

Анализ межгодовой изменчивости ледовых условий по маршруту плаваний «порт Сабетта — порт Мурманск» за период 1997–2018 гг.

В. Ю. Третьяков¹, С. В. Фролов², М. И. Сарафанов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,
Российская Федерация, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Для цитирования: Третьяков, В. Ю., Фролов, С. В., Сарафанов, М. И. (2019). Анализ межгодовой изменчивости ледовых условий по маршруту плаваний «порт Сабетта — порт Мурманск» за период 1997–2018 гг. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (3), 477–490. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.307>

Ввод в строй в поселке Сабетта на полуострове Ямал завода по сжижению природного газа, получаемого с крупного Южно-Тамбейского месторождения, требует организации морской транспортной системы для его вывоза. Запасы природного газа в этом месторождении составляют свыше одного триллиона кубометров. Актуальным является своевременное обеспечение перевозчиков достоверной информацией о состоянии ледяного покрова и прогнозах его изменения. Взаимодействие ледяного покрова с судами может приводить к аварийным ситуациям. Для наливных судов они особенно опасны из-за крупных разливов углеводородов и загрязнения окружающей среды. В статье рассмотрена внутри- и межгодовая изменчивость ледовых условий на маршруте плавания «п. Сабетта — пролив Карские Ворота — п. Мурманск», по которому осуществляется вывоз углеводородного сырья, за период 1997–2018 гг. Впервые для этого маршрута в среде ArcGIS выполнена обработка электронных ледовых карт архива Арктического и Антарктического научно-исследовательского института в формате шейпфайлов ArcGIS. Карты архива были созданы векторизацией спутниковых снимков. Получены протяженности маршрута во льдах общей сплоченностью 9 и более баллов при наличии старых, остаточных, толстых, однолетних льдов средней толщины, тонких однолетних, серо-белых, серых и начальных льдов, а также при частной концентрации толстых и суммы толстых и средних однолетних льдов 5 баллов и более для 24 декад с ноября по июнь. С помощью метода интегральных кривых и непараметрических статистических критериев однородности двух выборок Зигеля — Тьюки и Уилкоксона — Манна — Уитни выполнена проверка на однородность рядов межгодовой динамики декадных значений суммарных протяженностей участков маршрута, удовлетворяющих перечисленным выше условиям. В 2008–2018 гг. ледовые условия судоходства явно улучшились по сравнению с 1997–2007 гг. При этом изменения начались в 2003–2006 гг.

Ключевые слова: изменчивость ледовых условий судоходства, Баренцево море, Карское море, транспортировка сжиженного газа, порт Сабетта.

Введение

Существуют прогнозы, что к 2050 г. все Баренцево море будет практически свободно ото льда в течение всего года (Smedsrud et al., 2013). В период с 2004 по 2008 г. площадь многолетних льдов в зимний период сократилась на 1,5 млн км² и составила только одну треть акватории Арктического бассейна (Kwok and Untersteiner, 2011). По данным радиолокационной съемки за последние несколько десятилетий площадь морских льдов в летний период уменьшилась более чем на 30 %. Отмечено снижение средней толщины морских льдов на 40 % (Meier et al., 2014). Уменьшилось количество остаточных льдов, сократились площади ледяных массивов (Карклин и др., 2017; Юлин и др., 2018). К 2099 г. ожидается увеличение среднегодовой температуры поверхностного слоя воды в южной части Баренцева моря до 1 °С (Long and Perrie, 2017). Потепление не обязательно должно быть монотонным: в течение десятилетий могут происходить и понижения температуры (Данилов и др., 2014).

Колебания ледовитости арктических морей в XX в. — начале XXI в. происходили на фоне линейного тренда потепления. К 2030–2040-м гг. прогнозируются понижение температуры воздуха и увеличение ледовитости, которое будет наиболее заметно в приатлантическом секторе Арктики. Вероятно, продолжатся циклы колебаний ледовитости (Фролов и др., 2011). Современное потепление неизбежно сменится похолоданием климата Арктики (Большаянов и др., 2009). Рациональное природопользование в северных регионах требует знания статистических закономерностей параметров ледяного покрова и тенденций их изменения. Цель данной работы заключалась в анализе межгодовой изменчивости внутригодовой динамики ледовых условий плавания по маршруту «п. Сабетта — пролив Карские Ворота — п. Мурманск».

1. Методы

С помощью ряда разработанных на языке Python компьютерных программ в среде ArcGIS выполнена автоматизированная обработка электронных ледовых карт Баренцева и Карского морей формата шейпфайлов (рис. 1). Анализ выполнялся по отдельным декадам месяцев, если по маршруту плаваний присутствовали льды общей сплоченностью 9 и более баллов.

