

Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

ИКИ РАН, 16 - 20 ноября 2020 г., г.Москва

**РЕЖИМЫ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ  
БАРИСТАТИЧЕСКОГО УРОВНЯ В АРКТИКЕ ПО ДАННЫМ GRACE**

**Лемешко Е.М.**

*Морской гидрофизический институт, г.Севастополь, Россия*

*[evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru](mailto:evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru)*

**Ключевые слова:** карты Кохонена, атмосферный реанализ,  
Арктика, типы атмосферной циркуляции, площадь льда, климат, GRACE

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60083 "Современные изменения гидрометеорологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в 21-м веке".*

**Цель работы:** Основные характеристики океана и атмосферы имеют тесную связь с режимами атмосферной циркуляции, а их изменчивость во многом определяется ее вариациями. Поэтому **целью** данной работы является изучение взаимосвязи изменчивости типов циркуляции атмосферы с пространственно-временной изменчивостью баристатического уровня Северного Ледовитого океана (СЛО), обусловленного вариациями водных масс и морского льда.

Метод построения самоорганизующихся карт (карты Кохонена) позволяет выделить аномальные пространственно-временные особенности метеорологических и гидрофизических полей и оценить влияние на них глобальных климатических процессов и в последнее время получил широкое распространение [1-6].

Таким образом, цель данного исследования заключается в выделении режимов циркуляции атмосферы на основе типизации полей давления на уровне моря на основе применения метода построения самоорганизующихся карт.

Затем для каждого выделенного типа рассчитывается соответствующее ему пространственное распределение баристатического уровня океана по данным GRACE и площади морского льда на межгодовых масштабах на основе предложенного алгоритма.

## GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)

Две платформы измеряют гравиметрический потенциал Земной системы: суша + криосфера + океан + атмосфера

После процесса обработки вариаций потенциала силы тяжести на выходе получают среднемесячные данные для океана в виде придонного давления, которое через уравнение гидростатики пересчитывают в толщину эквивалентного слоя воды.

Изменение глобального среднего уровня моря в результате изменения массы океана называют **баристатическим** ( $h_{\text{масс}}$ ).

Изменения уровня моря как глобально, так и локально, вызванные изменениями плотности воды, называются **стерическими** ( $h_{\text{стер}}$ ).

В результате уровень определяется как:

$$\Delta h_{\text{альт}} = \Delta h_{\text{стер}} + \Delta h_{\text{масс}}$$

где  $\Delta h_{\text{стер}}$  рассчитывается по данным буёв АРГО (ARGO) и CTD зондированиям до глубины 1500–2000 м, а параметр  $\Delta h_{\text{масс}}$  вычисляется с помощью данных спутника GRACE.

