УДК 551.583 + 51.467

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ДРЕЙФА МОРСКОГО ЛЬДА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ (НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ 1978–2017 гг.)

В. А. Волков^{1,*}, А. В. Мушта^{1,2}, Д. М. Демчев¹

Представлено академиком РАН Г.Г. Матишовым 22.04.2018 г.

Поступило 13.06.2018 г.

На базе 39-летнего ряда данных спутниковых наблюдений (1978–2017 гг.) выделены три основных типа крупномасштабного поля дрейфа морского льда в Северном Ледовитом океане (СЛО) и типы атмосферной циркуляции, формирующие структуру полей дрейфа, описан механизм влияния изменений полей дрейфа на межгодовые вариации ледовитости СЛО.

Ключевые слова: Арктика, Северный Ледовитый океан, морской лёд, дрейф льда, дистанционное зондирование, межгодовая изменчивость.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524884439-442>

За последние десятилетия площадь арктических льдов сокращалась до рекордно малых значений. Для объяснения причин колебаний ледовитости выполнено исследование динамических факторов, влияющих на морской лед в Арктике. Предпосылками этого исследования явились идеи о взаимосвязи изменений крупномасштабной структуры поля дрейфа с условиями нарастания и деградации ледяного покрова, сформулированные ещё советскими учеными. Надо отметить, что концепция роли динамических факторов в изменении ледовитости практически не разрабатывается зарубежными океанологами.

Долгое время существовали две противоречивые точки зрения о характере циркуляции вод и льдов Арктического бассейна (АБ): 1) движение вод и льдов во всём АБ антициклоническое [1, 2, 3], 2) поверхностные воды и льды из всех точек АБ движутся к проливу Фрама по кратчайшим путям [4, 5].

Используя результаты наблюдений дрейфующих станций и воздушных высокоширотных экспедиций, А.Ф. Трешников в 1954 г. составил первую динамическую карту [6], на которой проявились черты известной теперь схемы — Трансарктическое течение (ТАТ), направленное из района Чукотского моря к проливу Фрама, антициклонический круговорот (АЦК) вод в Амеразийском суббассейне в Канадской

котловине и локальные циклонические круговороты вод, расположенные к югу от ТАТ.

Первая типизация крупномасштабной циркуляции льда в Арктике [7], разработанная на основе модельных расчетов и классификации полей атмосферного давления [8], включала в себя два типа дрейфа с разной степенью развития АЦК. В 1997 г. А.Ю. Прошутинский на основе экспериментов с двумерной ветровой баротропной моделью для периода 1946–1993 гг. выявил подобные типы циркуляции льда в Северном ледовитом океане (СЛО) в зависимости от характера атмосферной циркуляции — антициклональной или циклональной [9].

В работе [10] впервые на основании анализа уникальных данных крупномасштабных океанографических съёмок 1973–1979 гг. с применением диагностической модели циркуляции было показано, что в динамике главных элементов структуры циркуляции вод и льдов существуют временные циклы с различными частотами для зон ТАТ и АЦК (в Евразийском (ЕСб) и Амеразийском суббассейнах (АСб), разделённых хребтом Ломоносова). Отмечена существенная разница значений суммарной кинетической энергии (КЭ) в ЕСб и АСб. Так, в ЕСб размах колебаний КЭ почти в 4 раза больше, чем в АСб, при этом во втором преобладает 2–3-летняя цикличность, отражающая атмосферные процессы над регионом, а в ЕСб тенденция изменчивости — около 6–8 лет.

Если первые типизации были основаны на модельных данных или на разрозненных данных наблюдений за дрейфом судов, то благодаря наблюдениям со спутников стало возможным исследовать многолетние изменения полей дрейфа на основе данных, регулярных во времени и пространстве.

¹ Научный фонд “Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена”, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле

* E-mail: vladimir.volkov@niersc.spb.ru

Рис. 1. Основные структуры дрейфа льда в зимнее время 1979–2018 гг.: (а) – интенсивный АЦК; (б) – интенсивное ТАТ; (в) – «разделяющий» дрейф.

