УДК 551.465

И.В. Серых<sup>1</sup>, А.В. Толстиков<sup>2</sup>

# О ПРИЧИНАХ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НАД БЕЛЫМ МОРЕМ

Исследованы изменения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) Белого моря. Межгодовые изменения средних аномалий ПТВ в регионе Белого моря за 1980–2010 гг., рассчитанные по различным реанализам, оказались хорошо согласованы друг с другом. При этом наиболее близкими к остальным источникам данных оказались два реанализа: MERRA-2 с высоким разрешением за период спутниковых наблюдений и NCEP/NCAR с более низким разрешением, но за более продолжительный период. Поэтому для детального анализа изменений ПТВ различных районов Белого моря был выбран MERRA-2, а для исследования более продолжительных изменений ПТВ всего региона Белого моря — данные реанализа NCEP/NCAR. Дополнительно был произведен сравнительный анализ полученных результатов с данными температуры поверхностного слоя воды и приповерхностного воздуха на береговых и островных гидрометеорологических станциях Белого моря. Произведен расчет изменений аномалий ПТВ в отдельных районах Белого моря. Их анализ показал незначительные различия изменений аномалий ПТВ между отдельными районами и регионом Белого моря в целом. Поэтому при дальнейшем анализе межгодовых колебаний исследованы средние аномалии ПТВ по всей акватории Белого моря.

Анализ среднемесячных данных ПТВ Белого моря показал ее существенный рост за последние десятилетия. На фоне этого роста выявлена межгодовая изменчивость ПТВ с периодами, близкими к периодам Эль-Ниньо – Южного колебания (2–7 лет) и Северо-Атлантического колебания (7–10 лет). Показано влияние этих колебаний на межгодовую изменчивость ПТВ Белого моря и найдены периоды их синхронизации и рассинхронизации. В периоды с середины 1960-х по начало 1970-х гг. и со второй половины 1980-х по середину 2010-х гг. во время событий Эль-Ниньо в Белом море, как правило, наблюдались отрицательные аномалии ПТВ, а во время событий Ла-Нинья – положительные аномалии. В период с конца 1960-х по середину 1990-х гг. Северо-Атлантическое колебание оказывало положительное влияние на аномалии ПТВ Белого моря, во второй половине 1990-х гг. это влияние сменило знак, но с начала 2000-х гг. снова стало положительным. Высказана гипотеза о роли Глобальной атмосферной осцилляции в качестве синхронизирующего звена между тропиками Тихого океана, Северной Атлантикой и регионом Белого моря.

Kлючевые слова: изменчивость климата, приповерхностная температура воздуха, Белое море, Эль-Ниньо – Южное колебание, Глобальная атмосферная осцилляция, Северо-Атлантическое колебание

Введение. Белое море представляет особую важность для нашей страны, поскольку полностью входит в территориальные воды Российской Федерации и активно используется для морского транспорта, рыболовства, рекреации. Поэтому изучение изменчивости физических и биологических процессов в регионе Белого моря необходимо для развития Северного экономического района.

Над акваторией Белого моря в течение года преобладают воздушные массы, приходящие из Северной Атлантики. Они обусловливают достаточно теплую продолжительную зиму, прохладное короткое лето при значительной облачности и высокой влажности воздуха. Неустойчивые погодные условия наблюдаются во все сезоны года вследствие частой смены воздушных масс. Интенсивная циклоническая деятельность, относительно быстрая смена синоптических процессов проявляются в заметной изменчивости значений метеорологических

величин [Климат Карелии..., 2004]. Некоторые участки территорий субъектов Российской Федерации, омываемые Белым морем, приравнены к Арктической зоне по климатическим условиям.

Анализ воздействия изменчивости климата на процессы в Белом море приведен, например, в [Климат Карелии..., 2004; Белое море..., 2007; Система..., 2010; Толстиков, 2016]. В указанных работах отмечена общая тенденция к потеплению, наблюдаемая и в настоящее время в районе Белого моря [Красильникова, 2018]. Анализ временных рядов температуры поверхностного слоя воды Белого моря, в том числе с использованием данных ВНИ-ИГМИ-МЦД, выполнен ранее и представлен в монографии [Толстиков, 2016]. В настоящей работе внимание уделено в основном приповерхностной температуре воздуха (ПТВ).

Северо-Атлантическое колебание (САК или NAO – в английской транскрипции) является важ-

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, лаборатория крупномасштабной изменчивости гидрофизических полей, канд. физ.-мат. н., ст. науч. с.; *e-mail*: iserykh@ocean.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, лаборатория географии и гидрологии, канд. геогр. н., руководитель лаборатории; *e-mail*: alexeytolstikov@mail.ru

ным механизмом формирования долгопериодной изменчивости элементов климата. САК характеризуется разностью атмосферного давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом, что в свою очередь влияет на интенсификацию западного переноса в Северном полушарии. В [Диксон, Майнке, 2005] показано, что САК влияет на три основных параметра: скорость ветра; скрытый и явный потоки тепла; испарение и осадки.

В последние годы все чаще появляются работы, показывающие связь САК с явлением Эль-Ниньо – Южное колебание [Rodriguez-Fonseca et al., 2016; Henriksson, 2018]. Хотя события Эль-Ниньо происходят в тропической зоне Тихого океана, тем не менее, их воздействие посредством дальних связей влияет на САК. Так, например, была выявлена связь между событиями Эль-Ниньо и углублением Исландской депрессии [Астафьева, Раев, 2010]. Баренцево море по данным В.И. Бышева [Бышев, 2003] откликается на Эль-Ниньо понижением теплосодержания вод и увеличением ледовитости. Поэтому актуальной выглядит задача поиска связей между индексом САК, событиями Эль-Ниньо и температурным режимом Белого моря.

В работе [Бышев и др., 2012] была представлена пространственная структура аномалий атмосферного давления на уровне моря (ДУМ), названная Глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО), возникающая задолго до очередных событий Эль-Ниньо. Эта структура симметрична относительно экватора, несмотря на различия в конфигурациях континентов Северного и Южного полушарий. Она покрывает практически всю Землю, в том числе, включая в себя аномалии, приписываемые проявлению дальних связей с Эль-Ниньо.

В более поздней работе [Бышев и др., 2016] был применен *t*-тест Стьюдента к различиям в пространственных структурах между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Тест показал, что разности приземных значений давления и температуры, свойственные событиям Эль-Ниньо и Ла-Нинья, являются статистически высоко значимыми практически везде на Земле, а не только в тропиках Тихого океана (ареале действия Эль-Ниньо). Тем самым было получено дополнительное формальное доказательство существования ГАО. Хотя проблема причинности ГАО и Эль-Ниньо в работе [Бышев и др., 2016] специально не рассматривалась, ее авторы на основе вышеизложенного сформулировали и обосновали рабочую гипотезу о том, что Южное колебание (ЮК) должно рассматриваться как структурный элемент ГАО в тихоокеанском регионе.