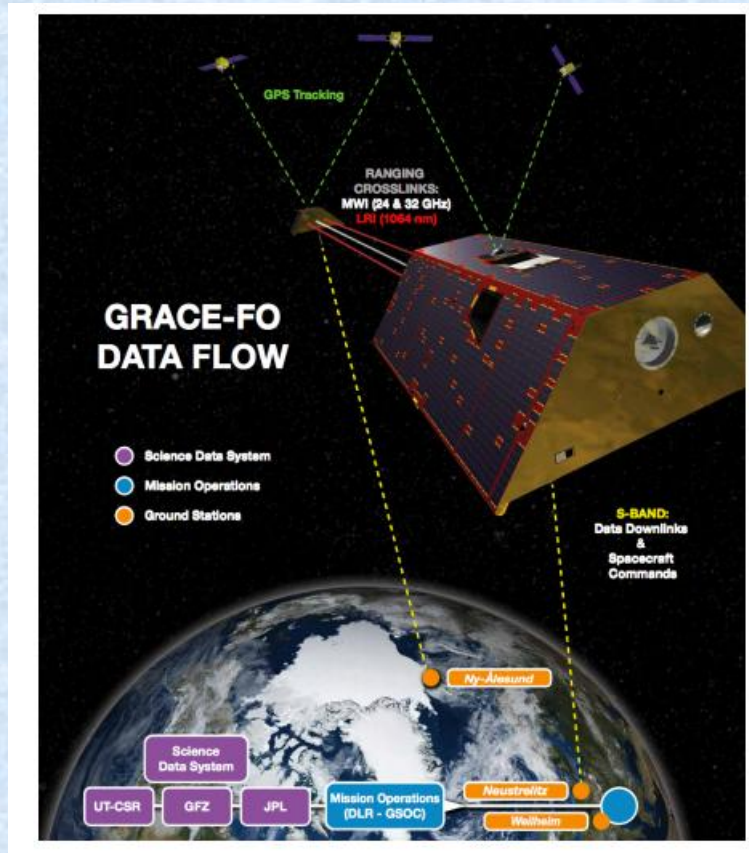


Рис.2 – Схема GRACE

Для задачи типизации приземной циркуляции атмосферы в Арктике в работе использовался алгоритм самоорганизующихся карт Кохонена [1-6]. На основе построения самоорганизующихся карт приземного давления исследована сезонная и межгодовая изменчивость циркуляции атмосферы в Арктике за период 1979–2018гг. и выделено несколько режимов: Циклонический (Ц), антициклонический (А) и три смешанных типа. Повторяемость в процентах для каждого типа атмосферного давления приведена в табл.1 и указаны характеристики каждого типа поля, графики и карты для типов полей приведены на рисунках 1-4.

Таблица 1. Повторяемость [%] самоорганизующихся карт приземного атмосферного давления для Северного полушария за весь период 1979 – 2018 гг.

№ карты \ № map	1	2	3	4	5	6
Повторяемость, [%], (до целых) \ Repeatability, [%], (up to integers)	14	13	15	15	25	18
Условная характеристика типа поля над Арктикой (Ц -циклонический; АЦ - антициклонический) \ Conditional characteristic of the type of field over the Arctic (C-cyclonic; AC-anticyclonic)	Ц\АЦ С\АС	Ц\АЦ С\АС	Ц\АЦЦ С\АС\С	АЦ АС	Ц С	АЦ АС