В качестве исходной нами использована уникальная информация о ежедневных значениях векторов дрейфа на сетке 25 км из базы: NOAA/NASA Polar Pathfinder (http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0116_icemotion.gd.html) с 1978 по 2017 гг., сформированной по результатам обработки данных спутниковых датчиков SMMR, SSM/I и AMSR-E.

Следует отметить, что изменчивость ледовитости АБ обусловлена совместным влиянием как термических факторов, так и динамических, причём вклад температуры атмосферы составляет около 20% [11], а наибольшие изменения определяются динамическими факторами за счёт перераспределения льда, смены завихренности поля дрейфа и формирования замкнутых циркуляций, наличие которых определяет время пребывания льдов в зоне с низкими температурами и формирует условия, благоприятные для нарастания льда, и тенденции изменения ледовитости и массы льда в СЛО с учётом числа градусо-дней мороза. Известно [12], что наиболее существенное перераспределение льда в СЛО происходит в зимнее время, а летом уровень динамики снижается. Таким образом, можно утверждать, что именно зимний режим в большей степени определяет климатические изменения ледяного покрова.

Анализ межгодовой изменчивости крупномасштабных полей дрейфа проводился на основе серии среднесезонных карт дрейфа для зимнего сезона, рассчитанных по первичной базе данных Pathfinder, с применением современных методов обработки векторных рядов и полей [13] и позволил разработать новую типизацию крупномасштабных полей дрейфа морского льда в СЛО в климатическом временном масштабе.

Было выделено не два (как ранее), а три основных типа циркуляции льда (рис. 1), преобладающих в течение зимнего периода с 1978 по 2017 гг., и оценена взаимосвязь изменения структуры поля дрейфа с изменениями атмосферной циркуляции и ледовитости за последние десятилетия.

Каждый тип циркуляции льда характеризуется взаимным расположением основных крупномасштабных структур дрейфа (АЦК и ТАТ), которое формирует генеральную схему дрейфа льда. Установлено, что в любой год в СЛО проявляются как АЦК, так и ТАТ, но в разной степени развития формы, интенсивности и «изолированности» друг от друга. Типизация основана на выделении преобладающей по площади крупномасштабной структуры дрейфа льда в АБ и оказывающей наибольшее влияние на перераспределение льда и формирование ледового режима в рассматриваемый год.

Наиболее часто встречается «классическая» структура дрейфа (рис. 1а) с ярко выраженным АЦК, занимающим большую часть СЛО (что способствует накоплению льда), и ТАТ, ответвляющимся от АЦК в районе Чукотского моря и несущим льды к проливу Фрама (рис. 1а). Согласно полученным картам, такая схема ярче проявлялась в 1979–1982, 1984, 1986, 1992, 1997, 2001, 2003, 2012–2015 гг. Этот тип включает в себя две структуры, выделенные ранее З.М. Гудковичем [12].

Две других схемы прежде не были отмечены в работах по исследованию дрейфа в СЛО.

Во второй по повторяемости схеме дрейфа льда (рис. 1б) менее интенсивный АЦК смещён к берегам Канадского арктического архипелага, зона ТАТ с

высокими скоростями расширена, стрежень сдвинут в сторону моря Лаптевых, что создаёт условия для увеличения выноса льда из СЛО через пролив Фрама. Этот тип дрейфа был выявлен в 1987, 1994, 2002 гг., наиболее ярко он был выражен в 2006, 2007 и 2009 гг.

Третья схема отличается наименьшей степенью интенсивности АЦК и ТАТ (рис. 1в). Основной “выносной” поток льда начинается в море Лаптевых и блокирует отток льда в ТАТ из Чукотского моря и района Канадского арктического архипелага, сокращая динамическое взаимодействие между суббассейнами и способствуя накоплению льда в АСб, при этом вынос льда из Евразийских морей к проливу Фрама наиболее мощный. Этот переходный тип дрейфа содействует возникновению так называемой “ледовой оппозиции”, когда ледовые условия в западном и восточном секторах российской Арктики в летний сезон существенно отличаются [14]. Такую структуру отчётливо можно выявить в 1983, 1988–1990, 1998–1999, 2004, 2010–2011 гг.