Вдоль маршрута плаваний создавались линейные объекты с наследованием атрибутов пересекаемых полигонов ледовых карт, выбор объектов и расчеты их протяженностей. Выделялись объекты с общей сплоченностью дрейфующих льдов 9 и более баллов. Затем из них в отдельные шейпфайлы записывались объекты с наличием льдов: 1) начальных; 2) серых; 3) серо-белых; 4) тонких однолетних; 5) однолетних средней толщины; 6) толстых однолетних; 7) с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов; 8) с суммой частных концентраций средних и толстых однолетних льдов 5 и более баллов (Номенклатура морских льдов, 1974, с. 4–13). При выделении объектов с общей сплоченностью 9 и более баллов исключались участки маршрута, где были только начальные формы льда с толщиной не более 10 см. Рассчитывались протяженности отдельных объектов и суммарные протяженности всех объектов, удовлетворяющих определенным условиям. Шейпфайлы с атрибутами суммарных протяженностей, удовлетворяющие

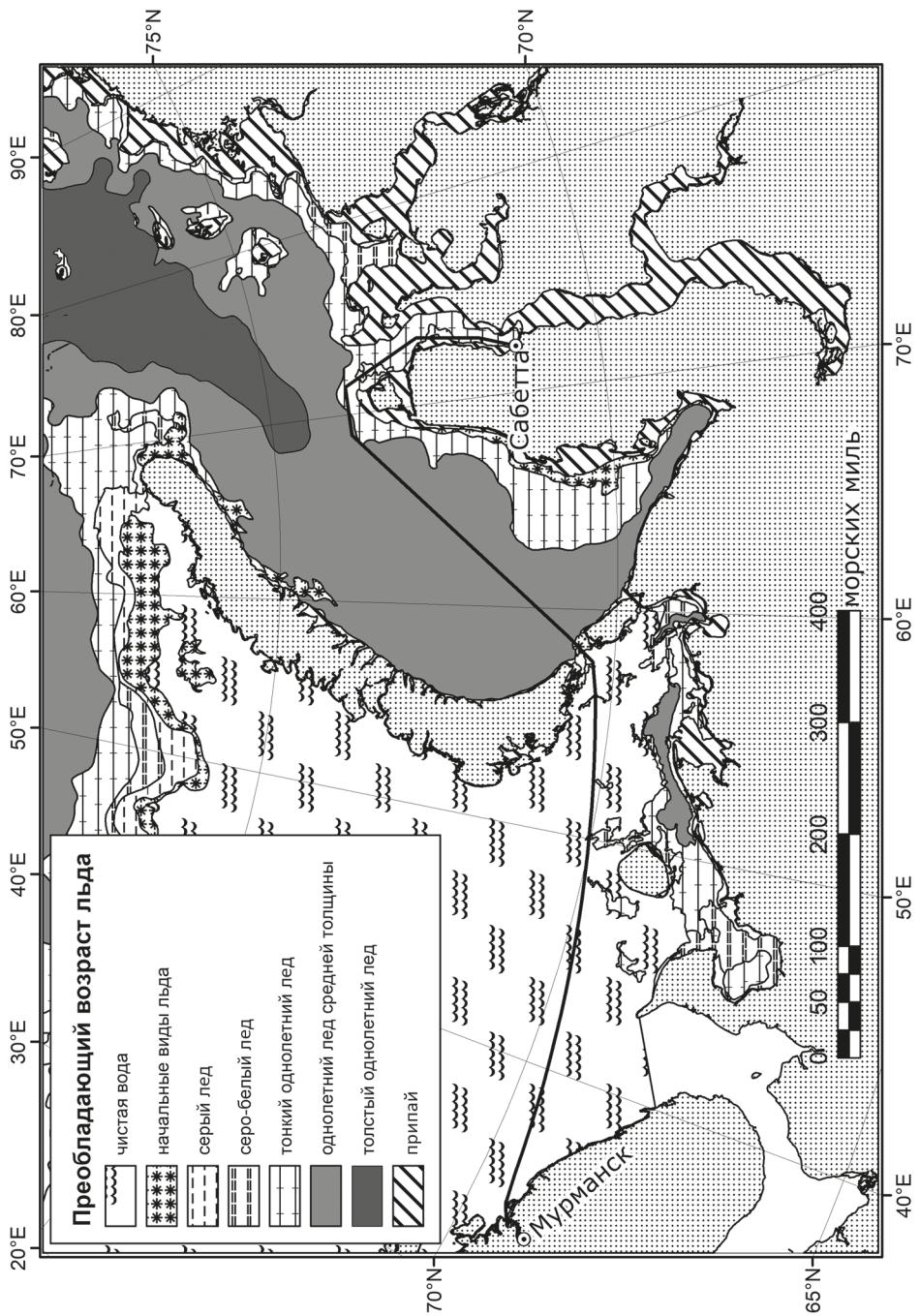


Рис. 1. Карта ледовой обстановки по маршруту плаваний в мае 2018 г.