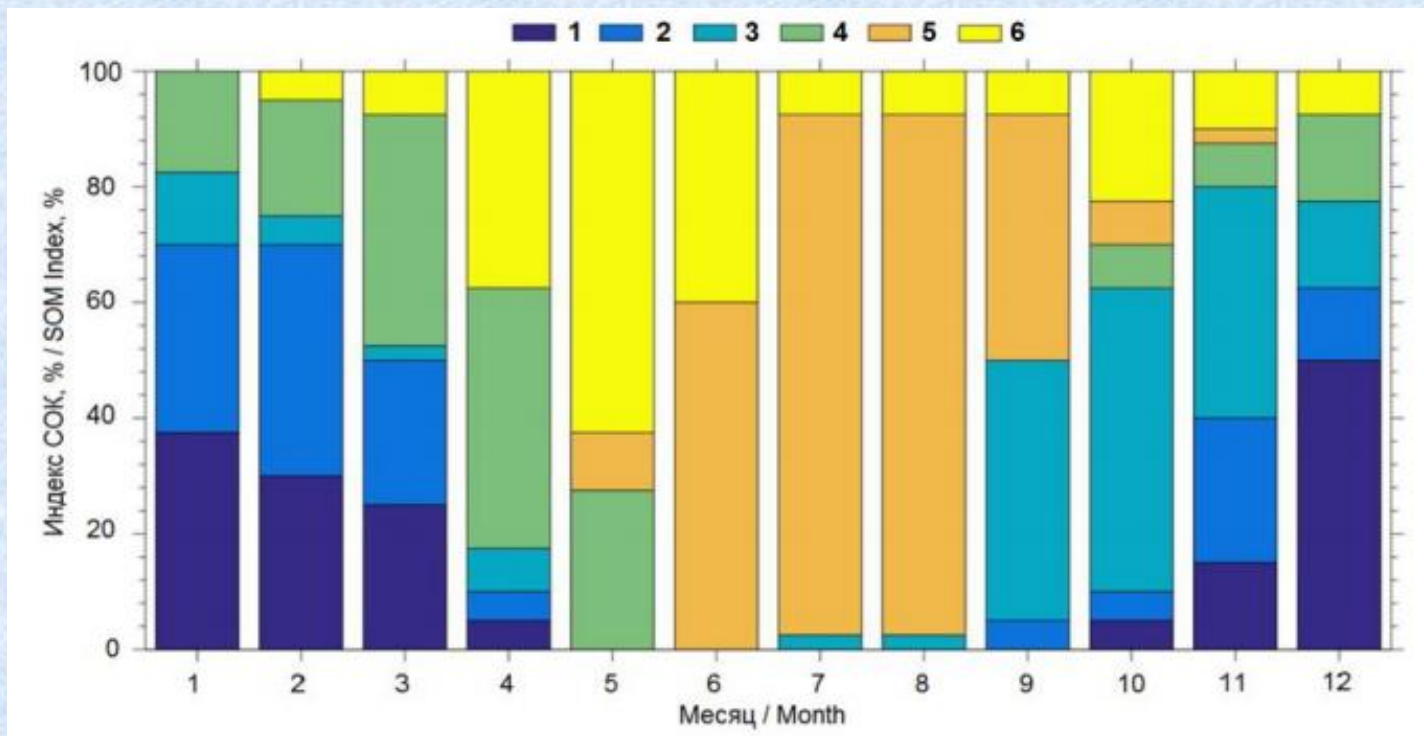


Рис. 1. Гистограмма с накоплением индекса сезонной повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления №1 – №6 за период 1979 – 2018 гг.

Для описания сезонной изменчивости типов атмосферной циркуляции предлагается ввести индекс сезонной повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления, то есть среднемноголетней повторяемости в % каждого типа циркуляции в климатический месяц за период 1979 – 2018 гг. (рис.1). Индекс на рис.1 представлен в виде кумулятивного графика, сумма повторяемости всех шести типов составляет 100%.

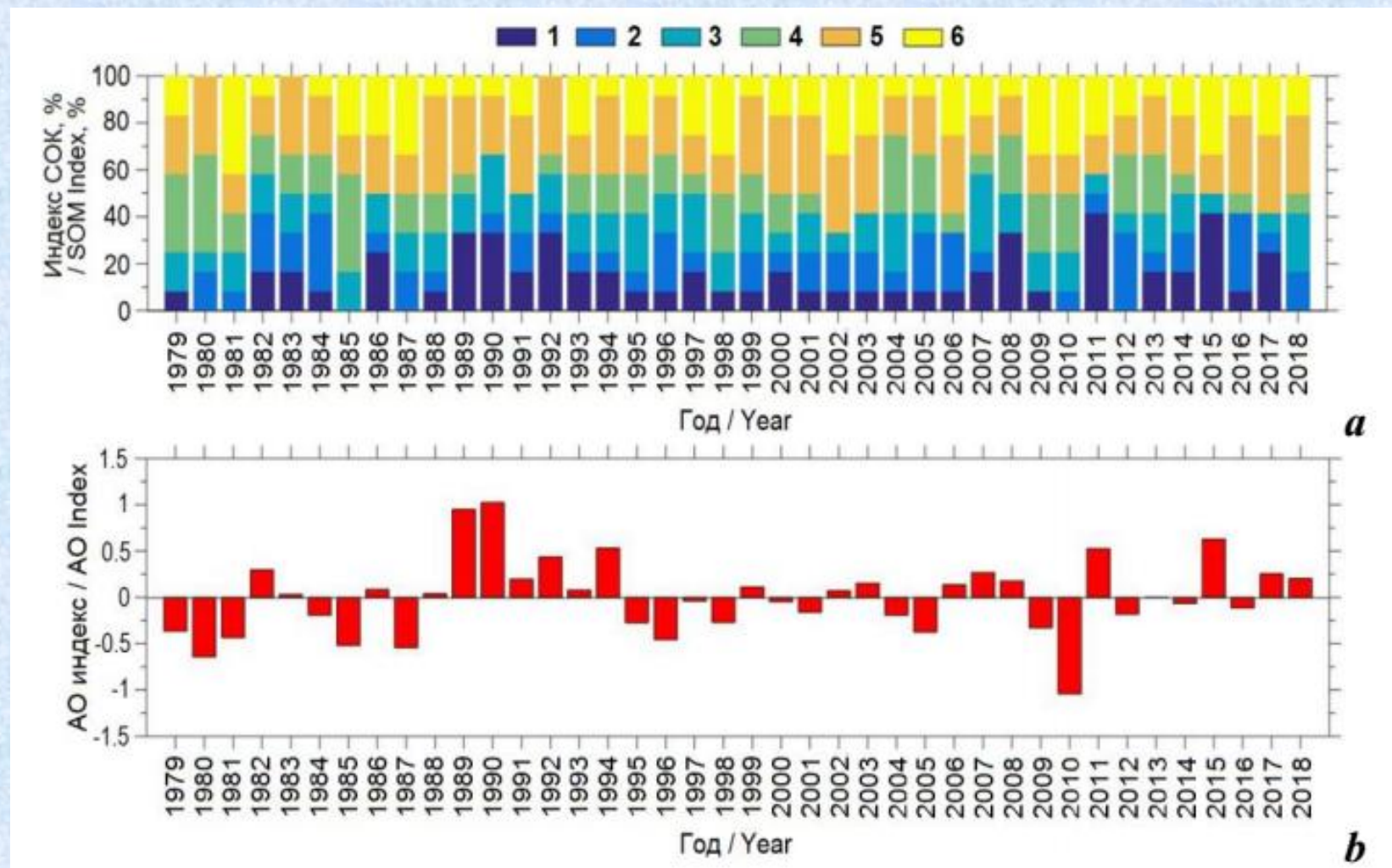
**Межгодовая изменчивость.** Также введем индекс годовой повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления, т.е. повторяемость каждого типа циркуляции рассчитывается в течение текущего года в процентах и представлена в кумулятивном виде на графике (рис.2а). Этот индекс позволяет оценить межгодовую изменчивость режимов циркуляции атмосферы (табл.1) и характеризует смену шести основных режимов циркуляции атмосферы над Арктикой от чисто циклонического типа (карта №5) до антициклонического типа (карта №4,6) и с переходными фазами между ними (карты №1,2,3). Пространственное распределение поля атмосферного давления в виде карт приводится только для двух наиболее характерных режимов – циклонического (рис.3а) и антициклонического (рис.4а), остальные типы поля кратко характеризуются в Таблице 1.

