

Самоорганизующиеся карты атмосферной циркуляции и межгодовая изменчивость гидрометеорологических полей в Арктике

Е. Е. Лемешко

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: e.lemeshko@mhi-ras.ru*

Поступила 23.06.2020 г.; принята к публикации 10.08.2020 г.; опубликована 25.09.2020 г.

В статье предлагается использование нелинейного метода анализа данных на основе нейронной сети – алгоритма самоорганизующихся карт Кохонена – для задачи типизации приземной циркуляции атмосферы в Арктике. С помощью построенных самоорганизующихся карт приземного давления исследована сезонная и межгодовая изменчивость циркуляции атмосферы в Арктике за 1979–2018 гг. и выделено несколько ее режимов: циклонический, два антициклонических и три смешанных типа. Введены индексы сезонной и годовой повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления, позволяющие исследовать временную изменчивость режимов циркуляции атмосферы, и предложен композитный метод расчета присоединенных карт других гидрометеорологических параметров. Выделены режимы изменчивости площади распространения морского льда, температуры поверхности моря в зависимости от режима атмосферной циркуляции. Тип ветрового режима определяет изменение площади распространения морского льда в силу изменчивости потоков теплых атлантических вод в Северный Ледовитый океан. Выявлены характерные типы изменчивости температуры поверхности моря в Баренцевом море, которые модулируются циклоническим/антициклоническим режимами атмосферной циркуляции в регионе и являются индикатором адвекции тепла атлантическими водами. Установлена взаимосвязь индекса повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления, характеризующего режимы атмосферной циркуляции, с изменчивостью индекса арктической осцилляции. Обнаруженные закономерности смены режимов циклонической/антициклонической циркуляции атмосферы проявляются в межгодовой изменчивости введенного индекса повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления, который является развитием индекса арктической осцилляции, дополняет и расширяет представление о режимах климатической циркуляции атмосферы в Арктике.

Ключевые слова: карты Кохонена, атмосферный реанализ, Арктика, режимы атмосферной циркуляции, площадь льда, климат.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0004.

© Лемешко Е. Е., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Лемешко Е. Е. Самоорганизующиеся карты атмосферной циркуляции и межгодовая изменчивость гидрометеорологических полей в Арктике // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 48–62. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-48-62

Self-Organizing Maps of Atmospheric Circulation and Interannual Variability of Hydrometeorological Fields in the Arctic

E. E. Lemeshko

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: e.lemeshko@mhi-ras.ru*

Submitted 23.06.2020; revised 10.08.2020; published 25.09.2020

The article suggests the use of a nonlinear method of data analysis based on a neural network – an algorithm of Kohonen self-organizing maps for the task of typing the atmospheric surface circulation in the Arctic. Based on the construction of self-organizing surface pressure maps, the seasonal and interannual variability of atmospheric circulation in the Arctic for the period 1979–2018 is studied. Several modes were distinguished: cyclonic, two anticyclonic, and three mixed types. Indices of seasonal and annual repeatability of self-organizing atmospheric pressure maps are introduced, which allow us to study the temporal variability of atmospheric circulation modes and a composite method is proposed for calculating connected maps of other hydrometeorological parameters. The regimes of variability of the area of sea ice distribution and sea surface temperature depending on the type of atmospheric circulation are highlighted. Depending on the type of wind regime, there is a change in the area of sea ice distribution due to the variability of the flows of warm Atlantic waters into the Arctic Ocean. The characteristic types of sea surface temperature variability in the Barents Sea are identified, which are modulated by cyclonic / anticyclonic regimes of atmospheric circulation in the region and are an indicator of heat advection by the Atlantic waters. The interrelation is established of the repeatability index of self-organizing atmospheric pressure maps characterizing the types of atmospheric circulation with the variability of the Arctic Oscillation Index. The revealed regularities of the change in the types of cyclonic-anticyclonic atmospheric circulation are manifested in the interannual variability of the introduced repeatability index of self-organizing atmospheric pressure maps, which is a development of the Arctic Oscillation Index, improves understanding of the atmospheric climate circulation regimes in the Arctic.

Keywords: Kohonen maps, atmospheric reanalysis, Arctic, atmospheric circulation types, ice area, climate.

Acknowledgements: this study was supported by the Russian Federation State Task № 0827-2019-0004.

For citation: Lemeshko, E.E., 2020. Self-Organizing Maps of Atmospheric Circulation and Interannual Variability of Hydrometeorological Fields in the Arctic. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 48–62. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-48-62 (in Russian).

Введение

Основные характеристики океана и атмосферы имеют тесную связь с режимами атмосферной циркуляции, а их изменчивость во многом определяется ее вариациями. Поэтому важной задачей является изучение взаимосвязи изменчивости режимов циркуляции с пространственно-временной изменчивостью основных полей: атмосферного давления на уровне моря, приземной температуры воздуха, температуры поверхности океана, площади ледяного покрова, потоков тепла из океана в атмосферу.

Достаточно мало изучена взаимосвязь изменчивости меридионального переноса тепла в полярные широты с атмосферной и океанической циркуляцией. Этот механизм может играть существенную роль в выявленных вариациях интенсивности арктического усиления на различных временных масштабах [1, 2].

Одним из физических механизмов, регулирующих площадь морского льда, является межгодовая изменчивость адвекции теплых атлантических водных масс в Северный Ледовитый океан (СЛО). В основном она обусловлена изменчивостью ветрового воздействия и развитием поверхностных течений. Поле ветра определяется пространственно-временной изменчивостью атмосферного давления над Арктикой, характерные особенности которого описываются климатическими индексами: Североатлантическим колебанием (САК), Арктической осцилляцией (АО) и Арктическим диполем (АД). АО модулирует приток теплых течений атлантических вод и приток тихоокеанских вод через Берингов пролив. Во время положительной фазы АО центральная часть Арктики занята циклоном, который способствует притоку теплых вод (положительные аномалии расходов течений в Баренцевом море) и затрудняет распространение вод через Берингов пролив (отрицательные аномалии расходов). Во время отрицательной фазы АО над Арктикой находится антициклоническая область давления и аномалии расхода течений меняются на противоположные [1].

