявить районы СМП, на изменения ледовитости которых может значимо влиять фактор вариаций СМИ, на основе имеющихся исходных данных можно лишь с определенной вероятностью.

Методика исследования предполагала выявление по данным GLORYS12v1 всех участков акватории СМП, для которых достоверность статистического вывода о значимости синхронных связей между указанными временными рядами в 1993—2019 гг. превышала фиксированные уровни 0,9, 0,95 и 0,99. Полученные результаты сравнивались с результатами изучения аналогичных связей (по данным ICDC) за 1 января 1979 г. — 31 декабря 2020 г.

Вопрос о том, для каких именно участков такая достоверность в современном периоде достаточна, не рассматривался, поскольку в будущем, для которого разрабатывается прогноз, она может измениться.

При оценке значимости связей между рядами применен метод корреляционного анализа. Перед его осуществлением во всех сопоставляемых временных рядах были скомпенсированы линейные тренды. Решение о значимости рассматриваемой связи принималось, если вычисленное значение коэффициента корреляции соответствующих временных рядов превышало по модулю определенный пороговый уровень. Такие уровни, соответствующие выбранным значениям достоверности вывода о значимости изучаемой связи, определялись с применением критерия Стьюдента, исходя из минимального количества степеней свободы сопоставляемых рядов [17].

Результаты исследования представлялись на контурных картах изучаемых морей. Очевидно, что главный недостаток описанной методики — невозможность оценки наличия устойчивости выявленных связей к поступлению новых исходных данных, что является необходимым условием удовлетворительной оправдываемости прогнозов, разработанных с их учетом. Основное препятствие, которое не позволяет произвести такую оценку, — недостаточная длина временных рядов СМЛ. Поэтому исследование по изложенной методике целесообразно повторить через несколько лет.

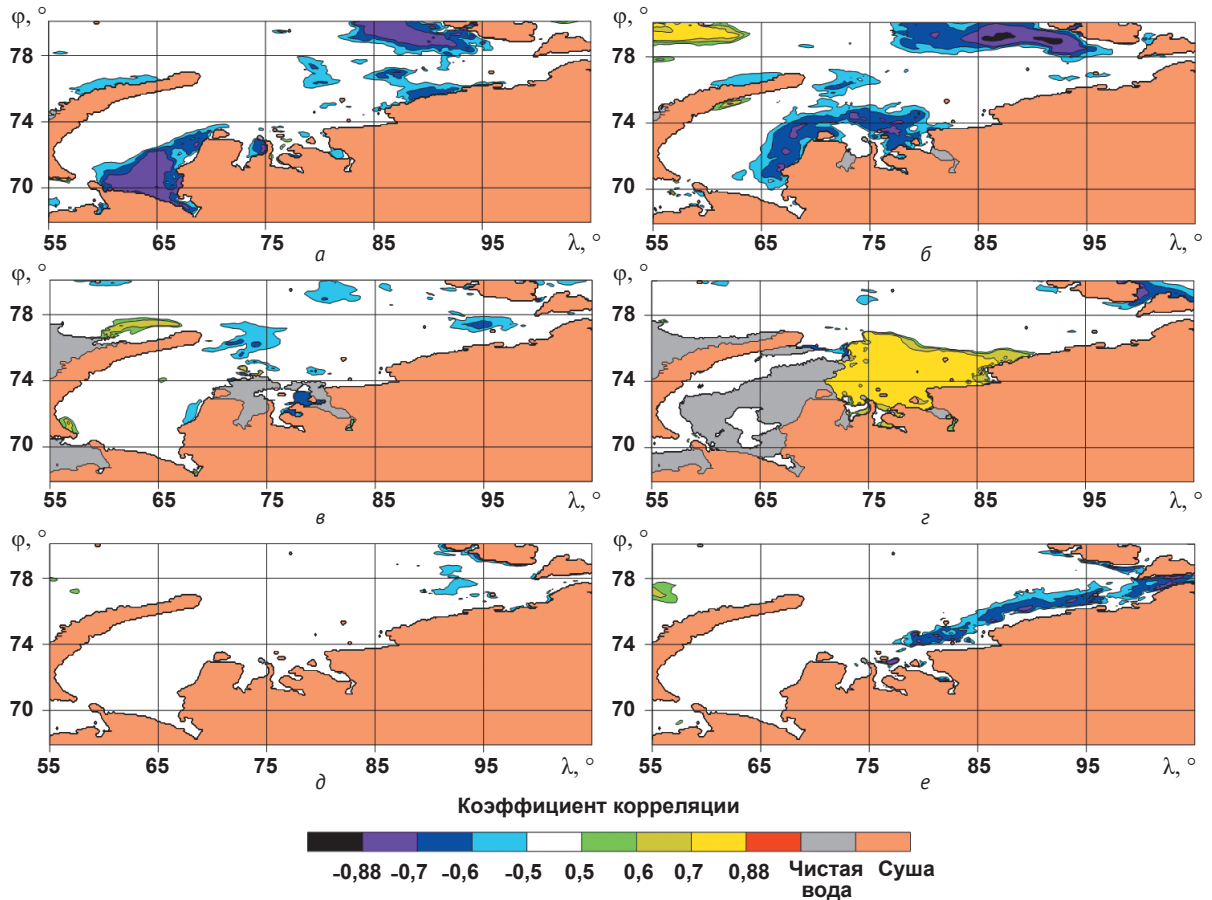


Рис. 1. Распределение значений коэффициента корреляции рядов СМИ и СМЛ в Карском море по месяцам: а – июнь, б – июль, в – август, г – сентябрь, д – октябрь, е – ноябрь

Fig. 1. Distribution of the correlation coefficient values of the series for the total moment of inertia of the planets and average monthly ice coverage in the Kara Sea by months: а – June, б – July, в – August, г – September, д – October, е – November

Результаты исследования и их анализ

Установлено, что при сглаживании временных рядов СМИ и СМЛ в скользящем окне длиной $T < 4$ лет значимые связи между ними не выявляются нигде. При $T = 4$ года участки со значимыми связями присутствуют, однако по площади они занимают менее 1% изучаемой акватории. Это объясняется тем, что скользящее окно $T \leq 4$ лет слишком мало для подавления короткопериодных составляющих межгодовой изменчивости СМЛ.