Положительная фаза индекса Арктической Осцилляции (АО)

[https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/ao.loading.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.loading.shtml))

описывает циклоническую циркуляцию над СЛО, а отрицательная – антициклоническую (рис.2б). Предлагаемый в работе подход дает более детальную картину смены типов атмосферной циркуляции. Повторяемость типов циркуляции атмосферы испытывает значительную межгодовую изменчивость и в целом дополняет индекс АО.

Интересно отметить, что в 2007 г. и в 2012 г., когда наблюдался летний минимум площади ледяного покрова, индекс АО был мал (0,25 и минус 0,25 соответственно) а на графике гистограммы с накоплением индекса годовой повторяемости самоорганизующихся карт в эти годы преобладают смешанные типы циркуляции (рис.2а).



Р и с . 2 . Гистограмма с накоплением индекса годовой повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления №1–№6 за 1979–2018 гг. (a); индекс арктической осцилляции (b)

Для каждого выделенного типа поля атмосферного давления предлагается рассчитывать связанное с ним пространственное распределение заданного метеорологического или гидрофизического параметров. Для этого, после расчета самоорганизующихся карт давления, заданное поле метеопараметра осредняется по тем же периодам времени, для которых существовал данный тип циркуляции в течение 1979-2018гг. Такой композитный анализ для каждого из шести типов циркуляции был проведен для баристатического уровня и площади морского льда за весь период 1979-2018гг

На основе построения самоорганизующихся карт приземного давления исследована сезонная и межгодовая изменчивость режимов циркуляции атмосферы в Арктике за период 1979-2018гг. Выделено шесть типов: циклонический, антициклонический и смешанные. В зависимости от типа ветрового режима происходит изменение площади распространения морского льда в силу изменчивости потоков теплых атлантических вод в СЛО и в силу 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  $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , которые охватывают более обширную чем в период 1980-1999гг. область  $30\text{-}90^{\circ}$  в.д.,  $76\text{-}84^{\circ}$ с.ш., включая северо-восточную часть Баренцева моря [6].