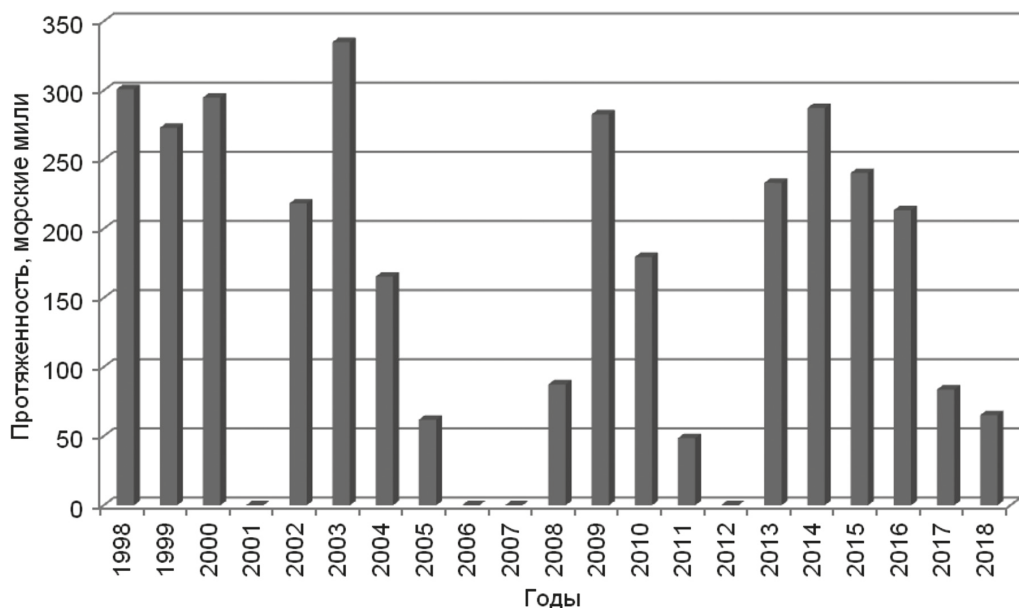


Рис. 2. Суммарная протяженность участков маршрута в дрейфующих льдах с общей сплоченностью 9 и более баллов и с присутствием толстых льдов в третью декаду мая

одинаковому условию и относящиеся к одинаковой внутригодовой декаде разных лет, объединялись. Затем атрибутивные таблицы экспортировались в файлы формата Microsoft Excel. Были получены ряды значений межгодовой изменчивости характеристик ледяного покрова для 24 внутригодовых декад с ноября по июнь. Длина рядов составляла 20–22 элемента. На рис. 2 представлен пример ряда межгодовой изменчивости.

В случае отсутствия льдов определенной возрастной категории значение суммарной протяженности участков маршрута с их наличием равно нулю. Протяженность маршрута плавания в сплоченных льдах при наличии льдов определенной возрастной градации — важный параметр статистической модели оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций, вызываемых сжатиями дрейфующих льдов, методом Монте-Карло (Третьяков и др., 2016). При оценке вероятности аварийной ситуации частная концентрация льдов самой возрастной категории не важна, важен лишь факт их наличия, указывающий на возможность сжатия судна льдами этой категории. В модели используются статистические распределения протяженностей маршрута в сплоченных льдах с наличием льдов различных возрастных категорий. Поэтому при построении статистических распределений использовались только ненулевые значения протяженностей, а для исследования межгодовой изменчивости — только те ряды, число ненулевых элементов которых превышало 17. Выбор этого числа определяется тем, что применение ранговых непараметрических критериев однородности Уилкоксона — Манна — Уитни и Зигеля — Тьюки правомерно лишь при сравнении выборок с числом элементов не менее 8–9. Протяженности маршрута в сплоченных льдах при наличии толстых льдов частной концентрацией 5 и более баллов и при суммарной концентрации толстых

и средних однолетних льдов 5 и более баллов являются важными показателями степени трудности плаваний. При анализе межгодовой изменчивости этих показателей учитывались все значения, включая нулевые.

Анализ рядов межгодовой изменчивости выполнен с помощью ряда разработанных в среде Mathcad программ. С помощью метода интегральных кривых выявлялись ряды, подозрительные на неоднородность значений. В случае отсутствия изломов на интегральной кривой при анализе однородности ряд исходных значений делился пополам. При одном изломе ряд делился на два набора значений по времени излома. В случае более одного излома ряд исходных значений подразделялся на две части по времени наиболее выраженного излома.

Затем выполнялась проверка нулевой гипотезы о принадлежности обоих наборов данных к одной генеральной совокупности с помощью ранговых непараметрических критериев однородности Уилкоксона — Манна — Уитни и Зигеля — Тьюки с получением величины ее верности в процентах. Однородность ряда свидетельствует об отсутствии существенных изменений значений, неоднородность — об их наличии. В случае опровержения нулевой гипотезы об однородности ряда хотя бы одним из критериев ряд считался неоднородным. Если вероятность верности нулевой гипотезы меньше 50 %, то ряд также неоднороден. В табл. 1 приведен пример результатов проверки однородности ряда значений и жирным шрифтом выделены случаи опровержения нулевой гипотезы однородности ряда значений.