Поиск связей при $T = 5$ лет дал более наглядные результаты, описанные ниже.

Минимальное количество степеней свободы временных рядов СМЛ за 1993–2019 гг. при $T = 5$ лет равно 7. Пороговые значения коэффициента корреляции K , соответствующие уровням достоверности 0,9, 0,95 и 0,99, равны 0,7, 0,88 и 0,98 соответственно (согласно критерию Стьюдента). Для сглаженных рядов СМЛ за 1979–2020 гг. количество степеней свободы равно 19, а соответствующие пороговые значения составляют 0,4, 0,45 и 0,55.

На рис. 1 представлено распределение значений коэффициента корреляции рядов СМИ и СМЛ

для Карского моря по месяцам летне-осеннего периода.

Из рис. 1а видно, что в июне участки со значимой связью ($K > 0,7$) существуют. Они расположены в Байдарацкой губе и прилегающих к ней районах, к западу от архипелага Северная Земля (в области Северо-Земельского ледового массива), на подходах к порту Сабетта, а также к северу от шхер Минина. Везде корреляция рассматриваемых рядов отрицательна.

В июле (см. рис. 1б) такие участки также обнаружены. Они, как и в июне, расположены в Байдарацкой губе и прилегающих районах, в области Северо-Земельского ледового массива, а также к северу от Обской и Гыданской губ и Енисейского залива. Во всех этих районах корреляция отрицательна. В районах арктического бассейна, прилегающих к восточной части моря, такие участки тоже обнаружены, и на некоторых из них достоверность выводов о значимости изучаемой связи превышает 0,95.

В августе и октябре (см. рис. 1в и 1д) участки со значимой корреляцией не выявлены.

В сентябре (см. рис. 1г) присутствуют участки как с положительной, так и с отрицательной значимой