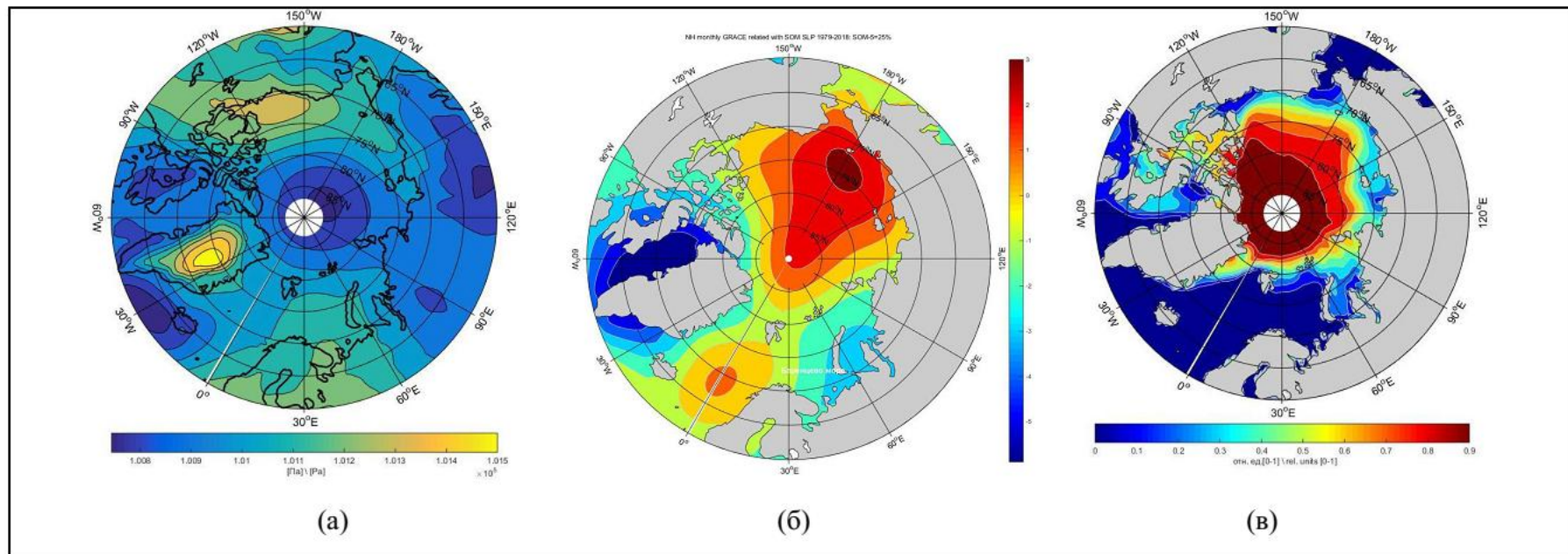


Рис. 3. Режим I. Циклонический тип приземного давления над Арктикой за 1979-2018гг. (а) СОК №5 [Па], (повторяемость 25%). Изобара нормального атмосферного давления  $1.013 \cdot 10^5$  Па. (б) Баристатический уровень по данным GRACE [см] - соответствующий режиму I и (в) уменьшение площади распространения фракций морского льда, относительные единицы [0-1].

На рис.3 приведен наиболее характерный случай циклонической циркуляции приземной атмосферы над Арктикой. Карта Кохонена №5 с повторяемостью 25% представляет циклонический тип приземного давления над Арктикой за 1979-2018гг (рис.3,а). Там же приведен соответствующий ему тип распределения уровня моря по данным GRACE (рис.3,б), характеризующий поступление теплых Атлантических вод в Баренцево море и соответствующий этому типу циркуляции атмосферы уменьшение площади морского льда (рис.3в).