В работе [Serykh et al., 2019] было показано, что ГАО включает в себя в качестве своих элементов как ЮК, так и внетропические колебания, такие как САК. Был предложен индекс ГАО, рассчитываемый как комбинация нормированных значений аномалий ДУМ в десяти географических районах, совпадающих с экстремумами (максимумами и минимумами) в поле ГАО: (5° ю. ш.–5°с. ш., 35–25°з. д.) + (5°ю. ш.–5°с. ш., 55–65°в. д.)+(55–65°с. ш., 95–85°з. д.) +

(65–55°ю. ш., 95–85°з. д.) + (5°ю. ш.–5°с. ш., 145–155°в. д.) – (45–55°с. ш., 175–165°з. д.) – (45–55°с. ш., 15–5°з. д.) – (55–45°ю. ш., 15–5°з. д.) – (55–45°ю. ш., 15–5°з. д.) – (55–45°ю. ш., 175–165°з. д.) – (5°ю. ш.–5°с. ш., 95–85°з. д.). При Эль-Ниньо этот индекс является положительным, а при Ла-Нинья – отрицательным. Исследование индекса ГАО показывает, что внетропические компоненты ГАО могут быть независимы от ЮК, в то время как последнее сопровождает ГАО во всех случаях. Более того, ввиду общего распространения ГАО с запада на восток как пространственной структуры, некоторые ее внетропические компоненты демонстрируют изменения своих особенностей еще до того, как Эль-Ниньо начинает формироваться.

Таким образом, изучение связей ГАО с температурными аномалиями приповерхностного слоя воздуха над Белым морем является задачей данного исследования.

Материалы и методы исследований. Для детального анализа отдельных регионов Белого моря использовались среднемесячные данные приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 на сетке 0,5°с. ш.×0,625° в. д. за период 1980–2017 гг. [Gelaro et al., 2017]. Производилось осреднение данных для региона Белого моря (63,75°–68,75°с. ш.; 32,1875°–44,6875°в. д.), координаты которого выбраны с учетом сетки MERRA-2.

Также исследованы данные ПТВ из реанализов: NOAA CIRES 20<sup>th</sup> Century Global Reanalysis Version 2c (20<sup>th</sup>C\_ReanV2c) на сетке 2°×2° за период 1851–2014 гг. [Сотро et al., 2011], ECMWF ERA-20C на сетке 1°×1° за период 1900–2010 гг. [Stickler et al., 2014], JMA JRA-55 на сетке 1,25°×1,25° за период 1958–2013 гг. [Kobayashi et al., 2015], NCEP/NCAR Reanalysis на сетке 2,5°×2,5° за период 1948–2018 гг. [Kalnay et al., 1996], NCEP-DOE на глобальной Гауссовой сетке T62 (192×94) за период 1980–2013 гг. [Каnamitsu et al., 2002], ERA-Interim на сетке 0,75°×0,75° за период 1980–2016 гг. [Dee et al., 2011] и NCEP-CFSR на сетке 0,5°×0,5° за период 1980–2016 гг. [Saha et al., 2014].

Произведен сравнительный анализ всех данных. Для этого рассчитаны матрицы кросс-корреляций изменений средних аномалий ПТВ без сглаживания и с годовым скользящим сглаживанием между различными реанализами в регионе Белого моря за единый для всех рассмотренных реанализов период 1980–2010 гг. Поскольку значения кросс-корреляций без сглаживания и со сглаживанием оказались достаточно близки, и в этой статье рассматриваются межгодовые изменения, мы приводим только матрицу с годовым скользящим сглаживанием (табл. 1).

Как видно из табл. 1, межгодовые изменения средних аномалий ПТВ в регионе Белого моря за 1980–2010 гг., рассчитанные по различным реанализам, оказались хорошо коррелированы друг с другом. При этом наиболее близкими к остальным источникам данных оказались два реанализа: MERRA-2 с

Реанализ 20th Rean V2c ERA-20C JRA-55 NCEP/NCAR NCEP-DOE MERRA-2 ERA-Interim NCEP-CFSR 20<sup>th</sup>C ReanV2c 0,89 0,90 0,90 0,87 0,82 0,89 0,91 ERA-20C 0,89 1 0,98 0.95 0,92 0,98 0,98 0.97 JRA-55 0,90 0,98 1 0,97 0,94 0,98 0,99 0,98 0,97 NCEP/NCAR 0,87 0,95 0,97 1 0,96 0.99 0.99 NCEP-DOE 0,82 0,92 0,94 0,96 1 0,96 0,94 0,95 0,89 0,98 0,98 0,99 0,98 MERRA-2 0,96 1 0,99 0,90 0,98 0,99 0,97 0,98 1 0,99 **ERA-Interim** 0,94 NCEP-CFSR 0.91 0,97 0,98 0.99 0,95 0.99 0.99 1

Таблица 1 Матрица кросс-корреляций изменений средних аномалий приповерхностной температуры воздуха (с годовым скользящим сглаживанием) между различными реанализами в регионе Белого моря за 1980–2010 гг.

высоким разрешением за период спутниковых наблюдений и NCEP/NCAR с более низким разрешением, но за более продолжительный период. Поэтому для детального анализа изменений ПТВ различных районов Белого моря был выбран MERRA-2, а для исследования более продолжительных изменений ПТВ всего региона Белого моря — данные реанализа NCEP/NCAR.

Регион Белого моря был разбит на 7 районов согласно [Лоция..., 1995], в которые попадают следующие узлы сетки MERRA-2:

- 1. Воронка (66,5°-68°с. ш.; 40,625°-44,5°в. д.),
- 2. Горло (65,5°-66,5°с. ш.; 39,375°-42°в. д.),
- 3. Кандалакшский залив (66°-67° с. ш.; 32,5°-35,625°в. д.),
  - 4. Двинский залив (64,5°-65,5°с. ш.; 37,5°-40°в. д.),
  - 5. Онежский залив  $(64^{\circ}-65^{\circ}\text{с. ш.}; 35^{\circ}-38^{\circ}\text{в. д.})$ ,
- 6. Мезенский залив (66,5°-67°с. ш.; 42,5°-44,5°в. д.),
  - 7. Бассейн (65,5°-66°с. ш.; 35°-40°в. д.).