Таблица 1. Результаты проверки гипотезы об однородности последовательностей величин суммарных протяженностей отрезков маршрута в дрейфующих льдах сплоченностью 9 и более баллов с присутствием однолетних льдов средней толщины

| Излом | Месяц, декада | Критерий Уилкоксона — Манна — Уитни (проценты верности гипотезы) | Критерий Зигеля — Тьюки (проценты верности гипотезы) |
|-------------|---------------|--|--|
| Есть | 02_3 | Опровергается | Опровергается |
| Нет | 03_1 | 92 | 96 |
| Нет | 03_2 | 94 | 34 |
| Нет | 03_3 | 62 | 96 |
| Нет | 04_1 | 56 | 96 |
| Есть | 04_2 | 52 | Опровергается |
| Есть | 04_3 | 52 | 20 |
| Нет | 05_1 | 32 | Опровергается |
| Нет | 05_2 | 62 | 54 |
| Нет | 05_3 | 28 | 86 |

Всего обработано около 1250 векторных ледовых карт. Сформировано и проанализировано 192 ряда протяженностей маршрута плаваний в сплоченных дрей-

фьющих льдах при наличии льдов различных возрастных категорий. Для анализа использовано около 4 тыс. значений протяженностей пути в дрейфующих льдах.

2. Результаты

В табл. 2 и 3 приведены обобщенные результаты проверки на однородность подекадных рядов протяженности участков маршрута за 1997–2018 гг., то есть за весь представленный в Архиве электронных ледовых карт Арктического и Антарктического научно-исследовательского института период для оценки степени изменения ледовых условий. Более 72% рядов являются неоднородными. Максимально неоднородны ряды суммарных протяженностей участков маршрута плаваний с общей сплоченностью льдов 9 баллов и более при существовании начальных льдов в 90% случаев. Увеличилась сумма протяженностей участков пути в сплоченных льдах с присутствием в ледяном покрове начальных льдов, особенно в марте–мае, при максимальном развитии ледяного покрова и наличии толстых и средних льдов. Участки начальных льдов существенно облегчают условия ледового плавания.

Таблица 2. Однородность рядов протяженности маршрута в дрейфующих льдах со сплоченностью 9 и более баллов

| Присутствующий лед | Число рядов | | Доля неоднородных рядов (%) |
|----------------------------|-------------|--------------|-----------------------------|
| | однородных | неоднородных | |
| Все виды | 3 | 21 | 88 |
| Начальный | 2 | 18 | 90 |
| Серый | 10 | 11 | 52 |
| Серо-белый | 7 | 14 | 68 |
| Однолетний тонкий | 8 | 11 | 58 |
| Однолетний средней толщины | 4 | 6 | 60 |

Таблица 3. Однородность подекадных рядов протяженности маршрута в дрейфующих льдах общей сплоченностью 9 и более баллов и с частными концентрациями толстых, а также суммы толстых и средних однолетних льдов 5 и более баллов

| Градация возраста льдов | Число рядов | | % неоднородных рядов |
|-------------------------|-------------|--------------|----------------------|
| | однородных | неоднородных | |
| Толстые | 1 | 9 | 90 |
| Толстые и средние | 4 | 11 | 73 |

При проверке однородности рядов значений протяженностей маршрута в сплоченных дрейфующих льдах с частными концентрациями 5 и более баллов толстых, а также суммы толстых и средних однолетних льдов не учитывались ряды с исключительно нулевыми значениями. Анализировались ряды, имеющие хотя бы одно отличное от нуля значение.

Также высока неоднородность рядов суммарных протяженностей участков маршрута во льдах с общей сплоченностью не менее 9 баллов и с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов: 90 % рядов неоднородны. Выполнены сравнения средних значений 1-й и 2-й частей неоднородных рядов, разделенных по местам изломов на интегральных кривых. Результаты сравнений приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4. Сравнение математических ожиданий 1-й и 2-й подобластей неоднородных рядов суммарных протяженностей маршрута в дрейфующих льдах сплоченностью 9 и более баллов

| Присутствующий лед | Количество рядов с математическим ожиданием 2-й части ряда | |
|----------------------------|--|-----------------------------------|
| | меньшим по сравнению с 1-й частью | большим по сравнению с 1-й частью |
| Все виды | 21 | 0 |
| Начальный | 6 | 12 |
| Серый | 11 | 0 |
| Серо-белый | 14 | 0 |
| Однолетний тонкий | 11 | 0 |
| Однолетний средней толщины | 4 | 2 |

Таблица 5. Сравнение математических ожиданий 1-й и 2-й подобластей неоднородных рядов суммарных протяженностей маршрута в дрейфующих льдах общей сплоченностью 9 и более баллов и с частной концентрацией толстых, а также суммы толстых и средних льдов 5 и более баллов

| Градация возраста льдов | Количество рядов с математическим ожиданием 2-й части ряда | |
|-------------------------|--|-----------------------------------|
| | меньшим по сравнению с 1-й частью | большим по сравнению с 1-й частью |
| Толстые | 9 | 0 |
| Толстые и средние | 10 | 1 |

Увеличение средних значений наблюдается только для протяженностей пути в сплоченных льдах при наличии начальных льдов, для всех остальных протяженностей средние значения уменьшились.