Изучению изменчивости индексов САК и АО, смене режимов атмосферной и океанической циркуляций, процессам теплообмена между океаном и атмосферой, изменению площади льда в Арктике посвящена обширная литература [2–5]. САК является основным модулятором атмосферной циркуляции в Северной Атлантике, особенно в зимний сезон, что также приводит к возникновению новых районов распространения мезомасштабных циклонов в связи с потеплением климата Арктики и уменьшением площади ледового покрова [6].

В перечисленных работах в качестве метода анализа атмосферных полей, спутниковых данных и результатов моделирования в основном использовалось разложение по эмпирическим ортогональным функциям, которое в том числе раскладывает низкочастотный сигнал (тренд) по рядам их главных компонент, что затрудняет интерпретацию многолетней изменчивости полей. Необходимо использовать такой подход, который бы исключил этот эффект «расщепления», и в данной работе предлагается использовать метод построения самоорганизующихся карт Кохонена (СОК) для нейронной сети [7]. Метод позволяет выделить аномальные пространственно-временные особенности метеорологических и гидрофизических полей и оценить влияние

на них глобальных климатических процессов. В последнее время данный подход получил широкое распространение [8–10] и был проверен автором на тестах, предложенных в работе [11], а после апробирован в регионе Азово-Черноморского бассейна для анализа уровня моря по данным альтиметрии [12]. Затем метод использовался для выделения характерных типов пространственного распределения поверхностной температуры воздуха в Арктике [13].

Таким образом, цель данного исследования заключается в выделении режимов циркуляции атмосферы на основе типизации полей давления на уровне моря за счет применения метода построения СОК. Затем с помощью предложенного алгоритма для каждого выделенного режима рассчитывается соответствующее ему пространственное распределение площади морского льда, температуры поверхности моря и поверхностной температуры воздуха для межгодовых масштабов.

Метод самоорганизующихся карт

Этот нелинейный метод анализа данных фактически является непараметрической регрессией и главным образом используется для представления многомерных, нелинейно связанных элементов в наглядной форме для классификации и идентификации данных [7, 11]. В результате данные представляются с определенной ошибкой аппроксимации, которая рассчитывается как среднеквадратичное расстояние MSE от точки данных X_i до ближайшего образца $y_{BMU}(X_i)$:

$$MSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - y_{BMU}(X_i))^2 \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Алгоритм построения СОК по исходным данным подробно описан в [7]. Вкратце, схема вычислений следующая: исходные данные в цифровом виде для каждого момента времени представлены в виде двухмерной матрицы размерностью $p \times q$, где p – количество узлов по широте; q – по долготе. Матрица затем трансформируется в вектор длиной $p \times q$ элементов, который в блоке расчета СОК используется для расчета весового вектора. Количество узлов (типов поля) СОК задается априори, исходя из типа информации и целей исследования. Часто число типов поля задается эмпирически, исходя из экспертного мнения исследователей. Так, в 1945–1954 гг. вышли пионерские работы Б. Л. Дзердзеевского, посвященные исследованию циркуляции атмосферы внетропических широт северного полушария и циркуляции атмосферы в Арктическом бассейне¹⁾. Основным признаком, по которому проводилась типизация, было наличие или отсутствие блокирующих процессов, их направление и количество. В отдельную группу были выделены процессы с циклонической циркуляцией на полюсе. Всего выделено 4 группы циркуляции, 13 типов и 41 подтип. Подтипы получили название «элементарный циркуляционный механизм» и являлись основной единицей типизации¹⁾.

Сравнение новых и прежних схем циркуляции показывает изменения в характере крупномасштабной изменчивости атмосферы, произошедшие в третьей

¹⁾ Дзердзеевский Б. Л., Монин А. С. Типовые схемы общей циркуляции атмосферы в Северном полушарии и индекс циркуляции // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1954. № 6. С. 562–574.

четверти XX в. Они выразились в увеличении площадей, занимаемых циклоническими областями, за счет уменьшения антициклонических областей, особенно в Арктике, и смещении арктического антициклона с Северного полюса к району Чукотского п-ова [14, 15].

При использовании подхода СОК можно задать различную степень детализации, то есть количество выделяемых типов циркуляции, однако необходимо проверять, насколько хороша будет полученная в результате кластеризация. Для этого в статистике существуют так называемые методы внутренней проверки, одним из которых является индекс Дэвиса – Болдина [7]. Интерпретация полученных результатов определяется следующим образом: чем меньше величина данного индекса, тем лучше проведена процедура типизации для исходного поля.

Далее сетка узлов иницируется – размещается в пространстве данных. Затем, во-первых, случайным образом выбирается точка данных X_i ; во-вторых, среди узлов сетки выбирается ближайший к точке X_i , его радиус вектор – $y_{VMU}(X_i)$; в-третьих, все узлы сетки двигаются по направлению к X_i по правилу

$$y'_j = y_j + h(r(y_j, y_{VMU}), t) \cdot (X_i - y_j), \quad j = 1, \dots, m, \quad (2)$$

где m – количество узлов СОК; $h(x, t)$ – функция соседства (обычно имеет гауссов вид); $r(y_i, y_j)$ – расстояние между узлами y_i и y_j .

Далее процесс расчета идет итеративно, шаги 1–3 повторяются, пока не будет достигнута заданная точность с учетом (1). Конечный результат преобразуется в двумерную матрицу размерностью $p \times q$, которая затем представляется в виде карты в географических координатах.