ПТВ Белого моря присущ сильный сезонный ход, составляющий 22–30°С: в среднем от –10°С до +15°С. Причем в отдельные годы среднемесячная ПТВ опускалась ниже –15°С. Поэтому для анализа межгодовых изменений сезонный ход был исключен из рассмотрения. Для этого в каждом узле сетки рассчитывался средний сезонный ход за рассматриваемый период, который затем вычитался из исходных данных для получения аномалий относительно сезонного хода. Линейные тренды полученных таким образом аномалий ПТВ рассчитывались методом наименьших квадратов. Произведен расчет изменений аномалий ПТВ в каждом рай-

оне (табл. 2), и построена матрица кросс-корреляций изменчивости аномалий ПТВ между районами (табл. 3). Их анализ показал незначительные различия изменений аномалий ПТВ между отдельными районами и регионом Белого моря в целом. Поэтому при дальнейшем анализе межгодовых колебаний решено исследовать средние аномалии ПТВ по всей акватории Белого моря.

Для сглаживания и полосовой фильтрации рядов исследуемых характеристик применялся фильтр Баттерворта. Спектры строились методом быстрого преобразования Фурье. Вейвлетное преобразование производилось с применением вейвлетной функции Морле [Torrence, Compo, 1998]. Для вейвлетных кросс-корреляций двух рядов вычислялись произведения их вейвлетных вещественных компонент [Torrence, Webster, 1999].

Для анализа долгопериодной климатической изменчивости всей акватории Белого моря были использованы среднемесячные данные температуры поверхности воды из архива NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature v5 (ERSSTv5) на сетке 2°×2° за период 1854–2017 гг. [Huang et al., 2017]. Как более надежный был выбран период 1900–2017 гг. Индекс NAO за 1900–2018 гг. был взят из NCAR Hurrell North Atlantic Oscillation Index (PC-based) [Hurrell et al., 2003].

Далее был произведен сравнительный анализ полученных результатов с данными температуры поверхностного слоя воды и приповерхностного воздуха на береговых и островных гидрометеорологических станциях Белого моря, содержащихся в комплексной базе данных ИВПС КарНЦ РАН «Белое

Таблица 2 Средние значения роста аномалий приповерхностной температуры воздуха (°C/10 лет) в исследуемых районах по данным MERRA-2 за 1980–2017 гг.

	Район								
Реанализ	1 2 Воронка Горло		3 Кандалакшский	4 Двинский	5 Онежский	6 Мезенский	7 Бассейн	Все Белое море	
	•	•	залив	залив	залив	залив			
MERRA-2	0,37	0,40	0,63	0,46	0,57	0,32	0,60	0,43	

Район		Номер района							
гаион	1	2	3	4	5	6	7	Белое море	
1. Воронка	1	0,95	0,98	0,96	0,98	0,96	0,95	0,93	
2. Горло	0,95	1	0,96	0,87	0,91	0,85	0,97	0,90	
3. Кандалакшский залив	0,98	0,96	1	0,92	0,97	0,93	0,97	0,93	
4. Двинский залив	0,96	0,87	0,92	1	0,94	0,95	0,84	0,94	
5. Онежский залив	0,98	0,91	0,97	0,94	1	0,98	0,92	0,95	
6. Мезенский залив	0,96	0,85	0,93	0,95	0,98	1	0,86	0,93	
7. Бассейн	0,95	0,97	0,97	0,84	0,92	0,86	1	0,87	
Все Белое море	0,93	0,90	0,93	0,94	0,95	0,93	0,87	1	

Таблица 3 Матрица кросс-корреляций изменений средних аномалий приповерхностной температуры воздуха между различными районами Белого моря за 1980–2017 гг.

море и его водосбор» [Толстиков и др., 2010]. В частности, здесь содержатся многолетние ряды измеренных величин, полученные через ВНИИГМИ-МЦД (https://meteoinfo.ru) и данные комплексных экспедиций в Белом море ИВПС КарНЦ РАН. Оценивались тренды и колебания гидрологических и метеорологических параметров. Подробный анализ изменчивости температуры поверхностного слоя воды Белого моря по данным измерений и моделирования представлен ранее в монографии [Толстиков, 2016].

Достаточно высокая согласованность результатов, полученных по различным источникам, позволила в дальнейшей работе использовать данные ПТВ и ДУМ из реанализа NCEP/NCAR.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ данных NCEP/NCAR показал рост средней ПТВ Белого моря за период 1950—2018 гг. приблизительно на 1,6°С (рис. 1 А), что вызвано, по всей видимости, глобальным потеплением климата [IPCC, 2013; Бюллетень ВМО, 2018]. На фоне общего роста ПТВ наблюдается сильная межгодовая изменчивость ее аномалий относительно сезонного хода. Причем изменчивость ПТВ в холодное время года превышает изменчивость в теплое, что может быть вызвано усилением в зимнее время влияния САК на регион Белого моря.

При рассмотрении графика короткопериодных межгодовых колебаний аномалий ПТВ выделяются непродолжительные, длящиеся один—два года, аномально холодные и теплые периоды (см. рис. 1 А, черная линия). Один из таких периодов отрицательных аномалий 1997—1998 гг. можно связать с произошедшим в это время сильным событием Эль-Ниньо [Толстиков, 2016].

При рассмотрении графика долгопериодных колебаний аномалий ПТВ Белого моря (см. рис 1 А, серая линия) видно, что в середине 1970-х гг. произошли резкие междекадные изменения. Этот переход между продолжительными периодами аномалий противоположных знаков приходится на глобальный климатический сдвиг 1976—1977 гг. [Byshev et al., 2017]. Обратный глобальный климатический сдвиг произошел в конце 1990-х гг. [Byshev et al.,

2017], что также прослеживается на графике долгопериодных колебаний. Начиная с 1999 г. наблюдается резкий рост не только ПТВ, но и температуры поверхности воды Белого моря, который продолжается и в настоящее время [Толстиков, Чернов, 2019]. Короткие периоды отрицательных аномалий во время этого роста можно связать с событиями Эль-Ниньо 2002–2003, 2009–2010 и 2015–2016 гг.

Поскольку ряд аномалий ПТВ Белого моря является нестационарным, к нему уместно применить технику вейвлетного анализа (см. рис. 1 Б). По полученной вейвлет-диаграмме периоды колебаний аномалий ПТВ Белого моря можно разделить на 3 диапазона: 1) от 2 до 4 лет, 2) от 7 до 10 лет, 3) от 12 до 18 лет. Поскольку периоды повышения энергии изменчивости разделены периодами с более низкими энергиями колебаний, и календарное время усиления колебаний на периодах 2—4 года и 7—10 лет не совпадает, то, по всей видимости, колебания на этих периодах имеют различные источники происхождения. Для понимания факторов, влияющих на межгодовую изменчивость ПТВ Белого моря, необходимо установить источники этих колебаний.