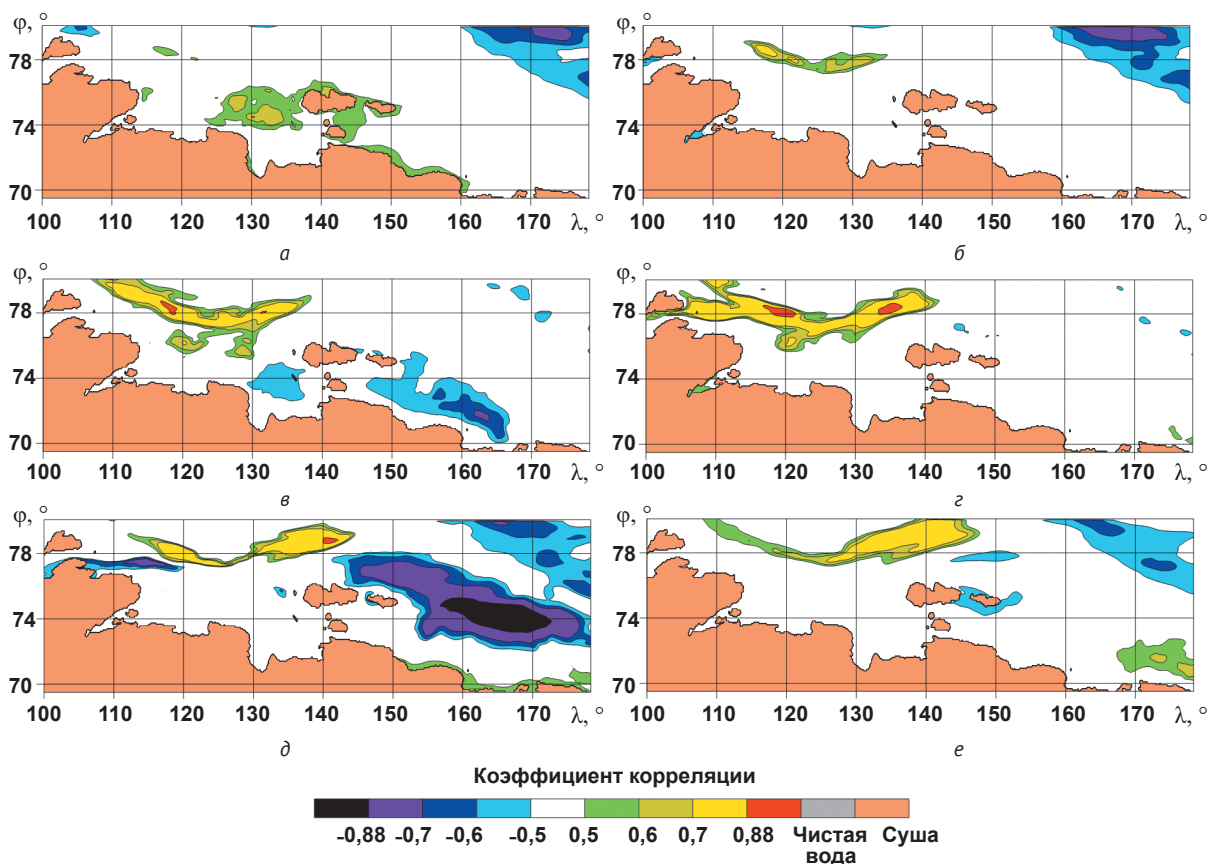


Рис. 2. Распределение значений коэффициента корреляции рядов СМИ и СМЛ в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском по месяцам: а – июнь, б – июль, в – август, г – сентябрь, д – октябрь, е – ноябрь
 Fig. 2. Distribution of the correlation coefficient values of the series for the total moment of inertia of the planets and average monthly values of ice cover in the Laptev and East Siberian seas by months: а – June, б – July, в – August, г – September, д – October, е – November

корреляцией. Первые весьма обширны и расположены к северу от участка материкового побережья между северной оконечностью полуострова Ямал и мысом Каминского (берег Харитона Лаптева), а вторые — в проливе Шокальского и к юго-востоку от мыса Желания (Северный остров архипелага Новая Земля).

В ноябре (см. рис. 1е) такие участки немногочисленны. Они находятся непосредственно у материкового побережья (на участке от острова Диксон до мыса Палласа на полуострове Заря). Корреляция при этом отрицательна.

Таким образом, при сглаживании в скользящем окне $T = 5$ лет в Карском море участки со значимой корреляцией СМИ и СМЛ выявляются в июне, июле, сентябре и ноябре. При этом в сентябре преобладают участки, где значимая корреляция изучаемых процессов положительна, а в остальные месяцы — отрицательна. Данный факт можно объяснить тем, что в сентябре изменения ледовитости в районах Карского моря со значимой СМИ-СМЛ корреляцией обусловлены вариациями характеристик течений, доставляющих в эти районы дрейфующий лед из интенсивно разрушающегося Новоземельского

ледяного массива. В июне, июле и ноябре лед из тех же районов течениями в основном уносится. Следовательно, одинаковые воздействия (изменения характеристик течений) в разные месяцы вполне закономерно приводят к противоположным результатам.

В августе и октябре таких участков нет, что может свидетельствовать о том, что в эти месяцы на изменения баланса льдов в Карском море вариации характеристик его поверхностных течений не влияют. Их влияние на приходную часть этого баланса практически компенсируется влиянием на его расходную часть.

На рис. 2 показано аналогичное распределение участков со значимой корреляцией СМИ-СМЛ в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском.

В июне и июле (см. рис. 2а и 2б) участки со значимой корреляцией в море Лаптевых практически отсутствуют, а в Восточно-Сибирском море расположены в северо-восточной его части (корреляция отрицательная).

В августе и сентябре (см. рис. 2в и 2г) значимая положительная корреляция обнаруживается в довольно обширной центральной части моря Лаптевых,