В качестве данных использовались среднемесячные значения атмосферного давления на уровне моря, температуры поверхности моря (ТПМ), поверхностной температуры воздуха (ПТВ) и данные о площади морского льда с пространственным разрешением 0.125 градуса из данных реанализа *ERA-Interim* для Северного полушария в полосе 60–90° с. ш. за 1979–2018 гг. (URL: apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-mode/levtype=sfc/).

Согласно критерию Дэвиса – Болдина была выбрана сетка размерностью 2×3 узла, то есть задано представление исходного поля в виде шести типов, и рассчитывались СОК, их повторяемость по времени, то есть определялся процент повторяемости типов (карт) атмосферного давления в течение всего периода анализируемых данных. В результате выполненной классификации атмосферных процессов выявлено шесть основных типов барического поля. В таблице приведена повторяемость в процентах для каждого типа карт атмосферного давления за 1979–2018 гг. и указаны характеристики каждого типа поля над Арктикой. Графики и карты для типов полей приведены на рис. 1–3.

Результаты и обсуждения

Для описания сезонной изменчивости типов атмосферной циркуляции в статье предлагается ввести индекс сезонной повторяемости СОК атмосферного давления, то есть среднемноголетней повторяемости в процентах каждого типа циркуляции в климатический месяц за 1979–2018 гг. (см. рис. 1).

Повторяемость (%) самоорганизующихся карт приземного атмосферного давления для Северного полушария за весь период 1979–2018 гг.

Repeatability (%) of self-organizing maps of surface atmospheric pressure for the Northern Hemisphere for the entire period 1979–2018

Номер карты / Map no.	Повторяемость (до целых), % / Repeatability (up to the next integer), %	Условная характеристика типа поля над Арктикой / Conditional characteristic of the type of field over the Arctic
1	14	Ц/АЦ / С/АС
2	13	Ц/АЦ / С/АС
3	15	Ц/АЦ/Ц / С/АС/С
4	15	АЦ / АС
5	25	Ц / С
6	18	АЦ / АС

Примечание: Ц – циклонический; АЦ – антициклонический.

Note: С – cyclonic; АС – anticyclonic.

Индекс на рис. 1 представлен в виде кумулятивного графика, сумма повторяемости всех шести типов составляет 100 %. В сезонном ходе в летний период карта 5 представляет циклонический тип приземного давления, который доминирует в летние месяцы, достигая максимальной повторяемости 94 % в июле и августе. При этом в зимний период (декабрь – февраль) преобладают антициклонические (карты 4, 6) или смешанные режимы циркуляции с преобладанием антициклонической (карты 1, 2, 3); в весенний сезон преобладает антициклонический режим (карта 6) с максимальной повторяемостью в мае до 60 % (см. рис. 1). Следует отметить, что в летний сезон доминирует циклонический режим циркуляции, который в июне представлен

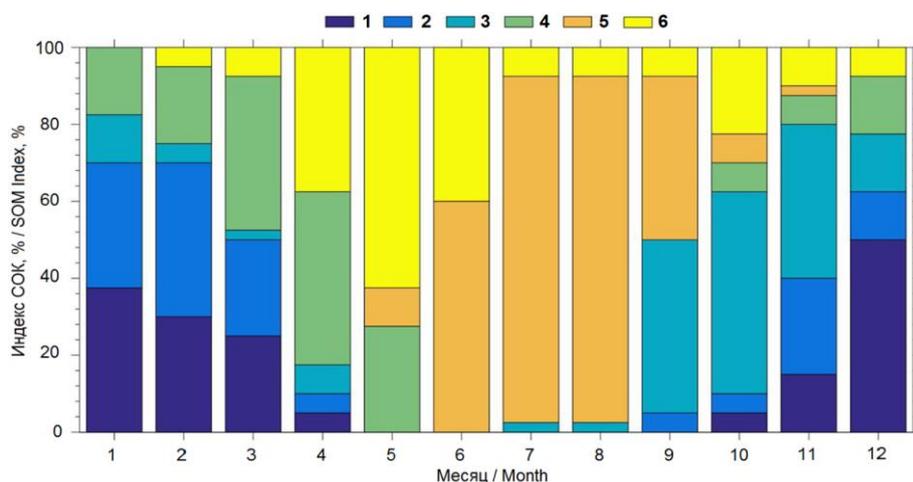


Рис. 1. Гистограмма с накоплением индекса сезонной повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления 1–6 за 1979–2018 гг.

Fig. 1. Stacked bar chart of seasonal repeatability index of self-organizing atmospheric pressure maps 1–6 for the period 1979–2018

двумя типами карт: картой 5 с повторяемостью до 60 % и картой 6 с повторяемостью до 40 %, которая описывает диполь циклон – антициклон, а в осенний период преобладают смешанные режимы циркуляции – карта 3 с повторяемостью 40–55 % и карта 6 до 20 % (см. рис. 1).

Введем индекс годовой повторяемости СОК атмосферного давления: повторяемость каждого режима циркуляции рассчитывается в течение текущего года в процентах и представлена в кумулятивном виде на графике (рис. 2, *a*). Этот индекс позволяет оценить межгодовую изменчивость основных режимов циркуляции атмосферы (см. таблицу) и характеризует их смену над Арктикой от чисто циклонического (карта 5) до антициклонического режима (карты 4, 6) с переходными фазами между ними (карты 1–3). Пространственное распределение поля атмосферного давления в виде карт приводится только для двух наиболее характерных режимов – циклонического (рис. 3, *a*) и антициклонического (рис. 4, *a*), остальные типы поля кратко характеризуются в таблице.