Спектральная оценка временного ряда нормированных (на среднеквадратическое отклонение этого ряда) аномалий ПТВ Белого моря (рис. 2) демонстрирует два пика на периодах более одного года, формально являющихся статистически значимыми (с вероятностью более 95%): ~3 года и ~8 лет. Помимо этого, на графике энергетического спектра рис. 2 присутствует повышение спектральной плотности на периоде ~14 лет. Повышение энергии колебаний на этом периоде также наблюдается и на вейвлет-диаграмме (см. рис. 1 Б). Но из-за ограниченной длины исследуемого временного ряда повышение спектральной плотности на квазичетырнадцатилетнем периоде не является формально статистически значимым, хотя и представляет интерес, поскольку в работе [Arthun et al., 2017] показано, что Северо-Атлантическое течение переносит аномалии температуры верхнего слоя воды с периодичностью ~14 лет. Тем не менее, длина ряда в Белом море не является репрезентативной, чтобы уверенно гово-

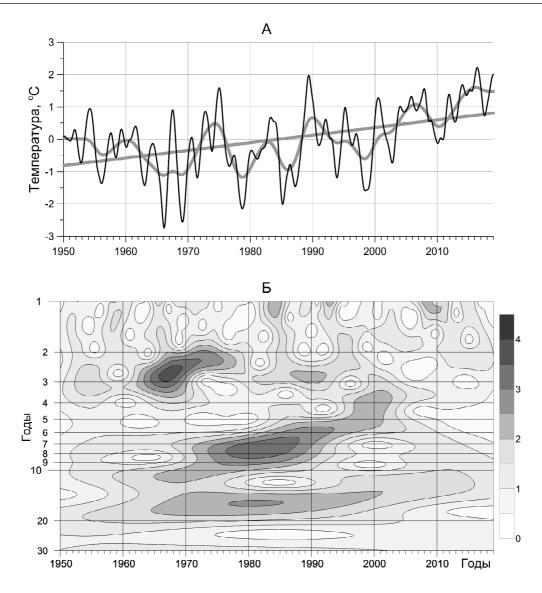


Рис. 1. Изменения температуры: А – изменения средних аномалий приповерхностной температуры воздуха Белого моря, сглаженных 2-летним (тонкая черная линия) и 7-летним (толстая серая кривая линия) фильтрами Баттерворта нижних частот, и их линейный тренд (толстая серая прямая линия); Б – картина вейвлетного преобразования ряда средних аномалий приповерхностной температуры воздуха Белого моря без фильтрации после предварительного нормирования ряда на его среднеквадратическое отклонение

Fig. 1. Temperature changes: A – changes in mean surface air temperature anomalies of the White Sea, smoothed by 2-year (fine black line) and 7-year (heavy gray curved line) low-pass Butterworth filters, and their linear trend (heavy gray straight line). Ε – the picture of the wavelettransformation of mean surface air temperature of the White Sea without filtering, after normalizing of the series by its standard deviation

рить о колебаниях на квазичетырнадцатилетнем периоде. Поэтому мы не станем подробно рассматривать в этой статье междекадные колебания (с периодами более 10 лет), а остановимся на межгодовых колебаниях (с периодами от 2 до 10 лет). Обратим далее наше внимание на формально статистически значимые периоды: ~3 года и ~8 лет.

Расчет вейвлетных преобразований и спектральных оценок (см. рис. 1 Б и 2) показал, что в межгодовой изменчивости ПТВ Белого моря выделяется период около 3 лет, характерный для Эль-Ниньо – Южного колебания [Серых, Сонечкин, 2017; Serykh, Sonechkin, 2019, 2020]. В работах [Бышев и др., 2012, 2016; Вакуленко и др., 2018; Серых, 2018; Serykh et al., 2019] показано, что Южное колебание (ЮК) является элементом баричес-

кой структуры Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО), что частично объясняет связь столь отдаленных регионов, как тропики Тихого океана и Белое море.

Взаимосвязь ПТВ Белого моря с индексом ГАО (его определение дано во введении) отображена на рис. 3. На верхней части рис. 3 показаны ряды индекса ГАО и аномалий ПТВ Белого моря после применения полосового фильтра Баттерворта от 2 до 7 лет. Было произведено предварительное удаление линейных трендов, центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения. Целью всех этих преобразований было сохранить только колебания на периодах, характерных для Эль-Ниньо (2–7 лет), и постараться убрать изменчивость на остальных периодах.

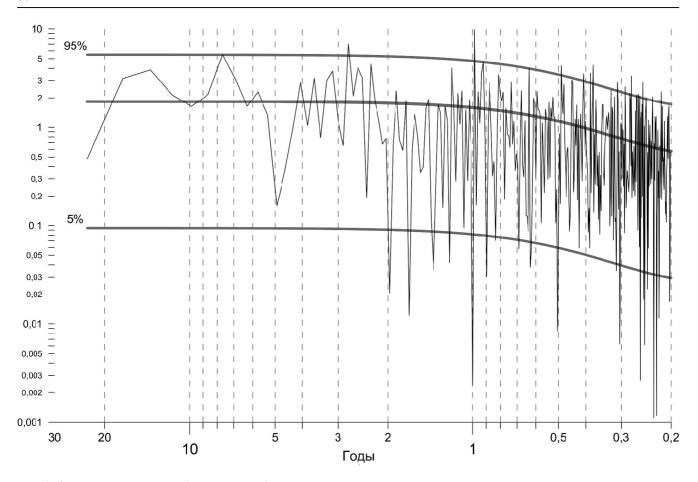


Рис. 2. Энергетический спектр (ломаная линия) ряда средних аномалий приповерхностной температуры воздуха Белого моря после предварительного нормирования на его среднеквадратическое отклонение. Отмечен доверительный интервал от 5% (гладкая линия внизу) до 95% (гладкая линия вверху) и спектр красного шума (гладкая линия между ними). На вертикальной шкале не указаны единицы измерения, поскольку спектральная оценка производилась по нормированным данным

Fig. 2. The energy spectrum (broken line) of mean surface air temperature anomalies of the White Sea after normalizing of the series by its standard deviation. The confidence interval from 5% (smooth line down) to 95% (smooth line above) and the spectrum of red noise (smooth line between them) are shown. The vertical scale is not signed, because the spectral estimate was performed using the normalized data

На рис. З А видно, что существуют периоды синхронизации и рассинхронизации колебаний рассматриваемых рядов. В периоды с середины 1960-х по начало 1970-х гг. и со второй половины 1980-х по середину 2010-х гг. во время событий Эль-Ниньо (положительная фаза ГАО) в Белом море, как правило, наблюдались отрицательные аномалии ПТВ, а во время событий Ла-Нинья (отрицательная фаза ГАО) – положительные аномалии. В остальные же периоды указанные отрицательные связи не наблюдались или же были положительными. Чем же вызвана синхронизация, рассинхронизация и изменение знака связей рассматриваемых колебаний?