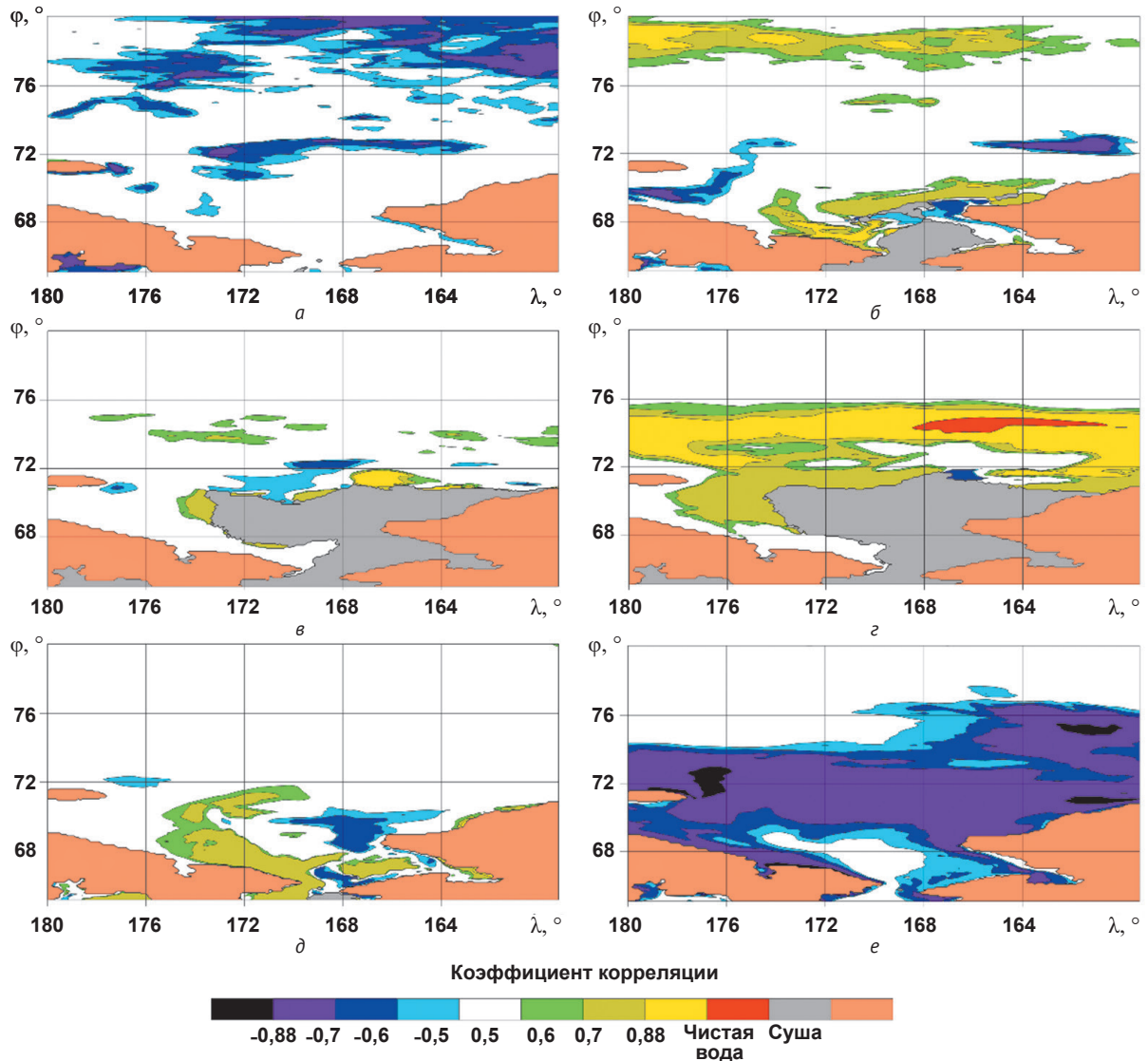


Рис. 3. Распределение значений коэффициента корреляции рядов СМИ и СМЛ в Чукотском море по месяцам: а – июнь, б – июль, в – август, г – сентябрь, д – октябрь, е – ноябрь

Fig. 3. Distribution of the correlation coefficient values of the series for the total moment of inertia of the planets and average monthly ice coverage in the Chukchi Sea by months: а – June, б – July, в – August, г – September, д – October, е – November

при этом в Восточно-Сибирском море таких участков практически нет.

В октябре (см. рис. 2д) в море Лаптевых область значимой положительной корреляции в центральной части моря сохраняется, постепенно перемещаясь на северо-восток (к северу от острова Котельный). При этом в западной части моря у восточного входа в пролив Вилькицкого появляется зона отрицательной корреляции. В Восточно-Сибирском море в это же время обнаруживается очень обширная область отрицательной корреляции в центральной части моря, простирающаяся от острова Новая Сибирь практически до острова Врангеля.

В ноябре (см. рис. 2е) область положительной корреляции в северо-восточной части моря Лап-

тевых еще больше увеличивается. Других участков значимой корреляции обнаружено не было.

Как следует из рис. 2, расположения выявленных участков морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, где связи между «сглаженными» рядами СМИ и СМЛ являются значимыми, свидетельствуют о том, что, как и в Карском море, существенным фактором изменчивости их ледовитости является дрейф льдов.

В разные месяцы однонаправленные изменения характеристик поверхностных течений этого региона, которые влияют на изучаемый процесс, приводят к противоположным последствиям. В отличие от Карского моря, в морях Лаптевых и Восточносибирском доставка к их побережьям дрейфующих льдов преобладает над их выносом не только в сентябре,

Таблица 1. Процентное соотношение площадей участков арктических морей со значимой СМИ-СМЛ корреляцией

Месяц	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море	Среднее за месяц
Июнь	10	0	3	6	4,8
Июль	9,7	2	4,6	7,2	5,9
Август	0	10	1	2	3,3
Сентябрь	15	19	0	22	14
Октябрь	0	9,6	36	0	11,4
Ноябрь	3	8	6	39,4	14,1

но и в августе. Взаимная компенсация этих процессов здесь наблюдается не только в октябре, но и в июле.

На рис. 3 показано распределение участков со значимой корреляцией СМИ-СМЛ в Чукотском море.

В июне (см. рис. 3а) в Чукотском море и прилегающих к нему районах арктического бассейна выявлены участки со значимой и отрицательной СМИ-СМЛ корреляцией. Они расположены у восточной оконечности острова Врангеля, а также к северу от параллели 70° с. ш.

В июле (см. рис. 3б) выявлены участки как с положительной, так и с отрицательной корреляцией. Первые расположены в районах Арктического бассейна, граничащих с западной частью Чукотского моря, а также непосредственно в нем, к северу от полуострова Чукотка. Вторые участки находятся в проливе Лонга и юго-восточной части соответствующей области Арктического бассейна.

В августе и октябре (см. рис. 3в и 3д) сколько-нибудь значительных по площади участков со значимой СМИ-СМЛ корреляцией не выявлено.

В сентябре (см. рис. 3г) почти вся северная часть Чукотского моря представляет собой зону значимой положительной корреляции. К северу от мыса Барроу существует район, в котором достоверность вывода о значимости СМИ-СМЛ корреляции превышает 0,95.

В ноябре (см. рис. 3е) почти вся центральная часть Чукотского моря входит в зону значимой отрицательной корреляции. В ней отдельно стоит выделить участок к северо-востоку от острова Врангеля с достоверностью рассматриваемой корреляции более 0,95.

Из рис. 3 понятно, что закономерности расположений в Чукотском море искомым областей с июня по ноябрь во многом аналогичны закономерностям, выявленным в иных рассмотренных морях. Как и в Карском море, участки значимой корреляции «сглаженных» временных рядов СМИ и СМЛ отсутствуют в августе и октябре. В сентябре характерно преобладание участков значимой положительной

корреляции, а в июне, июле и ноябре — значимой отрицательной.