Пространственное распределение индекса АО описывает первая эмпирическая ортогональная функция, дающая 19 % вклада в дисперсию атмосферного давления, при этом над СЛЮ находится обширная циклоническая область (URL: src.ncer.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.loading.shtml). Сам индекс АО – это главная компонента, соответствующая первой эмпирической ортогональной функции (рис. 2, *b*). Положительная фаза индекса описывает циклоническую циркуляцию над СЛЮ, а отрицательная – антициклоническую (рис. 2, *b*) [15–18]. Предлагаемый в работе подход дает

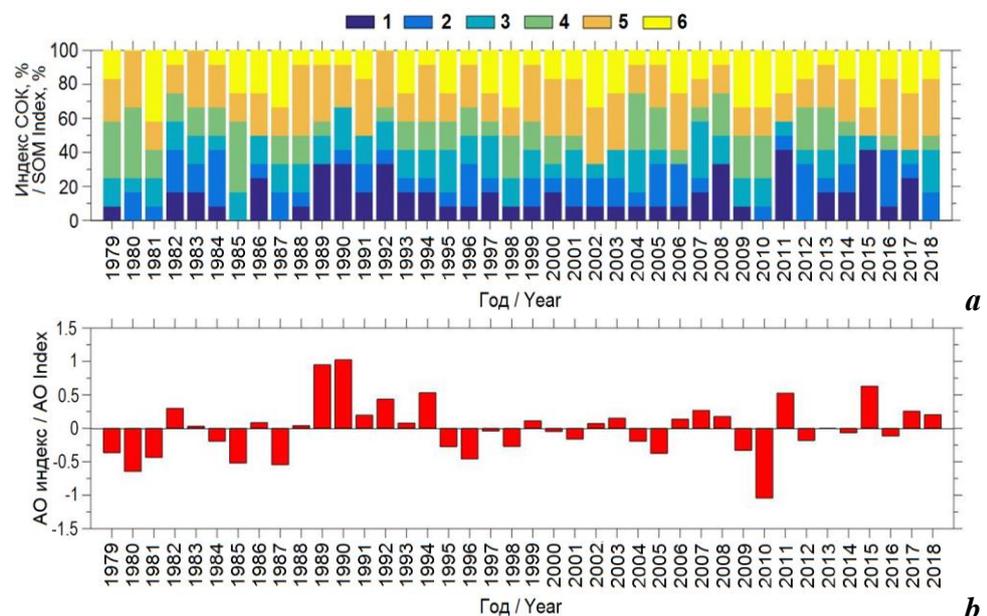
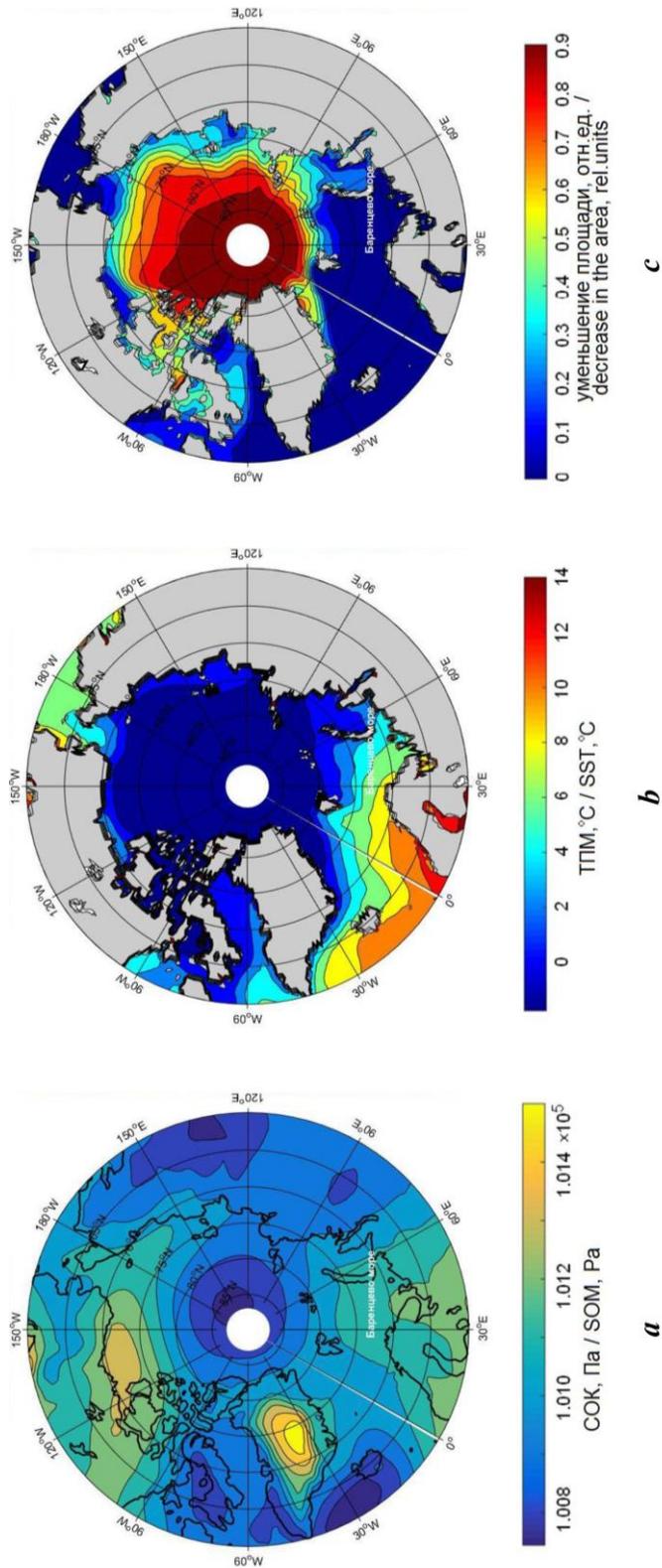