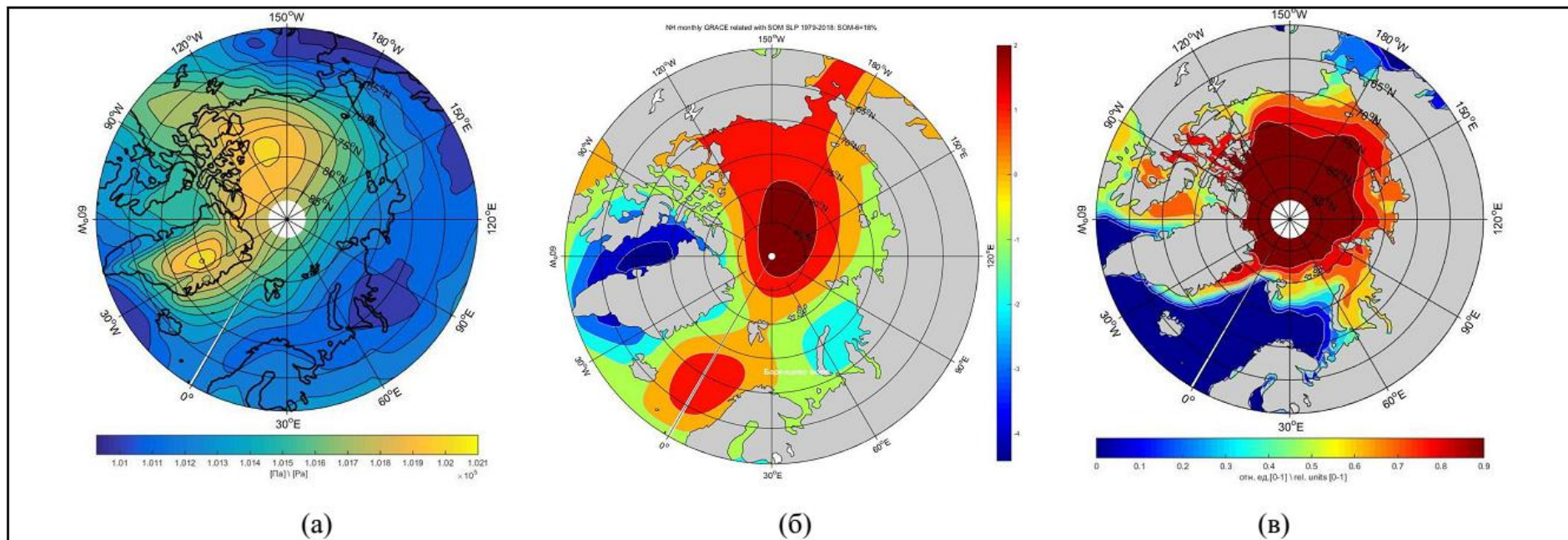


Рис. 4. Режим II. Антициклонический тип приземного давления. (а) СОК №6 [Па], (повторяемость 18%). Изобара нормального атмосферного давления  $1.013 \cdot 10^5$  Па. (б) Баристатический уровень по данным GRACE [см] - соответствующий режиму II; (в) увеличение площади распространения фракций морского льда, относительные единицы [0-1].

Карта №6 с повторяемостью 18% представляет антициклонический тип приземного давления (рис.4а), и соответствующий ему тип распределения баристатического уровня моря по данным GRACE (рис.4б), характеризующий уменьшение поступления теплых Атлантических вод в Баренцево море и увеличение площади морского льда (рис.4в).

**Выводы:** Использование спутника GRACE и развитие новых методов обработки данных гравиметрии позволили достигнуть прогресса в точности оценивания баристатического уровня, обусловленного вариациями водных масс СЛО (рис.5).

Установлено, что баристатический уровень повышался с 2002г. по 2017г., и его вклад в многолетнюю изменчивость уровня океана преобладал ( $1.3 \pm 0.15$  мм/год) по сравнению со стериическим уровнем ( - 0,3 мм/год)

В изменчивости стериического уровня сектора Норвежского и Баренцева морей преобладала термическая составляющая, тогда как соленостная составляющая имеет обратную тенденцию.

Взаимный анализ данных альтиметрии и гравиметрии позволяет оценить изменчивость стериического уровня для других районов Северного Ледовитого океана, где низка обеспеченность гидрологических измерений (Т,S) (рис.6).

Процессы изменчивости баристатического уровня в Норвежском, Баренцевом и арктических морях России имеют в основном сезонный и внутрисезонный характер. Вклад межгодовой изменчивости в Баренцевом море составляет менее 20–30 % (рис. 6), при этом в Восточно-Сибирском, Чукотском морях и в море Бофорта вклад межгодовой изменчивости достигает 50 %. Процессы в районе Гренландии характеризуются в основном межгодовой изменчивостью, которая Дает 70–90 % вклада в суммарную дисперсию баристатического уровня.