Для наглядности результаты, показывающие приблизительное процентное соотношение площадей участков со значимой СМИ-СМЛ корреляцией по всем рассмотренным морям, представлены в табл. 1. Из нее видно, что количество участков акватории СМП, где оценка достоверности вывода о значимости изучаемых связей превышает 0,9, достаточно велико. Больше всего таких участков обнаружено в осенние месяцы.

Анализ результатов, полученных за 1993—2019 гг. для летнего сезона, показывает, что в июне значимая корреляция СМИ-СМЛ по всем рассмотренным морям является отрицательной. В июле также преобладают участки с отрицательной корреляцией за исключением Чукотского моря, в котором участков с положительной корреляцией больше. В августе корреляция минимальна и выявляется только в море Лаптевых, где она положительна.

Результаты, полученные для осеннего периода, показывают, что в сентябре обнаруживаемая корреляция СМИ-СМЛ везде положительна, а число участков, на которых она выявляется, достаточно велико (максимально в морях Лаптевых и Чукотском). В октябре ярко выраженные участки значимой положительной корреляции выявлены только в море Лаптевых. При этом более трети площади Восточно-Сибирского моря занимают участки со значимой отрицательной корреляцией. В остальных морях она не обнаружена. В ноябре наибольшая площадь участков со значимой отрицательной корреляцией присутствует в Чукотском море (более трети площади его акватории).

Аналогичные исследования были выполнены на основе более длинных временных рядов, составленных по данным реанализа ICDC за 1979—2020 гг. Наличие статистических связей СМИ-СМЛ в этом случае также подтвердилось. Для ряда районов достоверность вывода об их значимости превысило не только 0,9 и 0,95, но и 0,99.

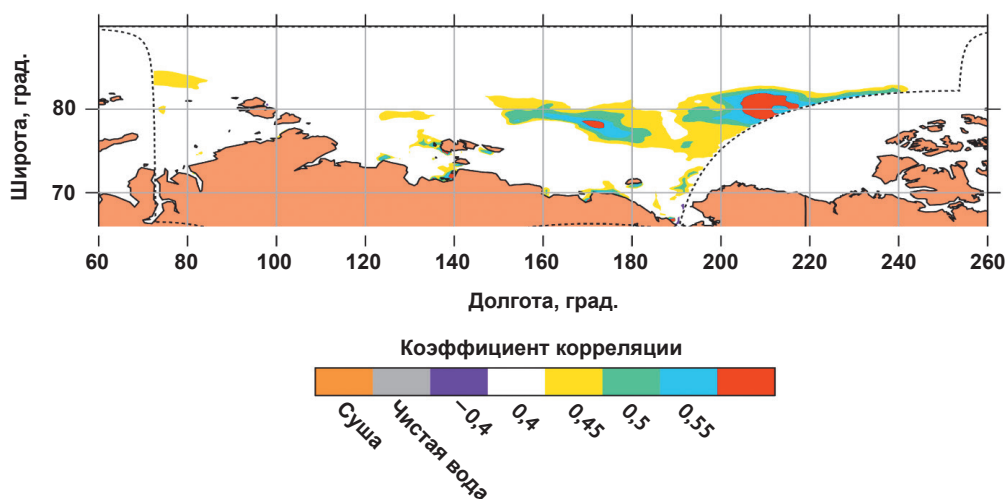


Рис. 4. Районы арктических морей со значимой корреляцией сглаженных временных рядов СМИ-СМЛ в июле периода 1979–2020 гг. (по данным ICDC)

Fig. 4. Areas of the Arctic seas with significant correlation between the smoothed time series of the total moment of inertia of the planets and average monthly ice coverage in July for the period 1979–2020 (according ICDC to data)

В качестве примера на рис. 4 показаны расположения районов арктических морей, для которых связь между сглаженными рядами СМИ и СМЛ по данным ICDC была значимой для июля (на который в современном периоде приходится открытие навигации).

Из рис. 4 видно, что расположения выявленных районов несколько отличаются от представленных на рис. 1–3. Значимая корреляция между изучаемыми рядами, соответствующими июлю, для всех морей положительна. Тем не менее существование таких районов подтверждается.

Аналогичные результаты получены и при изучении связей между временными рядами СМИ и СМЛ при их сглаживании в скользящих окнах длиной $T = 6–8$ лет. При этом учтено, что по мере увеличения T количество степеней свободы этих рядов сокращается, а пороговый уровень, соответствующий достоверности вывода о ее значимости, повышается. Установлено, что при указанных значениях T расположения участков акватории СМП, для которых изучаемые связи являются значимыми, в целом подобны представленным на рис. 1–3. По мере увеличения T общая площадь участков акватории СМП, на которых выявляется значимая корреляция СМИ-СМЛ, увеличивается.

Обсуждение полученных результатов

Данные, полученные в настоящей работе, дают весомые основания предполагать наличие взаимосвязи между изменениями СМИ планет-гигантов Солнечной системы и вариациями ледовитости (и,

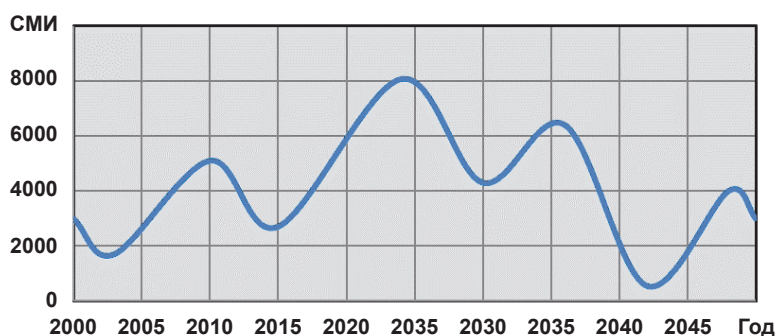


Рис. 5. Изменения суммарного момента инерции планет-гигантов в 2000–2050 гг.
Fig. 5. Changes in the total moment of inertia of giant planets in 2000–2050

как следствие, условий судоходства) на определенных участках арктических морей. Наличие такой взаимосвязи не противоречит существующим представлениям о факторах межгодовой изменчивости СМЛ в арктических морях [6; 18–20], к числу которых относятся процессы, влияющие на направление и скорость происходящего в них дрейфа льда. Процесс дрейфа льда, в свою очередь, крайне важен при обеспечении безопасности судоходства крупнотоннажных судов [21].