На кросс-вейвлетной диаграмме исследуемых рядов (см. рис. 3 Б) видно, что сильные отрицательные связи между ГАО и ПТВ Белого моря характерны с середины 1960-х по начало 1970-х гг. для периодов колебаний от двух до четырех лет. Причем происходит постепенный перенос энергии вверх по масштабам от колебаний с периодами два—три года к колебаниям с периодами три—четыре года.

Затем, с начала 1970-х по середину 1980-х гг. на периодах от двух до четырех лет между рассматриваемыми характеристиками прослеживаются уже положительные связи, с аналогичным переносом энергии вверх по масштабам от колебаний с периодами два—три года к колебаниям с периодами тричетыре года. Во второй половине 1980-х гг. наблюдаются сильные отрицательные связи на периодах от двух до восьми лет, которые в начале 1990-х гг. замещаются положительными связями, но только на периодах от двух до трех лет. На периодах же от трех до семи лет отрицательные связи сохраняются вплоть до середины 2010-х гг.

В первой половине 1980-х гг. наблюдаются отрицательные связи между индексом ГАО и аномалиями ПТВ Белого моря на периоде ~2 года, с последующим переносом энергии вверх по масштабам к колебаниям с периодами три—семь лет. На рубеже веков этот перенос заканчивается и начинается перенос энергии вниз по масштабам от колебаний с периодами три—семь лет к колебаниям с периодами два—четыре года. Причем часть энергии проти-

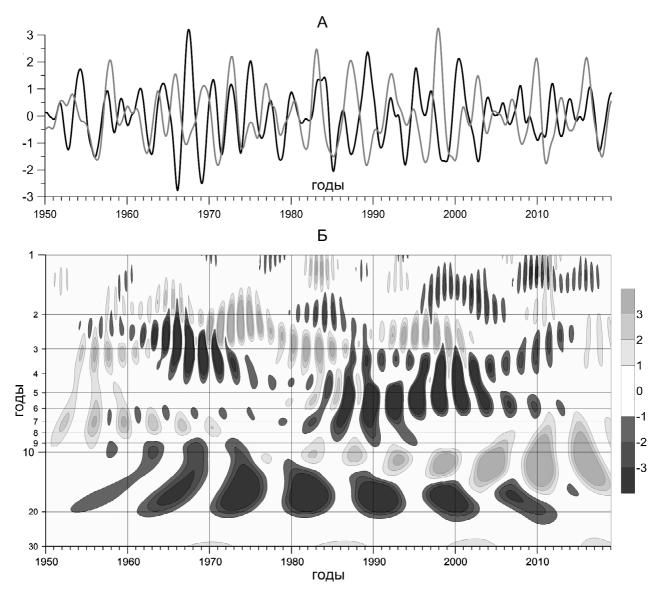


Рис. 3. Связи с Глобальной атмосферной осцилляцией: А – ряды индекса Глобальной атмосферной осцилляции (серая линия) и средних аномалий приповерхностной температуры воздуха Белого моря (черная линия) после применения полосового фильтра Баттерворта от 2 до 7 лет; Б – вейвлетная диаграмма кросс-корреляций их вещественных преобразований без фильтрации

Fig. 3. Links with the Global Atmospheric Oscillation: A – the series of the Global Atmospheric Oscillation Index (gray line) and mean surface air temperature anomalies of the White Sea (black line) after applying the Butterworth band-pass filter from 2 to 7 years;

δ – wavelet diagram of cross-correlations of their real transformations without filtering

вофазных колебаний на периодах пять—семь лет сохраняется до середины 2010-х гг. Наконец, после сильного события Эль-Ниньо 2015—2016 гг., отрицательные связи между ГАО и ПТВ Белого моря на периодах два—четыре года меняются на слабые положительные связи на этих же периодах. Рассмотрим возможные причины наблюдаемых переносов энергии по периодам колебаний.

В работах [Серых, Сонечкин, 2017а, 20176, 2017в; Serykh, Sonechkin, 2019] все основные пики в спектрах Эль-Ниньо и ГАО в диапазоне временных масштабов от двух до семи лет были соотнесены с тремя внешними периодическими воздействиями на климатическую систему: 1) чандлеровским колебанием полюсов; 2) лунно-солнечной нутацией; 3) циклом солнечной активности. Глав-

ные периоды этих внешних воздействий составляют  $\sim$ 1,2,  $\sim$ 18,6 и  $\sim$ 11,5 года, соответственно. Поэтому, можно предположить, что синхронизация и рассинхронизация периодов воздействия этих внешних сил может являться причиной столь сложной картины кросс-корреляций индекса ГАО и аномалий ПТВ Белого моря.

Другой возможной причиной может являться состояние Северной Атлантики, как связующего звена между Тихим океаном и регионом Белого моря. Рассмотрим периоды от 7 до 10 лет, характерные для САК [Moron et al., 1998; Arthun et al., 2017], которое оказывает непосредственное влияние на регион Белого моря. Взаимосвязи САК с ПТВ Белого моря показаны на рис. 4. Здесь также было произведено предварительное удаление линейных

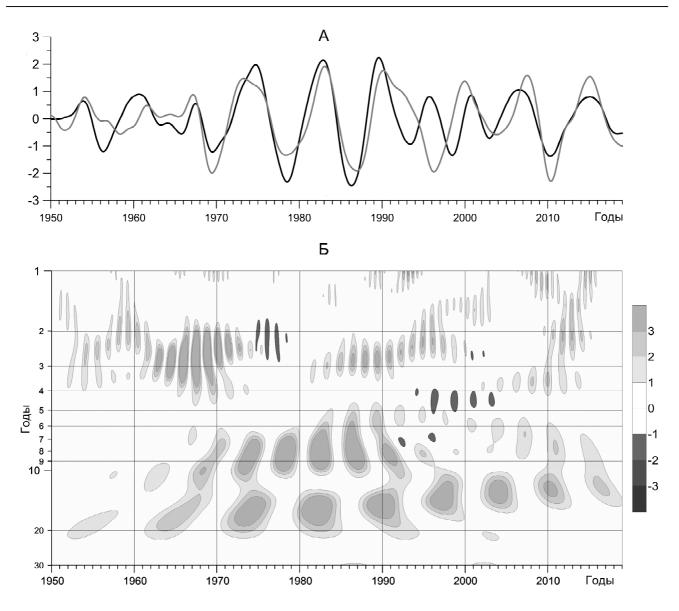


Рис. 4. Связи с Северо-Атлантическим колебанием: А – ряды индекса Северо-Атлантического колебания (серая линия) и средних аномалий приповерхностной температуры воздуха Белого моря (черная линия) после применения полосового фильтра Баттерворта от 7 до 10 лет; Б – вейвлетная диаграмма кросс-корреляций их вещественных преобразований без фильтрации

Fig. 4. Links with the North Atlantic Oscillation: A – series of the North Atlantic Oscillation Index (gray line) and mean surface air temperature anomalies of the White Sea (black line) after applying a Butterworth bandpass filter from 7 to 10 years; δ – wavelet diagram of cross-correlations of their real transformations without filtering

трендов, центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения.