Из табл. 5 очевидно явное уменьшение протяженности маршрута плаваний в сплоченных льдах с преобладанием толстых и средних льдов, то есть создающих максимальные трудности при проведении морских перевозок.

Выполнены сравнения математических ожиданий разных половин всех рядов протяженностей независимо от их однородности. В табл. 6–8 представлены результаты сравнения средних значений за 1997–2007 и 2008–2018 гг. Символ «+» означает увеличение средней протяженности в 2008–2018 гг. по сравнению с 1997–2007 гг.,

«-» — уменьшение, «0» — отсутствие изменения. Последнее отмечено для случаев нулевых протяженностей в обоих сравниваемых периодах.

Таблица 6. Изменения за 1997–2018 гг. суммарной протяженности участков маршрута в сплоченных льдах при наличии льдов различных категорий возраста

| Месяц, декада | Любые старше начальных | Толстые | Средние | Тонкие |
|---------------|---------------------------|---------|---------|--------|
| 11_1 | - | 0 | 0 | - |
| 11_2 | - | 0 | 0 | - |
| 11_3 | - | 0 | 0 | - |
| 12_1 | - | 0 | 0 | - |
| 12_2 | - | 0 | 0 | - |
| 12_3 | - | 0 | + | + |
| 1_1 | - | 0 | - | - |
| 1_2 | - | 0 | - | - |
| 1_3 | - | 0 | + | - |
| 2_1 | - | 0 | - | - |
| 2_2 | - | 0 | - | - |
| 2_3 | - | - | - | - |
| 3_1 | - | - | - | - |
| 3_2 | - | - | - | + |
| 3_3 | - | - | + | - |
| 4_1 | - | - | + | - |
| 4_2 | - | - | + | - |
| 4_3 | - | + | + | - |
| 5_1 | - | - | - | - |
| 5_2 | - | - | - | - |
| 5_3 | - | - | - | - |

Табл. 6 демонстрирует снижение протяженности маршрута в сплоченных льдах для всего зимнего периода, протяженности маршрута в сплоченных льдах с присутствием толстых льдов — для всего зимнего периода за исключением третьей декады апреля, для которой отмечено увеличение из-за достижения льдами толщины 120 см в более позднее время. Увеличение протяженности маршрута в сплоченных льдах с присутствием средних однолетних льдов с 3-й декады марта по 3-ю декаду апреля также объясняется сдвигом этапов нарастания толщины льда на более поздние сроки.

Табл. 7 показывает увеличение суммарной протяженности участков маршрута во льдах с общей сплоченностью не менее 9 баллов при наличии начальных льдов, что существенно улучшает условия ледового плавания.

Таблица 7. Изменения за 1997–2018 гг. суммарной протяженности участков маршрута в дрейфующих льдах сплоченностью 9 и более баллов с присутствием льдов

| Месяц, декада | Серо-белые льды | Серые льды | Начальные льды |
|---------------|-----------------|------------|----------------|
| 11_1 | - | - | - |
| 11_2 | - | - | - |
| 11_3 | - | - | - |
| 12_1 | - | - | - |
| 12_2 | - | - | + |
| 12_3 | - | - | - |
| 1_1 | - | - | + |
| 1_2 | - | - | + |
| 1_3 | - | + | + |
| 2_1 | - | - | + |
| 2_2 | - | - | + |
| 2_3 | - | - | + |
| 3_1 | - | - | + |
| 3_2 | - | - | + |
| 3_3 | - | - | + |
| 4_1 | - | - | + |
| 4_2 | - | - | + |
| 4_3 | - | - | + |
| 5_1 | - | - | + |
| 5_2 | - | - | + |
| 5_3 | - | - | - |

В табл. 8 демонстрируется сокращение для всего зимнего периода протяженности маршрута в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов, то есть участков с самыми суровыми условиями плавания. Наибольшие сокращения отмечены в апреле и мае. На рис. 3 представлена регрессионная зависимость между годом и протяженностью маршрута в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов в первую декаду мая. Очевиден тренд уменьшения значения этого параметра.