Указанная взаимосвязь установлена статистически по ограниченному массиву данных за 1993–2019 гг., а также за 1979–2020 гг., в связи с чем ее сохранение в будущем нельзя полностью гарантировать. Для проверки ее устойчивости к дальнейшему обновлению фактического материала подобные исследования целесообразно повторить через несколько лет.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что на участках акваторий арктических морей, где доказано существование значимой СМИ-СМЛ корреляции, можно более точ-

но прогнозировать долгосрочные тенденции изменения ледовой обстановки, поскольку закон изменения СМИ во времени известен (рис. 5) [9]. Особенно актуальным это представляется для участков судходных трасс и районов освоения действующих и перспективных шельфовых месторождений углеводородов².

Одним из наиболее существенных результатов можно считать факт выявления значимой отрицательной СМИ-СМЛ корреляции в октябре в центральной части Восточно-Сибирского моря (см. рис. 2д), которое традиционно отличается сложными условиями судоходства. Как известно, в этом районе лежат трассы СМП (как проходящие через пролив Санникова, так и высокоширотные), расположен один из крупнейших перспективных лицензионных участков нефтегазодобычи — Восточно-Сибирский-1. На октябрь обычно приходится начало активного ледообразования и закрытие навигационного периода для большинства типов судов.

Вместе с тем, как отмечено в [22], тенденции потепления климата Арктики дают судовладельцам надежду на более позднее окончание навигации и позволяют планировать большее число рейсов судов, в том числе транзитных, в этом районе.

При таком планировании следует принимать во внимание, что значение СМИ после максимума в 2023—2024 гг. далее будет снижаться (за исключением локального кратковременного повышения в 2032—2036 гг.) вплоть до 2042 г., тем самым способствуя повышению ледовитости. Невозможно прогнозировать темпы глобального потепления в этот период, однако не исключено, что условия судоходства в этом районе будут оставаться сложными. Кроме того, как описано в [23], повышению ледовитости может дополнительно способствовать долговременный фактор снижения солнечной активности.

Сравнивая полученные результаты с работами [22; 24; 25], которые посвящены построению генеральных маршрутов судов в различных ледовых условиях СМП, можно выявить следующую тенденцию: фактические маршруты при самостоятельном плавании проходят вдоль образующихся польней независимо от физического принципа их образования. Для восточного сектора Арктики в работах [2; 24; 25] также имеются сходные результаты, они могут быть связаны как с изменением уровня воды моря Лаптевых и Восточно-Сибирского морей, так и с элементами глобального потепления и стока сибирских рек.

Также важной для понимания изменений условий судоходства можно считать значимую СМИ-СМЛ корреляцию, выявленную в морях: Карском (июнь и ноябрь, см. рис. 1а и 1е), Лаптевых (с сентября

по ноябрь, см. рис. 2г—2е), Чукотском (ноябрь, см. рис. 3е).

Заключение

В результате исследования по информации от двух независимых источников сведений об изменениях ледовитости изучаемых морей для летне-осенних месяцев для двух периодов различной продолжительности установлено наличие значимой связи с ними вариаций суммарного момента инерции планет-гигантов Солнечной системы. Наиболее существенна такая связь в Восточно-Сибирском море в октябре и Чукотском море в ноябре.

Выявленные закономерности в условиях неопределенности глобальных климатических изменений позволяют лучше понимать и прогнозировать ледовую обстановку на Северном морском пути при краткосрочном и среднесрочном планировании судоходства, развитии навигационно-гидрографического обеспечения плавания судов в полярных водах и обеспечении работ по освоению действующих и перспективных шельфовых месторождений.

Описанные в настоящей работе исследования целесообразно повторить через 3—5 лет по мере накопления фактического материала для подтверждения статистической достоверности полученных результатов.

Литература

1. Афонин А. Б., Тезиков А. Л. Концепция развития судходных трасс акватории Северного морского пути // Вестн. Гос. ун-та мор. и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2017. — № 1 (41). — С. 81—87. — DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
2. Tezikov A., Ol'Khovik E. Generalized model of maritime transport of the Northern Sea Route // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 14—18, 2021. Moscow, Russia.
3. Gascard J.-C., Riemann-Campe K., Gerdes R. et al. Future sea ice conditions and weather forecasts in the Arctic: Implications for Arctic shipping // *Ambio*. — 2017. — 46 (Suppl. 3). — P. 355—367. — DOI: 10.1007/s13280-017-0951-5.
4. Котляков В. М. О причинах и следствиях современных изменений климата // Солнечно-земная физика. — 2012. — Вып. 21. — С. 110—114.
5. Морской лед / Под ред. И. Е. Фролова, В. П. Гаврило. — СПб.: Гидрометеиздат, 1997. — 402 с.
6. Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика. — СПб.: ААНИИ, 2021. — 360 с.
7. Overland J. E., Wang M., Walsh J. E., Stroeve J. C. Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation times scales // *Earth's Future*. — 2013. — Vol. 2 (2). — P. 68—74. — DOI: 10.1002/2013EF000162.
8. Хлыстов А. И., Долгачев В. П., Доможилова Л. М. Барическое движение Солнца и его след-

² Афонин А. Б. Арктическое судоходство на современном этапе. — URL: <https://goarctic.ru/work/arkticheskoe-sudokhodstvo-na-sovremennom-etape/>.