Рис. 2. Гистограмма с накоплением индекса годовой повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления 1–6 за 1979–2018 гг. (*a*); индекс арктической осцилляции (*b*)

Fig. 2. Annual repeatability index of self-organizing atmospheric pressure maps 1–6 for the period 1979–2018 (*a*); Arctic Oscillation Index (*b*)



Р и с. 3. Режим I. Циклонический тип приземного давления над Арктикой за 1979–2018 гг.: *a* – СОК 5 (Па) (повторяемость 25 %); изобара нормального атмосферного давления $1.013 \cdot 10^5$ Па; *b* – распределение ТПМ ($^{\circ}\text{C}$), которое описывает соответствующее этому типу поступление теплых атлантических вод в Баренцево море; *c* – уменьшение площади распространения фракций морского льда (отн. ед.) (0–1)

Fig. 3. Mode I. The cyclonic type of surface pressure over the Arctic for 1979–2018: *a* – SOM 5 (Pa) (repeatability 25 %); isobar of normal atmospheric pressure is $1.013 \cdot 10^5$ Pa; *b* – sea surface temperature (SST) distribution ($^{\circ}\text{C}$), which describes the inflow of warm Atlantic waters into the Barents Sea corresponding to this type; *c* – decrease in the area of distribution of sea ice fractions, relative units (0–1)

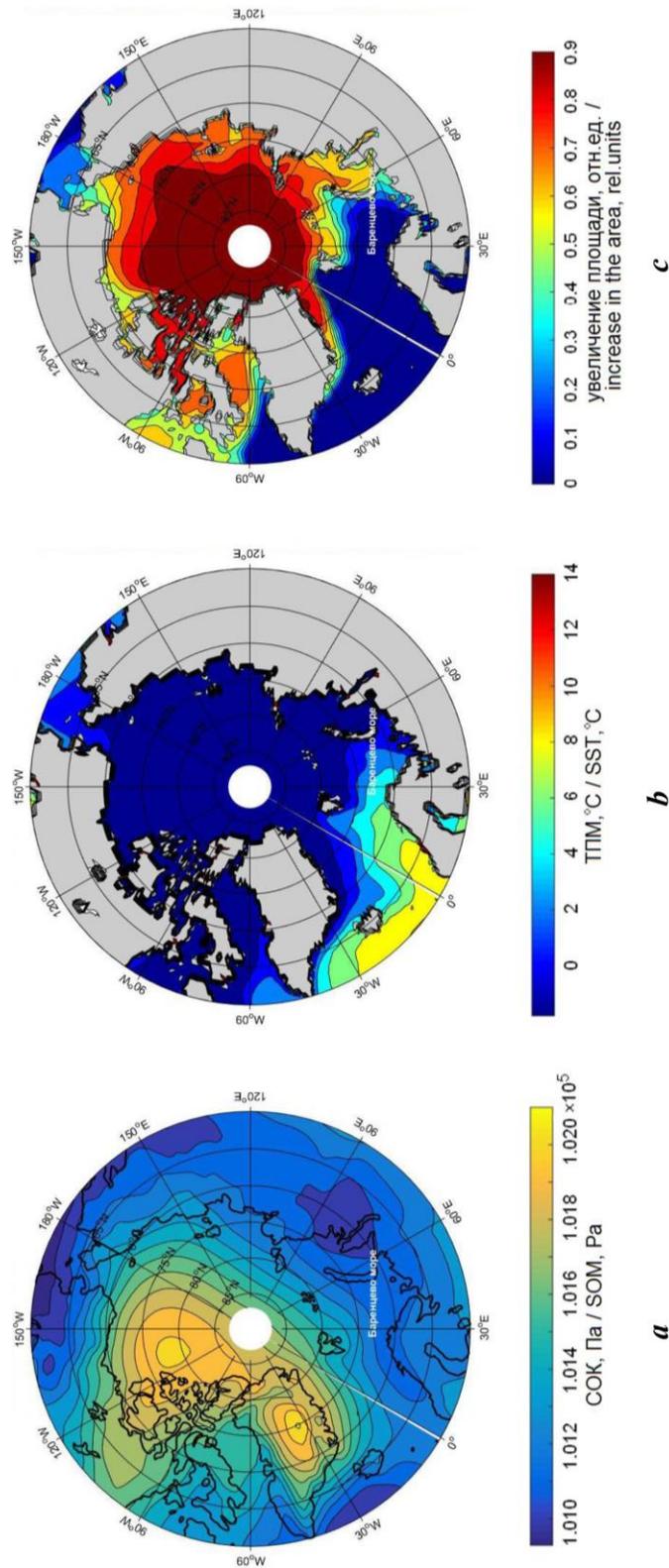


Рис. 4. Режим II. Антициклонический тип приземного давления: *a* – СОК 6 (Па) (повторяемость 18 %); изобара нормального атмосферного давления $1.013 \cdot 10^5$ Па (*a*); *b* – распределение ТПМ (°C), которое описывает соответствующее этому типу уменьшение поступления теплых атлантических вод в Баренцево море; *c* – увеличение площади распространения фракций морского льда, отн. ед. (0–1)

Fig. 4. Mode II. The anticyclonic type of surface pressure: *a* – SOM 6 (Pa) (repeatability 18 %); isobar of normal atmospheric pressure is $1.013 \cdot 10^5$ Pa; *b* – SST distribution (°C), which describes a decrease in the inflow of warm Atlantic waters into the Barents Sea corresponding to this type; *c* – increase in the area of distribution of sea ice fractions, relative units (0–1)