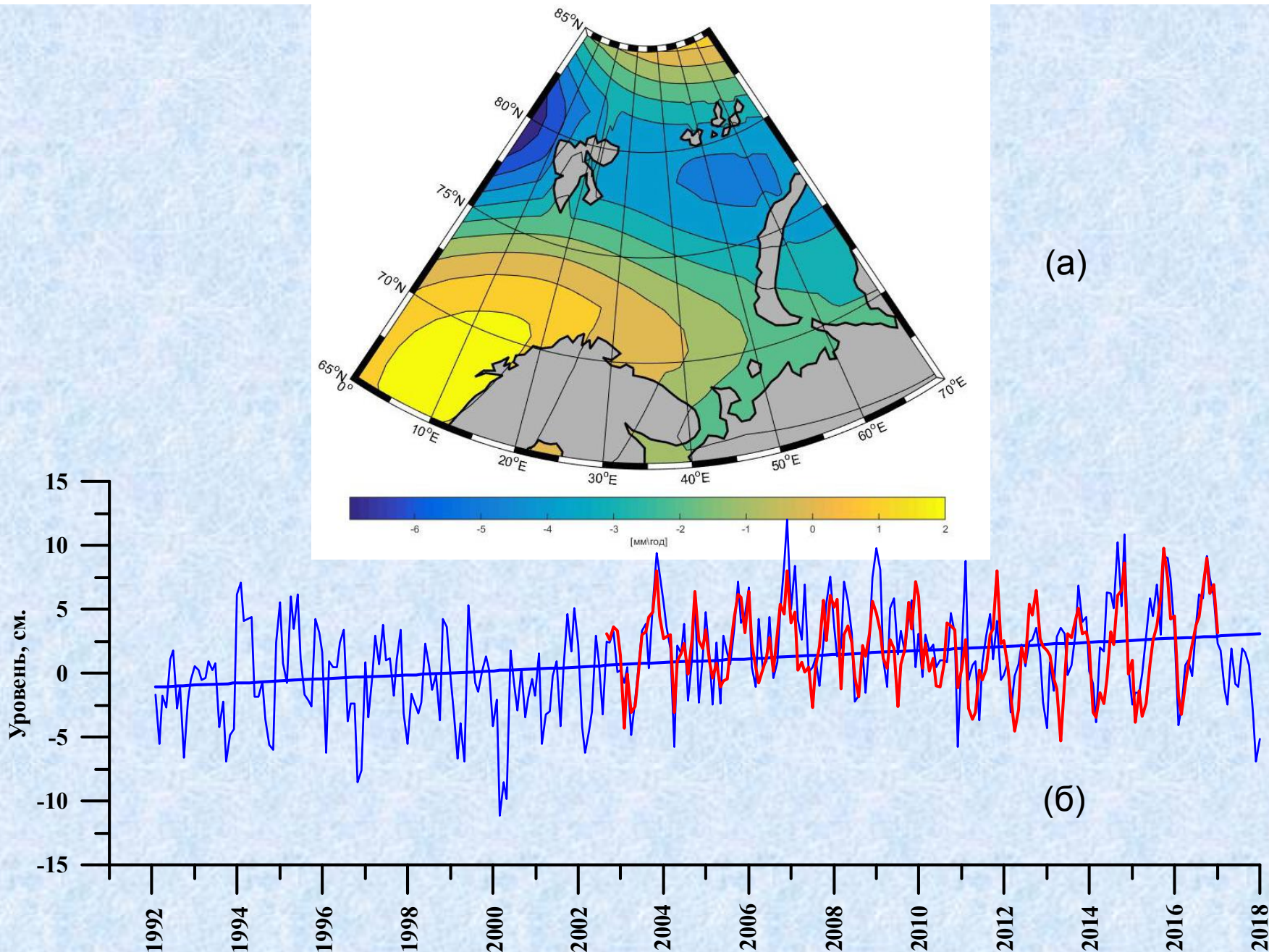


Рис.5 Тренд баристатического уровня моря GRACE [мм/год] (а) и осредненный по области (а) график ряда (Hsla-Hsth) (синий) и GRACE (красный); и, коэф.лин.тренда =1,6 мм/год (б)