- ствия для Солнечной системы // Современные глобальные изменения природной среды. — Т. 3: Факторы глобальных изменений. — М.: Науч. мир, 2012. — С. 62—77.
9. Шерстюков Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. — Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2021. — 222 с.
10. Global Ocean Physics Reanalysis. — URL: <https://resources.marine.copernicus.eu/products>.
11. Integrated Climate Data Center. Ocean. — URL: <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/>.
12. Волнов А. В., Галямов А. Л., Белоусов П. Е., Вольфсон А. А. Применение космических технологий в металлогеническом анализе территории Арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 77—85. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-77-85.
13. Teleti P. R., Luis A. J. Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing // Intern. J. of Geosciences. — 2013. — Vol. 4, № 7. — P. 1031—1050. — DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.
14. Генерализованные карты состояния ледяного покрова в арктических и замерзающих морях России и Гренландского моря. — URL: http://old.aari.ru/odata/_d0004.php.
15. Дийкстра Х. А. Нелинейная физическая океанография. — Москва; Ижевск: НИЦ «Регуляр. и хаот. динамика», Ин-т компьютер. исслед., 2007. — 680 с.
16. Хэлстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. — М.: Иностр. лит., 1963. — 432 с.
17. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.
18. Думанская И. О. Ледовые условия морей азиатской части России. — Москва; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. — 640 с.
19. Зеленина Л. А., Антипин А. Л. Льды Арктики: мониторинг и меры адаптации // Арктика и Север. — 2015. — № 18. — С. 122—130.
20. Shibata H., Izumiyama K., Tateyama K. et al. Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980—2011 // Annals of Glaciology. — 2013. — Vol. 54, iss. 62. — P. 139—148. — DOI: 10.3189/2013AoG62A123.
21. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Движение крупнотоннажных судов при дрейфе льда // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2. — С. 68—76.
22. Холопцев А. В., Подпорин С. А. Перспективы безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов // Вестн. Гос. ун-та мор. и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11, № 4. — С. 683—695. — DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.
23. Абдусаматов Х. И. Лунная обсерватория для исследования климата Земли в эпоху глубокого похолодания. — СПб.: Наука, 2017. — 128 с.
24. Ol'Khovik E. Predicting the speed of ships on the Northern Sea Route using ice concentration isolines // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 14—18, 2021. Moscow, Russia.
25. Tezиков А., Ol'Khovik E. Studying the factors affecting the navigation duration along the Northern Sea Route // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IOP Publishing. — 2021. — Vol. 678. — № 1. — P. 012013.

Информация об авторах

Холопцев Александр Вадимович, доктор географических наук, профессор, Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова (299011, Россия, Севастополь, Советская ул., д. 61), профессор, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, Севастополь, Университетская ул., д. 33), e-mail: khoptsev@mail.ru.

Подпорин Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, Севастополь, Университетская ул., д. 33), e-mail: s.a.podporin@gmail.com.

Ольховик Евгений Олегович, доктор технических наук, доцент, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова (198035, Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., д. 5/7), e-mail: olhovikeo@gumrf.ru.

Библиографическое описание данной статьи

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

CHANGES IN THE ICE SITUATION ON THE NORTHERN SEA ROUTE DEPENDING ON THE MOVEMENT OF THE SOLAR SYSTEM PLANETS

Kholoptsev, A. V.

Sevastopol branch of N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Sevastopol State University (Sevastopol, Russian Federation)

Podporin, S. A.

Sevastopol State University (Sevastopol, Russian Federation)

Ol'Khovik, E. O.

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on October 27, 2022

Abstract

The paper considers the progress in the hydrographic support for navigation in various parts of the Northern Sea Route in terms of improving the methods for developing tentative forecasts of interannual changes of ice conditions. Among the approaches to solve the task the authors take into account factors that do not depend on the uncertainty of regional climate changes in the future. One of such factors is the main mechanical process in the Solar System — the orbital planetary motion. The paper goal is to confirm the existence of water areas in the seas under study, changes in the ice coverage of which in the summer-autumn period can be significantly associated with planetary orbital motion factor. The authors apply statistical methods to achieve the study goal. As factual material on changes in the ice coverage of the sections of the Northern Sea Route, they use information of GLORYS12v1 and ICDC global reanalysis databases for the period 1993—2019 and 1979—2020 respectively. As a result the authors have revealed locations of the water areas, for which the reliability of the conclusion about the significance of the relationship under consideration in certain months is at least 90%. They have stated that the reliability of such inference is the highest for some water areas of the East Siberian Sea in October and the Chukchi Sea in November. To confirm the suitability of the identified links for the development of tentative forecasts of trends in interannual changes in the ice conditions on the Northern Sea Route, the authors insist on additional testing to check the resistance to updating the actual material.

Keywords: water area, Northern Sea Route, hydrographic support for navigation, ice coverage, total moment of inertia, forecasting.