более детальную картину смены типов атмосферной циркуляции. Повторяемость типов циркуляции атмосферы испытывает значительную межгодовую изменчивость и в целом дополняет индекс АО. Во время положительной фазы АО значение индекса достигало +1.1 в 1989–1992 гг. и +0.5 в 2011 и 2015 гг. (рис. 2, *b*). В эти же периоды в индексе повторяемости СОК атмосферного давления преобладает вклад карт, описывающих циклонический режим циркуляции: карта 5 до 40 % и карты 1–3 в сумме до 45 %, а карта 4, описывающая антициклонический режим, дает минимальный вклад в повторяемость до 8 % либо вообще отсутствует, как в 1990, 1991, 2011, 2015 и 2017 гг. (рис. 2, *a*). Во время отрицательной фазы АО значение индекса достигало приблизительно –0.7 в 1979–1981, 1985 и 1987 гг. и –1.1 в 2010 г. (рис. 2, *b*). В те же периоды в индексе повторяемости СОК атмосферного давления преобладает вклад карт, описывающих антициклонический режим циркуляции: карта 4 – до 40 %, при этом отсутствуют карты 1 и 2 (таблица), а вклад карты 5, представляющий циклонический тип, уменьшается до 15 % (рис. 2, *a*). Интересно отметить, что в 2007 и 2012 гг., когда наблюдался летний минимум площади ледяного покрова, индекс АО был мал (0.25 и –0.25 соответственно), а на графике гистограммы с накоплением индекса годовой повторяемости СОК в эти годы преобладают смешанные типы циркуляции (рис. 2, *a*) [19, 20]. В 2007 г. повторяемость циклонического типа (карта 5) составила 15 %, антициклонического (карта 6) – 15 % и смешанного типа (карта 3) – 32 % (рис. 2, *a*). В 2012 г., когда в соответствии с индексом АО, равным –0.25, в среднем отмечалась слабая антициклоническая циркуляция, повторяемость циклонического режима (карта 5) составила 12 %, антициклонического (карта 4) – 22 %. Смешанный режим представлен картами 2 и 3 с повторяемостью 30 и 8 % соответственно (рис. 2, *a*).

Для каждого выделенного типа поля атмосферного давления предлагается рассчитывать связанное с ним пространственное распределение заданного метеорологического или гидрофизического параметров. Для этого после расчета СОК давления заданное поле метеопараметра осредняется по тем же периодам времени, для которых существовал данный режим циркуляции в течение 1979–2018 гг. Такой композитный анализ для каждого из шести режимов циркуляции был проведен для температуры поверхности моря, поверхностной температуры воздуха и площади морского льда за весь период 1979–2018 гг.

На рис. 3 приведен наиболее характерный случай циклонической циркуляции приземной атмосферы над Арктикой. Карта 5 с повторяемостью 25 % представляет циклонический режим приземного давления над Арктикой за 1979–2018 гг. (рис. 3, *a*). Там же приведен соответствующий данному режиму тип распределения температуры поверхности моря (рис. 3, *b*), характеризующий поступление теплых атлантических вод в Баренцево море, а также уменьшение площади морского льда (рис. 3, *c*). Карта 4 с повторяемостью 15 % представляет антициклонический тип приземного давления и соответствующий ему тип распределения температуры поверхности моря, характеризующий уменьшение поступления теплых атлантических вод в Баренцево море и соответствующее этому режиму циркуляции атмосферы значительное увеличение площади морского льда. Однако наибольшая

повторяемость карты 4 наблюдается в зимне-весенний сезон (см. рис. 1), поэтому увеличение площади морского льда также обусловлено сезонным ходом температуры поверхности воздуха. Карта 6 в сезонном ходе дает повторяемость от 40 до 60 % в мае – июне, поэтому влияние сезонного хода ПТВ на площадь распространения морского льда по сравнению с картой 4 будет меньше (см. рис. 1). Карта 6 с повторяемостью 18 % представляет антициклонический тип приземного давления (рис. 4, *a*) и соответствующий ему тип распределения температуры поверхности моря (рис. 4, *b*), характеризующий уменьшение поступления теплых атлантических вод в Баренцево море и увеличение площади морского льда (рис. 4, *c*) [17]. На обеих картах в поле ТПМ выделяются меридиональные градиенты температуры. Поэтому потоки тепла в юго-восточной части Баренцева моря меньше, чем в его северо-западной и северо-восточной частях. Выявленные характерные типы распределения ТПМ в Баренцевом море модулируются атмосферной циркуляцией в регионе (выделяются по индексу повторяемости СОК атмосферного давления) и являются индикатором адвекции тепла атлантическими водами, которые хорошо трассируются по картам температуры поверхности моря (рис. 3, *a*; 4, *a*) [17, 21].

Выводы

На основе построения самоорганизующихся карт приземного давления исследована сезонная и межгодовая изменчивость режимов циркуляции атмосферы в Арктике за период 1979–2018 гг. Выделено шесть режимов: циклонический, два антициклонических и три смешанных. В зависимости от типа ветрового режима происходит изменение площади распространения морского льда в силу изменчивости потоков теплых атлантических вод в СЛО и генерации экмановского переноса льда. Дополнительным фактором изменчивости площади морского льда является рост приземной температуры воздуха в Арктике – по сравнению с 1980–1999 гг. отмечается рост значений коэффициентов линейного тренда с максимумами до 0.18 °С/год. Они охватывают более обширную, чем в 1980–1999 гг., область 76–84° с. ш., 30–90° в. д., включая северо-восточную часть Баренцева моря.

Введены индексы сезонной и годовой повторяемости СОК атмосферного давления, позволяющие исследовать временную изменчивость режимов циркуляции атмосферы, и предложен композитный метод расчета присоединенных карт других гидрометеорологических параметров.

Применение методов построения СОК позволило выделить режимы изменчивости площади распространения морского льда, температуры поверхности моря в зависимости от типа атмосферной циркуляции, оценить их взаимосвязи, что в дальнейшем можно использовать для установления системы обратных связей между ними.