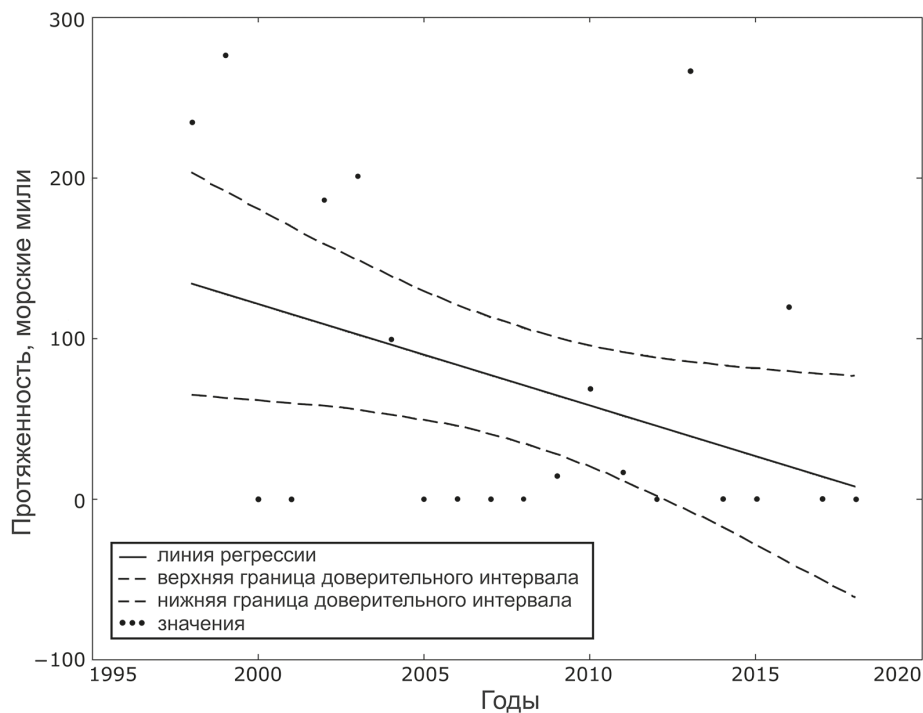


Рис. 3. Протяженность пути в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов в первую декаду мая

Таблица 8. Изменения за 1997–2018 гг. суммарной протяженности участков маршрута в сплоченных льдах при частной концентрации 5 и более баллов

| Месяц, декада | Толстые льды | Толстые и средние льды |
|---------------|--------------|------------------------|
| 1_1 | 0 | - |
| 1_2 | 0 | + |
| 1_3 | 0 | - |
| 2_1 | 0 | - |
| 2_2 | 0 | - |
| 2_3 | - | - |
| 3_1 | - | - |
| 3_2 | - | - |
| 3_3 | - | - |
| 4_1 | - | - |
| 4_2 | - | + |
| 4_3 | - | + |
| 5_1 | - | - |
| 5_2 | - | + |
| 5_3 | - | - |

Важно отметить, что относительная протяженность, то есть отношение длины пути в сплоченных льдах при наличии льдов определенных возрастных градаций или их определенной частной концентрации к общей протяженности маршрута в сплоченных льдах, может возрастать при уменьшении абсолютной протяженности маршрута в сплоченных льдах. Так, средняя протяженность пути в дрейфующих льдах с общей сплоченностью 9 баллов и более с присутствием толстых однолетних льдов в 3-ю декаду мая уменьшилась с 165 морских миль в 1997–2007 гг. до 156 миль в 2008–2018 гг. При этом относительная протяженность доли маршрута в сплоченных льдах при наличии толстых льдов возросла с 0,40 до 0,49.

3. Обсуждение результатов

Нулевая гипотеза однородности рядов межгодовой изменчивости подекадных значений суммарных протяженностей участков маршрута, отвечающих определенным ледовым условиям, не подтвердилась более чем в 72 % случаев. При этом количество интегральных кривых протяженностей маршрута в сплоченных льдах с наличием явных изломов составляет 27 % от их общего количества. Максимальное число интегральных кривых с изломами (57 %) отмечено на графиках протяженностей маршрута плаваний в сплоченных льдах с частной концентрацией 5 и более баллов суммы толстых и однолетних льдов средней толщины. Большинство кривых с явными изломами отмечено в ноябрьских декадах. Вероятно, в течение последних 20 лет произошли существенные изменения процессов нарастания толщины льда во время осеннего ледообразования.

Сравнение осредненных протяженностей за первую и вторую половину 1997–2018 гг. выявило уменьшение протяженности пути в сплоченных льдах для всего срока с ноября по май. Для большинства декад этого периода протяженность маршрута в сплоченных льдах при наличии толстых, средних, тонких однолетних, серо-белых и серых льдов также уменьшилась.

Обнаружено уменьшение протяженности маршрута в сплоченных дрейфующих льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов, а также с их суммарной с однолетними льдами средней толщины концентрацией 5 баллов и более. Протяженность маршрута в сплоченных льдах с наличием начальных льдов, наоборот, выросла. Вероятно, снижение суровости зимнего периода продлевает процесс образования льда и первой стадии нарастания его толщины, а переход начальных льдов в градацию молодых происходит позднее. Увеличение в сплоченных льдах участков с начальными льдами улучшило условия плавания по маршруту.