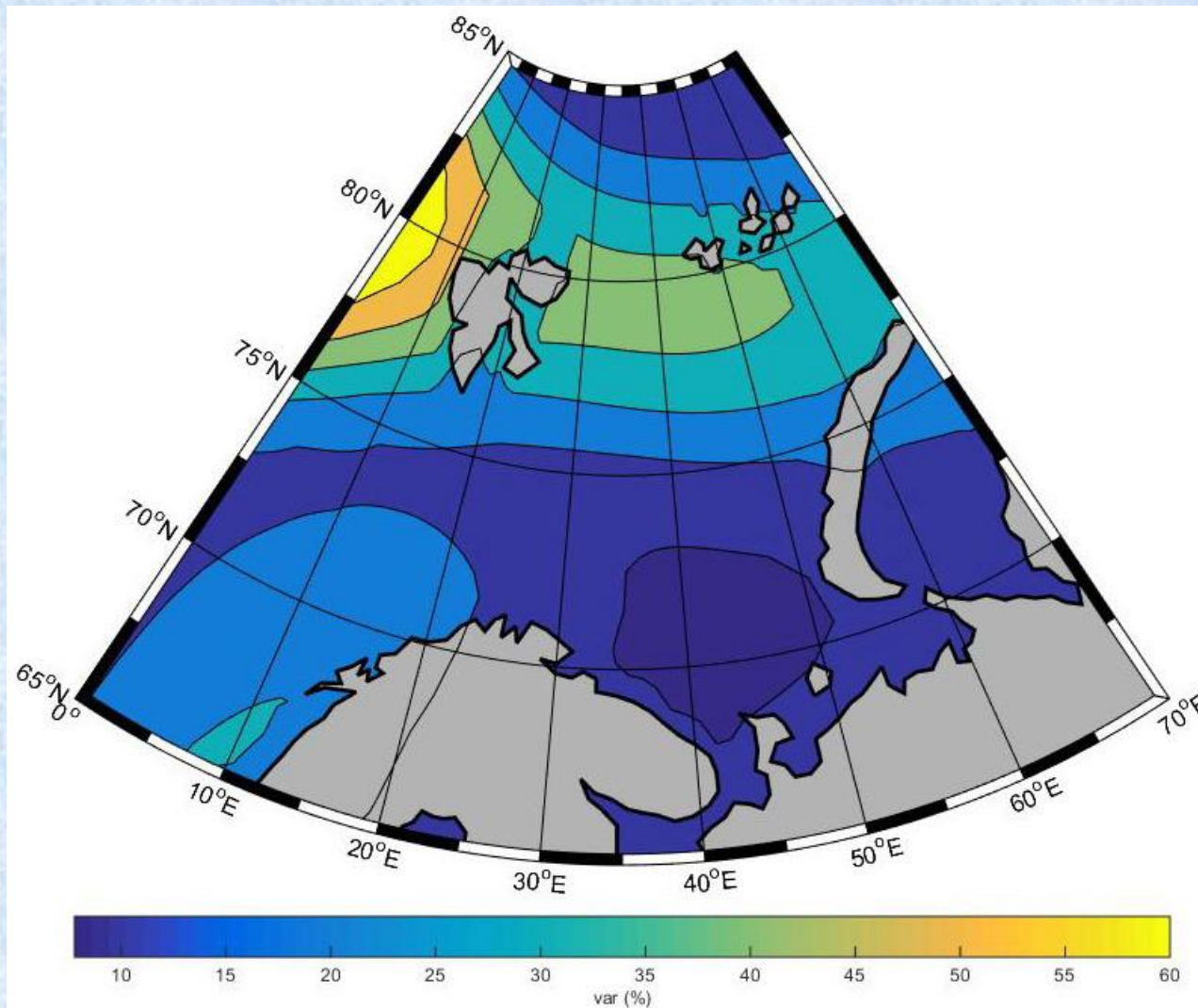


Рис.6. Процентный вклад межгодового сигнала баристатического уровня (%) в дисперсию исходного поля по данным *GRACE* за 2002–2017 гг.

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.

Применение методов построения самоорганизующихся карт позволило выделить режимы изменчивости баристатического уровня по данным GRACE и площади распространения морского льда 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 баристатического уровня по данным GRACE в Баренцевом море, которые модулируются циклоническим\антициклоническим режимами атмосферной циркуляцией в регионе (выделяются по индексу повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления) и являются индикатором адвекции тепла атлантическими водами.

Установленные закономерности смены типов циклонической-антициклонической циркуляции атмосферы и межгодовой изменчивости введенного нами индекса повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления как развития индекса Арктической Осцилляции дополняют и развивают представление о режимах климатической циркуляции в Арктике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Applications of Self-Organizing Maps. Edited by Magnus Johnsson. Second Edition. 2016. 298p. ISBN-13: 978-953-51-0862-7
2. *Richardson A.J., C.Risien, F.A.Shillington*. Using self-organizing maps to identify patterns in satellite imagery // *Progress in Oceanography*. 2003. Vol. 59. P. 223–239. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2003.07.006>
3. *Sonneveld, M., Wunsch, C., &Heimbach, P.* Unsupervised learning reveals geography of global ocean dynamical regions // *Earth and Space Science*. 2019. Vol. 6. <https://doi.org/10.1029/2018EA000519>
4. *Liu, Y., R. H. Weisberg, and C. N. K. Mooers*. Performance evaluation of the self-organizing map for feature extraction // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. C05018. <https://doi.org/10.1029/2005JC003117>.
5. *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
6. [Lemeshko E.M.](#), [Lemeshko E.E.](#) Long-term variability of air temperature in the Arctic region for the period 1979-2017 // *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2019. 112089I. <https://doi.org/10.1117/12.2540946>