Сопоставление календаря среднесезонных типов циркуляции льдов в рамках предложенной типизации и преобладающих в зимний период типов атмосферной циркуляции по классификации Вангенгейма–Гирса–Дыдиной [15] позволило определить соответствие каждого из трёх типов дрейфа преобладающему в этот год типу циркуляции атмосферы над Северным полушарием. Показано, что типы циркуляции льдов 1а и 1в, формирующие благоприятные для нарастания льда условия, соответствуют антициклоническому типу циркуляции атмосферы.

Выявленные новые фундаментальные особенности смены структуры дрейфа льда, управляемые циркуляцией атмосферы над северной полярной областью, играют важнейшую роль в формировании условий, определяющих как изменение площади многолетних льдов, так и средней толщины льдов в

СЛО, что необходимо учитывать при анализе климатических изменений, в том числе при построении глобальных моделей, и позволяют объяснить резкие изменения ледовитости, произошедшие в 2007 и 2012–13 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубов Н.Н., Сомов М.М.* // Пробл. Арктики. 1940. № 2. С. 51.
2. *Ширшов П.П.* Доклады на общем собрании Академии Наук СССР, 14–17 февраля. М.: Изд-во АН СССР, 1944. С. 110–140.
3. *Шулейкин В.В.* Физика моря М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 833 с.
4. *Шокальский Ю.М.* // Пробл. Арктики. 1940. № 2. С. 34–38.
5. *Буйницкий В.Х.* // Тр. дрейфующей экспедиции Главсевморпути на ледокольном пароходе «Г. Седов», 1937–1940 гг. 1951. Т. 4. С. 74–179.
6. *Трешников А.Ф., Баранов Г.И.* Циркуляция вод Арктического бассейна. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 158 с.
7. *Гудкович З.М., Доронин Ю.П.* Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 112 с.
8. *Гордиенко П.А., Карелин Д.Б.* // Пробл. Арктики. 1945. №3. С. 5–35.
9. *Proshutinsky A.Y., Johnson M.A.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № C6. P. 12 493–12 514.
10. *Беляков Л.Н., Волков В.А., Пономарев В.И., Чернышов А.Ф.* // ДАН. 1984. Т. 276. № 4. С. 946–949.
11. *Makshtas A.P., Shoutilin S.V., Andréas E.L.* // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C7.
12. *Фролов И.Е., Гудкович З.М.* // Пробл. Арктики и Антарктики. 2007. №75. С. 149–160.
13. *Volkov V.A., Ivanov N.E., Demchev D.M.* // J. Operat. Ocean. 2012. August. 5. № 2. P. 61–70.
14. *Соколов А.Л.* // Пробл. Арктики. 1962. № 11. С. 36–42.
15. *Волков В.А., Мушта А.В., Демчев Д.М., Коржииков А.Я., Сандвен С.* // Пробл. Арктики и Антарктики. 2016. № 2. С. 50–63.

**REGULARITIES OF THE VARIABILITY OF LARGE-SCALE SEA
ICE DRIFT STRUCTURES IN THE ARCTIC OCEAN
(BASED ON SATELLITE DATAS 1978–2017)**

V. A. Volkov¹, A. V. Mushta^{1,2}, D. M. Demchev¹

¹*Scientific Foundation “Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre”,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

²*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS G.G. Matishov April 22, 2018

Received June 13, 2018

Based on the 39-year satellite observation data series (1978–2017), three main types of large-scale sea-ice drift field in the Arctic Ocean (AO), characteristic of the winter season, were identified. The types of atmospheric circulation that form the structure of the drift fields are identified, the mechanism of the effect of changes in the drift fields on the interannual variations in the ice cover of the AO is described.

Keywords: Arctic, Arctic Ocean, sea ice, ice drift, remote sensing, interannual variability.