4. Выводы

В результате исследования ледовых условий по стандартному маршруту плаваний «порт Сабетта — пролив Карские Ворота — порт Мурманск» за 1997–2018 гг. сделаны следующие выводы:

1. Числовые ряды межгодовой динамики суммарных протяженностей участков маршрута, отвечающих определенным ледовым условиям, неоднородны более чем в 72 % случаев.

2. Уменьшилась протяженность маршрута в сплоченных дрейфующих льдах, в сплоченных льдах с присутствием молодых (серых и серо-белых) льдов, тонких однолетних льдов, однолетних льдов средней толщины и толстых однолетних льдов; в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых, а также с частной суммарной концентрацией толстых и средних однолетних льдов 5 баллов и более. Увеличилась протяженность маршрута в сплоченных дрейфующих льдах с наличием начальных льдов.
3. Максимум суммарной протяженности участков маршрута плаваний в дрейфующих льдах с общей сплоченностью не менее 9 баллов приходится на март и апрель. Максимум суммарной протяженности участков маршрута в дрейфующих льдах со сплоченностью 9 и более баллов и наличием однолетних льдов средней толщины, а также толстых однолетних льдов отмечен в конце апреля и мае.
4. За 1997–2018 гг. на стандартном маршруте «порт Сабетта — пролив Карские Ворота — порт Мурманск» ни разу не были обнаружены старые льды.

Таким образом, очевидно явное улучшение ледовых условий плавания в период с ноября по май. Однако это улучшение не исключает риска аварий с танкерами, перевозящими углеводородное сырье (нефть и сжиженный природный газ), вследствие чего возможны аварийные разливы углеводородов, приводящие к загрязнению природной среды. Результаты исследования планируется использовать для построения эмпирических статистических распределений характеристик ледяного покрова Северного морского пути, применяемых в качестве параметров при моделировании плаваний.

Литература

- Большаинов, Д. Ю., Макаров, А. С., Морозова, Е. А., Павлов, М. В., Саватюгин, Л. М., 2009. Развитие природной среды полярных областей Земли последнего тысячелетия по данным изучения донных отложений озер. *Проблемы Арктики и Антарктики* 1 (81), 108–115.
- Данилов, А. И., Алексеев, Г. В., Клепиков, А. В., 2014. Последствия изменения климата для морской деятельности в Арктике. *Лед и снег* 54 (3), 91–99.
- Карклин, В. П., Юлин, А. В., Шаратунова, М. В., Мочнова, Л. П., 2017. Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря. *Проблемы Арктики и Антарктики* 4 (114), 37–46.
- Номенклатура морских льдов. Условные обозначения для ледовых карт, 1974. Гидрометеиздат, Ленинград.
- Третьяков, В. Ю., Фролов, С. В., Терентьева, Д. В., 2016. Моделирование экологических рисков загрязнения окружающей среды углеводородами при их транспортировке в Карском море танкерами. *Метеорологический вестник* 8 (1), 59–87.
- Фролов, И. Е., Гудкович, З. М., Карклин, В. П., Смоляницкий, В. М., 2011. Региональные особенности климатических изменений морского ледяного покрова в XX — начале XXI века и их причины. *Лед и снег* 3 (115), 91–98.
- Юлин, А. В., Шаратунова, М. В., Павлова, Е. А., Иванов, В. В., 2018. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря. *Проблемы Арктики и Антарктики* 64 (3), 229–240.
- Kwok, R., Untersteiner, N., 2011. The thinning of Arctic sea ice. *Physics Today* 64 (4), 36.
- Long, Z., Perrie, W., 2017. Changes in Ocean Temperature in the Barents Sea in the Twenty-First Century. *Journal of Climate* 30 (15), 5901–5921.
- Meier, W.N., Hovelsrud, G.K., van Oort B.E.H., Key, J.R., Kovacs, K.M., Michel, Ch., Haas, Ch., Granskog, M.A., Gerland, S., Perovich, D.K., Makshtas, A., Reist, J.D., 2014. Arctic sea ice in transforma-

tion: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity. *Reviews of Geophysics* 52 (3), 185–217.

Smedsrud, L. H., Esau, I., Ingvaldsen, R. B., Eldevik, T., Haugan, P. M., Li, C., Lien, V. S., Olsen, A., Omar, A. M., Ottera, O. H., Risebrobakken, B., Sando, A. B., Semenov, V. A., Sorokina, S. A., 2013. The role of the Barents sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics* 51 (3), 415–449.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2018 г.

Статья рекомендована в печать 3 июня 2019 г.