На рис. 4 наблюдаются положительные связи между САК и аномалиями ПТВ Белого моря на периодах колебаний от семи до десяти лет. Причем с конца 1960-х по середину 1990-х гг. эти связи прослеживаются наиболее ярко — в это время влияние состояния Северной Атлантики на регион Белого моря было усилено. Во второй половине 1990-х гг. наблюдается разрушение положительных связей и даже замена их на отрицательные. После начала 2000-х гг. положительные связи на периодах семь—десять лет восстанавливаются, хотя они и не столь сильные как до этого. Возможно, что этот сдвиг второй половины 1990-х гг. связан с сильнейшим событием Эль-

Ниньо 1997—1998 гг. и последовавшим за этим глобальным климатическим сдвигом.

Можно предположить, что во время усиления влияния САК на регион Белого моря (с конца 1960-х по середину 1990-х гг.) происходит перенос энергии связей ГАО и ПТВ Белого моря вверх по масштабам от колебаний с периодами два—три года к колебаниям с периодами три—семь лет. В работе [Serykh et al., 2019] показано, что САК, так же, как и ЮК, является элементом барической структуры ГАО. Поэтому, во время усиления САК, периодичность связей ГАО и ПТВ Белого моря становится ближе к периодам, характерным для САК (семь—десять лет), а не для ЮК (два—четыре года). САК как бы оттягивает на себя энергию ГАО.

Интересным результатом является то, что на вейвлет-диаграмме кросс-корреляций индекса САК и нормированных аномалий ПТВ Белого моря (см. рис. 4 Б) прослеживаются положительные связи как на периодах семь-десять лет, так и на периодах двачетыре года. Поскольку и ЮК, для которого характерны колебания на периодах от двух до четырех лет [Серых, Сонечкин, 2017; Serykh, Sonechkin, 2019], и САК являются элементами ГАО, то повышенная энергия связей между САК и ПТВ Белого моря на периодах два-четыре года может являться сигналом ЮК, переданного посредством ГАО. Подтверждением этого является то, что с 1960-х по начало 1970-х гг., когда положительные связи САК и ПТВ Белого моря на периодах два-четыре года были усилены (см. рис. 4 Б), наблюдались сильные отрицательные связи ГАО и ПТВ Белого моря на этих же временных периодах (см. рис. 3 Б). Таким образом, в эти годы ЮК, посредством ГАО, и САК оказывали разнонаправленное влияние на ПТВ Белого моря.

После глобального климатического сдвига середины 1970-х гг. ситуация изменилась на противоположную: посредством ГАО произошла синхронизация ЮК и САК на периодах два—четыре года. Они начинают оказывать однонаправленное положительное влияние на ПТВ Белого моря, усиливая сигналы друг друга. После обратного глобального климатического сдвига конца 1990-х гг., синхронизация ЮК и САК на периодах от двух до четырех лет ослабевает, так же, как и их влияние на регион Белого моря. Таким образом, можно сделать вывод, что синхронизация Эль-Ниньо — Южного колебания, САК и ПТВ Белого моря происходит благодаря ГАО.

#### Выводы:

– за более чем 60-летний период наблюдений за приповерхностной температурой воздуха (ПТВ)

Белого моря выделяется ее ярко выраженный положительный тренд, что свидетельствует о проявлении в этом регионе процессов глобального потепления;

- на фоне положительного тренда ПТВ Белого моря наблюдаются ее колебания с различными периодами, связанными, по всей видимости, с влиянием планетарных и региональных мод климатической изменчивости;
- обнаружено, что в межгодовой изменчивости ПТВ Белого моря выделяются периоды от двух до семи лет и от семи до десяти лет, связанные, соответственно, с Эль-Ниньо Южным колебанием и Северо-Атлантическим колебанием (САК);
- в периоды с середины 1960-х по начало 1970-х гг. и со второй половины 1980-х по середину 2010-х гг. во время событий Эль-Ниньо в Белом море, как правило, наблюдались отрицательные аномалии ПТВ, а во время событий Ла-Нинья положительные аномалии;
- в период с конца 1960-х по середину 1990-х гг. САК оказывало сильное положительное влияние на аномалии ПТВ Белого моря, во второй половине 1990-х гг. это влияние сменило знак, но с начала 2000-х гг. снова стало положительным, хотя и не столь сильным, как в предыдущий период;
- в период усиления влияния САК на регион Белого моря происходит перенос энергии связей между Эль-Ниньо и ПТВ Белого моря вверх по масштабам от колебаний с периодами два—три года к колебаниям с периодами три—семь лет;
- обнаруженные изменения связей между Эль-Ниньо, САК и ПТВ Белого моря позволяют сделать предположение, что синхронизирующим механизмом этих процессов является Глобальная атмосферная осцилляция.

**Благодарности.** Работа выполнена по гранту РФФИ 18-05-01053 «Исследование гидрометеорологического и гидродинамического режимов Белого моря по данным спутниковой альтиметрии».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астафьева Н.М., Раев М.Д. Влияние крупномасштабного удаленного атмосферного окружения на траектории тропических циклонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов : Сб. науч. ст. Т. 7. М.: ДоМира, 2010. № 1 С. 61–74

Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.

*Бышев В.И.* Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. М.: Наука, 2003. 344 с.

*Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* Эль-Ниньо как следствие глобальной осцилляции в динамике климатической системы Земли // Доклады Академии Наук. 2012. Т. 446. № 1. С. 89–94. DOI: 10.1134/S1028334X12090012.

Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В., Сонечкин Д.М. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 179–185. DOI: 10.1134/S000143701602003X.

Бюллетень Всемирной метеорологической организации. Т. 67(2). 2018. 80 с.