Выявлены характерные типы изменчивости температуры поверхности моря в Баренцевом море, которые модулируются циклоническим/антициклоническим режимами атмосферной циркуляции в регионе (выделяются по индексу повторяемости СОК атмосферного давления) и являются индикатором адвекции тепла атлантическими водами, которые хорошо трассируются по картам температуры поверхности моря.

Были определены положительные аномалии поверхностной температуры воздуха для района Баренцева моря, обусловленные обширным циклоном и адвекцией теплого воздуха. В межгодовом ходе такая тенденция усилилась в 2011–2015 гг., что привело к сезонному уменьшению доли площади морского льда в регионе. Этот подход дает представление о влиянии «дальних связей» поверхностной температуры воздуха и типах атмосферной циркуляции.

Выявлена взаимосвязь индекса повторяемости СОК атмосферного давления, характеризующего типы атмосферной циркуляции, с изменчивостью индекса АО. Установленные закономерности смены режимов циклонической/антициклонической циркуляции атмосферы и межгодовой изменчивости введенного индекса повторяемости СОК атмосферного давления как развития индекса АО дополняют представление о режимах климатической циркуляции в Арктике.

Полученные закономерности пространственно-временной изменчивости поля приземного давления в целом позволяют понять его статистические характеристики и использовать их в качестве предиктора различных климатических режимов гидрометеорологических полей в Арктике, а также для решения задач оперативной океанографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Armitage T. W. K., Bacon S., Kwok R.* Arctic sea level and surface circulation response to the Arctic Oscillation // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45, iss. 13. P. 6576–6584. <https://doi.org/10.1029/2018GL078386>
2. *Bromwich D. H., Wang S. H.* A review of the temporal and spatial variability of Arctic and Antarctic atmospheric circulation based upon ERA-40 // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2008. Vol. 44, iss. 3–4. P. 213–243. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2007.09.001>
3. *Wang Z., Hamilton J., Su J.* Variations in freshwater pathways from the Arctic Ocean into the North Atlantic Ocean // *Progress in Oceanography*. 2017. Vol. 155. P. 54–73. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.05.012>
4. Arctic sea ice decline in the 2010s: The increasing role of the ocean-air heat exchange in the late summer / V. Ivanov [et al.] // *Atmosphere*. 2019. Vol. 10, iss. 4, 184. <https://doi.org/10.3390/atmos10040184>
5. *Timmermans M.-L., Marshall J.* Understanding Arctic Ocean circulation: a review of ocean dynamics in a changing climate // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125, iss. 4. e2018JC014378. <https://doi.org/10.1029/2018JC014378>
6. *Заболотских Е. В., Гурвич И. А., Шапрон Б.* Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледового покрова // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 2. С. 64–77. <https://doi.org/10.7868/S0205961415020116>
7. *Applications of self-organizing maps* / Edited by M. Johnsson. Second Edition. 2016. 298 p. doi:10.5772/3464
8. *Richardson A. J., Risien C., Shillington F. A.* Using self-organizing maps to identify patterns in satellite imagery // *Progress in Oceanography*. 2003. Vol. 59, iss. 2–3. P. 223–239. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2003.07.006>
9. Interannual variability of Black Sea's hydrodynamics and connection to atmospheric patterns / A. Capet [et al.] // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2012. Vol. 77–80. P. 128–142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.010>

10. *Sonneveld M., Wunsch C., Heimbach P.* Unsupervised learning reveals geography of global ocean dynamical regions // *Earth and Space Science*. 2019. Vol. 6, iss. 5. P. 784–794. <https://doi.org/10.1029/2018EA000519>
11. *Liu Y., Weisberg R. H., Mooers C. N. K.* Performance evaluation of the self-organizing map for feature extraction // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. Vol. 111. C05018. <https://doi.org/10.1029/2005JC003117>
12. *Лемешко Е. Е., Полозок А. А., Лемешко Е. М.* Анализ изменчивости уровня Азовского моря методом самоорганизующихся карт по данным альтиметрии // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2016. № 3. С. 54–60.
13. *Lemeshko E. M., Lemeshko E. E.* Long-term variability of air temperature in the Arctic region for the period 1979–2017 / Edited by O. A. Romanovskii and G. G. Matvienko // *Proceedings of SPIE, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Novosibirsk, 2019. Vol. 11208. 112089I. <https://doi.org/10.1117/12.2540946>
14. Количественная оценка параметров климатической изменчивости системы океан-атмосфера / В. И. Бышев [и др.] // *Океанология*. 2004. Том 44, № 3. С. 341–353.
15. *Hegyi B. M., Taylor P. C.* The regional influence of the Arctic Oscillation and Arctic Dipole on the wintertime Arctic surface radiation budget and sea ice growth // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, iss. 9. P. 4341–4350. <https://doi.org/10.1002/2017GL073281>
16. *Bushuk M., Giannakis D.* The Seasonality and interannual variability of Arctic Sea ice reemergence // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30, iss. 12. P. 4657–4676. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0549.1>
17. *Arthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H.* The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss // *Journal of Climate*. 2019. Vol. 32, iss. 11. P. 3327–3341. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0750.1>
18. Arctic circulation regimes / A. Proshutinsky [et al.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. Vol. 373, iss. 2052. 20140160. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0160>
19. Role of Greenland freshwater anomaly in the recent freshening of the subpolar North Atlantic / D. S. Dukhovskoy [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124, iss. 5. P. 3333–3360. <https://doi.org/10.1029/2018JC014686>
20. Empirical modeling and stochastic simulation of sea level pressure variability / S. Kravtsov [et al.] // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2016. Vol. 55, iss. 5. P. 1197–1219. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0186.1>
21. *Belokopytov V. N.* Factors reducing efficiency of the operational oceanographic forecast systems in the Arctic basin // *Physical Oceanography*. 2017. Iss. 2. P. 19–24. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-19-24>

Об авторе:

Лемешко Егор Евгеньевич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7313-4819; ResearchID: C-5691-2016; Scopus Author ID: 57205681264, e.lemeshko@mhi-ras.ru**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Armitage, T.W.K., Bacon, S. and Kwok, R., 2018. Arctic Sea Level and Surface Circulation Response to the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 45(13), pp. 6576–6584. <https://doi.org/10.1029/2018GL078386>
2. Bromwich, D.H. and Wang, S.H., 2008. A Review of the Temporal and Spatial Variability of Arctic and Antarctic Atmospheric Circulation Based upon ERA-40. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 44(3–4), pp. 213–243. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2007.09.001>
3. Wang, Z., Hamilton, J. and Su, J., 2017. Variations in Freshwater Pathways from the Arctic Ocean into the North Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 155, pp. 54–73. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.05.012>
4. Ivanov, V., Varentsov, M., Matveeva, T., Repina, I., Artamonov, A. and Khavina, E., 2019. Arctic Sea Ice Decline in the 2010s: The Increasing Role of the Ocean–Air Heat Exchange in the Late Summer. *Atmosphere*, 10(4), 184. <https://doi.org/10.3390/atmos10040184>
5. Timmermans, M.-L. and Marshall, J., 2020. Understanding Arctic Ocean Circulation: a Review of Ocean Dynamics in a Changing Climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(4), e2018JC014378. <https://doi.org/10.1029/2018JC014378>
6. Zabolotskikh, E.V., Gurvich, I.A. and Chapron, B., 2015. New Areas of Polar Lows Over the Arctic as a Result of Sea Ice Extent Decrease. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, (2), pp. 64–77. <https://doi.org/10.7868/S0205961415020116> (in Russian).
7. Johnsson, V., ed., 2016. *Applications of Self-Organizing Maps*. 298 p. doi:10.5772/3464
8. Richardson, A.J., Risien, C. and Shillington, F.A., 2003. Using Self-Organizing Maps to Identify Patterns in Satellite Imagery. *Progress in Oceanography*, 59(2–3), pp. 223–239. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2003.07.006>
9. Capet, A., Barth, A., Beckers, J.-M. and Marilaure, G., 2012. Interannual Variability of Black Sea’s Hydrodynamics and Connection to Atmospheric Patterns. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77–80, pp. 128–142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.010>
10. Sonnewald, M., Wunsch, C. and Heimbach, P., 2019. Unsupervised Learning Reveals Geography of Global Ocean Dynamical Regions. *Earth and Space Science*, 6(5), pp. 784–794. <https://doi.org/10.1029/2018EA000519>
11. Liu, Y., Weisberg, R.H. and Mooers, C.N.K., 2006. Performance Evaluation of the Self-Organizing Map for Feature Extraction. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111, C05018. <https://doi.org/10.1029/2005JC003117>
12. Lemeshko, E.E., Polozok, A.A. and Lemeshko, E.M., 2016. Analysis of Azov Sea Level Variability by Self Organization Maps on Altimetry Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones*, (3), pp. 54–60 (in Russian).
13. Lemeshko, E.M. and Lemeshko, E.E., 2019. Long-Term Variability of Air Temperature in the Arctic Region for the Period 1979–2017. In: O. A. Romanovskii and G. G. Matvienko, eds., 2019. *Proceedings of SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1–5 July 2019*. Novosibirsk, 112089I. <https://doi.org/10.1117/12.2540946>
14. Byshev, V.I., Kononova, N.K., Neiman, V.G. and Romanov, Yu.A., 2004. Quantitative Evaluation of Climate Change Development in Ocean–Atmosphere System. *Oceanology*, 44(3), pp. 341–353 (in Russian).

15. Hegyi, B.M. and Taylor, P.C., 2017. The Regional Influence of the Arctic Oscillation and Arctic Dipole on the Wintertime Arctic Surface Radiation Budget and Sea Ice Growth. *Geophysical Research Letters*, 44(9), pp. 4341–4350. <https://doi.org/10.1002/2017GL073281>
16. Bushuk, M. and Giannakis, D., 2017. The Seasonality and Interannual Variability of Arctic Sea Ice Reemergence. *Journal of Climate*, 30(12), pp. 4657–4676. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0549.1>
17. Arthun, M., Eldevik, T. and Smedsrud, L.H., 2019. The Role of Atlantic Heat Transport in Future Arctic Winter Sea Ice Loss. *Journal of Climate*, 32(11), pp. 3327–3341. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0750.1>
18. Proshutinsky, A., Dukhovskoy, D., Timmermans, M.-L., Krishfield, R. and Bamber, J.L., 2015. Arctic Circulation Regimes. *Philosophical transactions of the Royal Society A*, 373(2052), 20140160. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0160>
19. Dukhovskoy, D.S., Yashayaev, I., Proshutinsky, A., Bamber, J.L., Bashmachnikov, I.L., Chassignet, E.P., Lee, C.M. and Tedstone, A.J., 2019. Role of Greenland Freshwater Anomaly in the Recent Freshening of the Subpolar North Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(5), pp. 3333–3360. <https://doi.org/10.1029/2018JC014686>
20. Kravtsov, S., Tilinina, N., Zyulyaeva, Y. and Gulev, S.K., 2016. Empirical Modeling and Stochastic Simulation of Sea Level Pressure Variability. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(5), pp. 1197–1219. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0186.1>
21. Belokopytov, V.N., 2017. Factors Reducing Efficiency of the Operational Oceanographic Forecast Systems in the Arctic Basin. *Physical Oceanography*, (2), pp. 19–24. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-19-24>

About the author:

Egor E. Lemeshko, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 7313-4819**; **ResearcherID: C-5691-2016**; **Scopus Author ID: 57205681264**, e.lemeshko@mhi-ras.ru

The author has read and approved the final manuscript.