References

1. Afonin A. B., Tezikov A. L. The concept of development of shipping routes along the northern sea route. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2017, no. 1 (41), pp. 81—87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87. (In Russian).
2. Tezikov A., Ol'Khovik E. Generalized model of maritime transport of the Northern Sea Route. *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, June 14—18, 2021. Moscow, Russia. 2021, p. 176663.
3. Gascard J.-C., Riemann-Campe K., Gerdes R., Schyberg H., Randriamampianina R., Karcher M., Zhang J., Rafizadeh M. Future sea ice conditions and weather forecasts in the Arctic: Implications for Arctic shipping. *Ambio*, 2017, 46 (Suppl. 3), pp. 355—367. DOI: 10.1007/s13280-017-0951-5.
4. Kotlyakov V. M. On the causes and consequences of modern climate change. *Solnechno-zemnaya fizika*, 2012, iss. 21, pp. 110—114. (In Russian).
5. *Morskoy led*. I. E. Frolova, V. P. Gavrilo (eds.). St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1997. (In Russian).
6. The seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions. I. V. Ashik (ed.). St. Petersburg, AANII, 2021. (In Russian).
7. Overland J. E., Wang M., Walsh J. E., Stroeve J. C. Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation times scales. *Earth's Future*, 2013, vol. 2 (2), pp. 68—74. DOI: 10.1002/2013EF000162.
8. Khlystov A. I., Dolgachev V. P., Domozhilova L. M. Barycentric motion of the Sun and its consequences for the solar system. *Sovremennye global'nye izmeneniya prirodnoi sredy*. Vol. 3. *Fakторы global'nykh izmenenii*. Moscow, Nauchnyy mir, 2012. (In Russian).
9. Sherstyukov B. G. Vibrational climate system, resonances, long-distance communications, forecasts. *Obninsk, FGBU "VNIIGMI-MTSD"*, 2021, 222 p. (In Russian).
10. Global Ocean Physics Reanalysis. Available at: <https://resources.marine.copernicus.eu/products>.
11. Integrated Climate Data Center. Ocean. Available at: <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/>.
12. Volkov A. V., Galyamov A. L., Belousov P. E., Wolfson A. A. Application of space technologies in metal-

- logenic analysis of the Russian Arctic territory. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 2 (38), pp. 77—85. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-77-85. (In Russian).
13. *Teleti P. R., Luis A. J.* Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing. Intern. J. of Geosciences, 2013, vol. 4, no. 7, pp. 1031—1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.
14. Generalized maps of the state of the ice cover in the Arctic and freezing seas of Russia and the Greenland Sea. Available at: http://old.aari.ru/odata/_d0004.php. (In Russian).
15. *Dijkstra H. A.* Nonlinear physical oceanography. Moscow, Izhevsk: NITS “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, Institut komp’yuternykh issledovaniy, 2007. (In Russian).
16. *Helstrom C. W.* Statistical theory of signal detection. Moscow, Inostrannaya literatura, 1963. (In Russian).
17. *Ayvazyan S. A., Mkhitarian V. S.* Applied Statistics and Fundamentals of Econometrics. Moscow, Yuniti, 1998. (In Russian).
18. *Dumanskaya I. O.* Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Moscow; Obninsk, IG-SOTsIN, 2017. (In Russian).
19. *Zelenina L. A., Antipin A. L.* Arctic ice: monitoring and adaptation measures. Arktika i Sever, 2015, no. 18, pp. 122—130. (In Russian).
20. *Shibata H., Izumiyama K., Tateyama K., Enomoto H., Takahashi Sh.* Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980—2011, Annals of Glaciology, 2013, vol. 54, iss. 62, pp. 139—148. DOI: 10.3189/2013AoG62A123.
21. *Dobrodeev A. A., Sazonov K. E.* Motion of heavy-tonnage vessels in the ice drift conditions. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 2 (38), pp. 68—76. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-68-76. (In Russian).
22. *Kholoptsev A. V., Podporin S. A.* 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, 2019, vol. 11, no. 4, pp. 683—695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695. (In Russian).
23. *Abdusamatov Kh. I.* Lunar observatory to study the earth’s climate in the era of deep cooling. St. Petersburg, Nauka, 2017. 128 p. (In Russian).
24. *Ol’Khovik E.* Predicting the speed of ships on the Northern Sea Route using ice concentration isolines. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 14—18, 2021. Moscow, Russia. 20212.
25. *Tezikov A., Ol’Khovik E.* Studying the factors affecting the navigation duration along the Northern Sea Route // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, vol. 678, no. 1, p. 012013.

Information about the authors

Kholoptsev, Aleksandr Vadimovich, Dr. of Geography, Professor, Sevastopol branch of N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute, Professor, Sevastopol State University (61, Sovetskaya str., Sevastopol, Russia, 299011), e-mail: kholoptsev@mail.ru.

Podporin, Sergey Anatol’evich, PhD of Engineering, Associate Professor (33, Universitetskaya str., Sevastopol, Russia, 299053), e-mail: s.a.podporin@gmail.com.

Ol’Khovik, Evgeniy Olegovich, Dr. of Engineering, Associate Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (5/7, Dvinskaya str., Saint Petersburg, Russia, 198035), e-mail: olhovikeo@gumrf.ru.

Bibliographic description of the article

Kholoptsev, A. V., Podporin, S. A., Ol’Khovik, E. O. Changes in the ice situation on the Northern Sea Route depending on the movement of the Solar system planets. Arctic: Ecology and Economy, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 310—321. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-310-321.