Вакуленко Н.В., Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 3. Предсказуемость Эль-Ниньо // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26. № 4. С. 75–94. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94.

Диксон P., Майнке  $\check{H}$ . Океанографические условия Атлантики в 1998—1999 гг. и их постепенное восстановление после экстремальных воздействий // Сб. докл. Междунар. симпозиума «100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море». Мурманск: Изд-во ПИН-PO, 2005. С. 130—144.

Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 224 с.

Красильникова В.В. Анализ многолетней изменчивости приземной температуры воздуха в районе Двинского залива Белого моря за период 1915–2015 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 110–119.

Лоция Белого моря. СПб: Мин. обороны СССР, ГУНиО. 1995. № 1110, 336 с.

Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике: Часть 1. Хаотические вариации погоды // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2017а. Т. 25. № 4. С. 4–22. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-4-4-22.

Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 2. Междугодовые ритмы Эль-Ниньо – Южного колебания // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2017б. Т. 25. № 5. С. 5–25. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-25.

Серых И.В., Сонечкин Д.М. Сопоставление временных энергетических спектров индексов Эль-Ниньо – Южного колебания и глобальных полей температуры и атмосферного давления в приповерхностном слое // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017в. Т. 2. С. 144–155. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-1-144-155.

Серых И.В. О динамике и структуре Глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 1. С. 14–28. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).2.

Система Белого моря. Природная среда водосбора Белого моря. Т. 1. М.: Научный мир, 2010. 480 с.

Толстиков А.В. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря. М.: ГЕОС, 2016. 212 с.

*Толстиков А.В., Филатов Н.Н., Здоровеннов Р.Э.* Белое море и его водосбор // Свид. о гос. рег. базы данных № 2010620435. 16 августа 2010 г.

Толстиков А.В., Чернов И.А. Изменчивость биогеохимических процессов в Белом море для разных климатических условий по данным моделирования // Труды Карельского научного центра РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2019. № 6. С. 1–11. DOI: 10.17076/eb95.

Arthun M., Eldevik T., Viste E., Drange H., Furevik T., Johnson H.L., Keenlyside N.S. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean. Nature Communications, 2017, vol. 8, 15875. DOI: 10.1038/ncomms15875.

Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multidecadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. Pure and Applied Geophysics, 2017, vol. 174, no. 7, p. 2863–2878. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.

Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleaso B.E., Vose R.S., Rutledge G., Bessemoulin P., Brönnimann S., Brunet M., Crouthamel R.I., Grant A.N., Groisman P.Y., Jones P.D., Kruk M., Kruger A.C., Marshall G.J., Maugeri M., Mok H.Y., Nordli Ø., Ross T.F., Trigo R.M., Wang X.L., Woodruff S.D., Worley S.J. The Twentieth Century Reanalysis Project. Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc., 2011, vol. 137, p. 1–28. DOI: 10.1002/qj.776.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge Sanz B.M., Morcrette J. J., Park B. K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J. N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, vol. 137, iss. 656, p. 553–597. DOI: 10.1002/qj.828.

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J, Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). Journal of Climate, 2017. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

Henriksson S.V. Interannual oscillations and sudden shifts in observed and modeled climate. Atmos. Sci. Lett., 2018, p. 1–8. DOI: 10.1002/asl.850.

Huang B., Thorne P.W., Banzon V.F., Boyer T., Chepurin G., Lawrimore J.H., Menne M.J., Smith T.M., Vose R.S., Zhang H.-M. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, 2017, vol. 30, p. 8179–8205, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1.

Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M. The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. Eds. Geophysical Monograph Series, 2003, vol. 134, 279 p.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the V Assessment Report of the IPCC. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013, 1535 p.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Candin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, vol. 77, p. 437–471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996) 077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bull. Amer. Meteor. Soc., 2002, p. 1631–1643. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.

Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebita A., Moriya M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II, 2015, vol. 93, no. 1, p. 5–48. DOI: 10.2151/jmsj.2015-001.

Moron V., Vautard R., Ghil M. Trends, interdecadal and interannual oscillations in global sea-surface temperatures. Climate Dynamics, 1998, vol. 14, p. 545–569. DOI: 10.1007/s003820050241.

Rodriguez-Fonseca B., Suarez-Moreno R., Ayarzaguena B. López-Parages J., Gómara I., Villamayor J., Mohino E., Losada T., Castaco-Tierno A. A Review of ENSO Influence on the North Atlantic. A Non-Stationary Signal. Atmosphere, 2016, vol. 7, no. 7, p. 87. DOI: 10.3390/atmos7070087.

Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., D., Hou Y-T, Chuang H., Iredell M., Ek M., Meng J., Yang R., Mendez M.P., Wang W., Chen M., Becker E. The NCEP Climate Forecast System Version 2. Journal of Climate, 2014, vol. 27, p. 2185–2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin. Theoretical and Applied Climatology, 2019, vol. 137(3–4), p. 2639–2656. DOI: 10.1007/s00704-018-02761-0.

Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections. Pure and Applied Geophysics, 2019, vol. 176(8), p. 3737–3755. DOI: 10.1007/s00024-019-02182-8

Serykh I.V., Sonechkin D.M. El Nico forecasting based on the global atmospheric oscillation. *International Journal of Climatology*, 2020. DOI: 10.1002/joc.6488.

Stickler A., Brönnimann S., Valente M.A., Bethke J., Sterin A., Jourdain S., Roucaute E., Vasquez M.V., Reyes D.A., Allan R., Dee D. ERA-CLIM: Historical Surface and Upper-Air Data for Future Reanalyses. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2014, vol. 95, no. 9, p. 1419–1430. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00147.1.

*Torrence D.C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, vol. 79, p. 61–78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.

Torrence D.C., Webster P.J. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. Journal of Climate, 1999, vol. 12, p. 2679–2690. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2679:ICITEM>2.0.CO;2.

Поступила в редакцию 31.03.2019 После доработки 20.11.2019 Принята к публикации 06.03.2020

### I.V. Serykh<sup>1</sup>, A.V. Tolstikov<sup>2</sup>

# ON THE CAUSES OF THE LONG-TERM VARIABILITY OF SURFACE AIR TEMPERATURE OVER THE WHITE SEA

Changes of the surface air temperature (SAT) over the White Sea are investigated. The inter-annual changes of mean SAT anomalies in the White Sea region for 1980–2010, calculated from various reanalyses, appeared to be in good agreement with each other. Furthermore, two reanalyses turned out to be the closest to the rest of data sources, i.e. high-resolution MERRA-2 for the period of satellite observations and NCEP/NCAR having lower resolution, but a longer period. Therefore, MERRA-2 was applied for the detailed analysis of SAT changes in various regions of the White Sea, and data from the NCEP/NCAR reanalysis – for the study of longer-term SAT changes in the entire White Sea region. In addition, the results were compared with the data on the surface water layer and surface air temperatures from the coastal and island hydrometeorological stations of the White Sea. Changes in the SAT anomalies were calculated for particular regions of the White Sea. Their analysis showed insignificant differences of the changes in SAT anomalies between the individual regions and the White Sea region as a whole. Therefore, the mean SAT anomalies were studied throughout the White Sea during further analysis of inter-annual fluctuations.