Контактная информация:

Третьяков Виктор Юрьевич — v_yu_tretyakov@mail.ru

Фролов Сергей Викторович — svf@aari.ru

Сарафанов Михаил Игоревич — mik_sar@mail.ru

Analysis of the interannual variability of ice conditions along the route “Sabetta — Murmansk” for the period 1997–2018

V. Yu. Tretyakov¹, S. V. Frolov², M. I. Sarafanov¹

¹ St. Petersburg State University

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² The State Scientific Center of the Russian Federation

“Arctic and Antarctic Research Institute”

38, ul. Beringa, St. Petersburg, 199397, Russian Federation

For citation: Tretyakov, V. Yu., Frolov, S. V., Sarafanov, M. I. (2019). Analysis of the interannual variability of ice conditions along the route “Sabetta — Murmansk” for the period 1997–2018. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (3), 477–490. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.307> (In Russian)

The start-up of a plant for liquid gas production in the town of Sabetta (Russia, Yamal Peninsula) requires the creation of a marine transport system for gas shipment. The town is a significant cluster for gas processing and export from South-Tambey Field. The field stock is estimated at more than one trillion cubic meters of natural gas. Ice cover is a source of possible accidents with tankers. The accidents can lead to environment contamination. Here we consider analysis of the intra- and inter-annual variability of ice conditions on the navigation route “Sabetta seaport — Kara Gate — Murmansk seaport” for the period of 1997–2018. The route is a path for export of liquid gas. Electronic ice maps of the archives of the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) were processed. Maps of the archive were created by vectorization of satellite images. For 24 decades from November to June, we obtained the lengths of the route in close floating ice with presence of thick, medium, thin first-year ice, grey-white, grey and new ice, and with partial concentrations of thick and a sum of thick and medium first-year ice equal to five or more points. Tests of homogeneity of the lengths inter-annual series were carried out by means of the method of integral curves and nonparametric Wilcoxon-Mann-Whitney and Siegel-Tukey criteria. Improvement of ice conditions along the route is revealed.

Keywords: ice conditions, variability, the Barents Sea, the Kara Sea, liquid gas transportation, Sabetta Harbor.

References

- Bol'shiianov, D. Iu., Makarov, A. S., Morozova, E. A., Pavlov, M. V., Savatiugin, L. M.*, 2009. Development of the Polar Regions environment during last millennium on the base of lakes sediments investigations. *Problemy Arktiki i Antarktiki* 1 (81), 108–115. (In Russian)
- Danilov, A. I., Alekseev, G. V., Klepikov, A. V.*, 2014. The effects of climate change on marine activities within the Arctic. *Led i Sneg* 54 (3), 91–99. (In Russian)
- Frolov, I. E., Gudkovich, Z. M., Karklin, V. P., Smolianitskii, V. M.*, 2011. Regional features of climatic changes in the sea ice cover during the 20th — early 21st centuries and their causes. *Led i Sneg* 3 (115), 91–98. (In Russian)
- Julin, A. V., Sharatunova, M. V., Pavlova, E. A., Ivanov, V. V.*, 2018. Seasonal and inter-annual changes of the ice massifs within the East Siberian Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki* 64 (3), 229–240. (In Russian)
- Karklin, V. P., Julin, A. V., Sharatunova, M. V., Mochnova, L. P.*, 2017. Climate variability of the Kara Sea ice massifs. *Problemy Arktiki i Antarktiki* 4 (114), 37–46. (In Russian)
- Kwok, R., Untersteiner, N.*, 2011. The thinning of Arctic sea ice. *Physics Today* 64 (4), 36.
- Long, Z., Perrie, W.*, 2017. Changes in Ocean Temperature in the Barents Sea in the Twenty-First Century. *Journal of Climate* 30 (15), 5901–5921.
- Meier, W. N., Hovelsrud, G. K., van Oort B. E. H., Key, J. R., Kovacs, K. M., Michel, Ch., Haas, Ch., Gran-skog, M. A., Gerland, S., Perovich, D. K., Makshtas, A., Reist, J. D.*, 2014. Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity. *Reviews of Geophysics* 52 (3), 185–217.
- Nomenclature of sea ice. The ice charts symbols, 1974. Gidrometeoizdat Publ., Leningrad. (In Russian)
- Smedsrud, L. H., Esau, I., Ingvaldsen, R. B., Eldevik, T., Haugan, P. M., Li, C., Lien, V. S., Olsen, A., Omar, A. M., Ottera, O. H., Risebrobakken, B., Sando, A. B., Semenov, V. A., Sorokina, S. A.*, 2013. The role of the Barents sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics* 51 (3), 415–449.
- Tref'iakov, V. Yu., Frolov, S. V., Terent'eva, D. V.*, 2016. Simulation of ecological risks of the environment contamination by hydrocarbons at their transportation within the Kara Sea by tankers. *Meteorologicheskii vestnik* 8 (1), 59–87. (In Russian)

Received: September 26, 2018

Accepted: June 3, 2019

Contact information:

Victor Yu. Tretyakov — v_yu_tretyakov@mail.ru

Sergey V. Frolov — svf@aari.ru

Mikhail I. Sarafanov — mik_sar@mail.ru