The analysis of monthly average SAT over the White Sea showed its significant growth over the past decades. Against the background of this growth, we revealed inter-annual SAT variability with periods close to the periods of El Nińo – the Southern Oscillation (2–7 years) and the North Atlantic Oscillation (7–10 years). The influence of these fluctuations on the inter-annual variability of the White Sea SAT is shown and the periods of their synchronization and desynchronization are found. From the mid-1960s to the early 1970s and from the second half of the 1980s to the mid-2010s, during the El Nińo events, negative SAT anomalies were usually observed over the White Sea, changing to the positive anomalies during the La Nińa events. Between the late 1960s and mid-1990s the North Atlantic Oscillation had a positive effect on the anomalies in the surface air temperature of the White Sea, in the second half of the 1990s this influence changed sign, but since the beginning of the 2000s became positive again. We suggest a hypothesis on the role of Global Atmospheric Oscillation as a synchronizing link between the tropics of the Pacific Ocean, the North Atlantic and the White Sea region.

Key words: climate variability, surface air temperature, the White Sea, El Nińo – Southern Oscillation, Global Atmospheric Oscillation, North Atlantic Oscillation

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Foundation for basic Research (project N 18-05-01053 Investigation of hydrometeorological and hydrodynamic regimes of the White Sea by the satellite altimetry data).

#### REFERENCES

Arthun M., Eldevik T., Viste E., Drange H., Furevik T., Johnson H.L., Keenlyside N.S. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean, Nature Communications, 2017, vol. 8, 1585, DOI: 10.1038/ncomms15875.

Astafyeva N.M., Rayev M.D. The effect of large-scale remote atmospheric environments on tropical cyclone trajectories, Sovremenniye problemi distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Fizicheskiye osnovy. Metody i tehnologii monitoringa okruzhayushhey sredy, potencialno opasnyh yavleniy i objektov [Current problems of remote sensing of the Earth from space: Physical foundations, methods and technologies for monitoring the environment, potentially dangerous phenomena and objects], Moscow, DoMira Publ., 2010, vol. 7, no. 1, p. 61–74. (In Russian)

Beloye more i ego vodosbor pod vliyaniyem klimaticheskih i antropogennyh faktorov [White Sea and its catchment basin under the influence of climatic and anthropogenic factors] Filatov N.N.,

Terzhevik A.Yu. (Eds.), Petrozavodsk, Karelian Science Center RAS Publ., 2007, 335 p. (In Russian)

Byshev V.I. Sinopticheskaya i krupnomasshtabnaya izmenchivost okeana i atmosfery [Synoptic and large-scale variability of the ocean and the atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 344 p. (In Russian)

Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. Pure and Applied Geophysics, 2017, vol. 174, no. 7, p. 2863–2878. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.

Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Y.A., Serykh I.V., Sonechkin D.M. Statistical significance and climatic role of the Global Atmospheric Oscillation. Oceanology, 2016, vol. 56, no. 2, p. 165–171. DOI: 10.1134/S000143701602003X.

Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. El Nińo as a consequence of the global oscillation in the dynamics of the

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Large-Scale Variability of Hydrophysical Fields, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; *e-mail*: iserykh@ocean.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geography and Hydrology, Head of the Laboratory, PhD. in Geography; *e-mail*: alexeytolstikov@mail.ru

Earth's climatic system, *Doklady Earth Sciences*, 2012, vol. 446, no 1, p. 1089–1094. DOI: 10.1134/S1028334X12090012.

Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleaso B.E., Vose R.S., Rutledge G., Bessemoulin P., Brönnimann S., Brunet M., Crouthamel R.I., Grant A.N., Groisman P.Y., Jones P.D., Kruk M., Kruger A.C., Marshall G.J., Maugeri M., Mok H.Y., Nordli Ø., Ross T.F., Trigo R.M., Wang X.L., Woodruff S.D., Worley S.J. The Twentieth Century Reanalysis Project. Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc., 2011, vol. 137, p. 1–28. DOI: 10.1002/qj.776.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge Sanz B.M., Morcrette J. J., Park B. K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J. N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, vol. 137, iss. 656, p. 553–597. DOI: 10.1002/qj.828.

Dikson R., Majnke J. Oceanographic conditions of the Atlantic in 1998–1999 and their gradual recovery from extreme impacts. 100 let okeanograficheskih nablyudenij na razreze «Kol'skiy meridian» v Barencevom more [100 years of oceanographic observations at the Kola Meridian section in the Barents Sea]. Proc. of the International Symposium, Murmansk, PINRO Publ., 2005, p. 130–144. (In Russian)

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J, Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy. L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). Journal of Climate, 2017. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

*Henriksson S.V.* Interannual oscillations and sudden shifts in observed and modeled climate. *Atmos. Sci. Lett.*, 2018, p. 1–8. DOI: 10.1002/asl.850.

Huang B., Thorne P.W., Banzon V.F., Boyer T., Chepurin G., Lawrimore J.H., Menne M.J., Smith T.M., Vose R.S., Zhang H.-M. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, 2017, vol. 30, p. 8179–8205. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1.

Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M. The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. Eds. Geophysical Monograph Series, 2003, vol. 134, 279 pp.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the V Assessment Report of the IPCC, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013, 1535 p.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Candin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, vol. 77, p. 437–471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996) 077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bull. Amer. Meteor. Soc., 2002, p. 1631–1643. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.

Klimat Karelii: izmenchivost' i vliyanie na vodny'e ob'ekty' i vodosbory' [Climate of Karelia: its variability and impact on water bodies and catchment basins], Filatov N.N. (Ed.), Petrozavodsk, KarNC RAN Publ., 2004, 224 p. (In Russian)

Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebita A., Moriya M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. Journal of the

*Meteorological Society of Japan*, Ser. II, 2015, vol. 93, no. 1, p. 5–48. DOI: 10.2151/jmsj.2015-001.

Krasilnikova V.V. Analiz mnogoletnej izmenchivosti prizemnoj temperatury' vozduha v rajone Dvinskogo zaliva Belogo moray za period 1915–2015 gg. [Analysis of inter-annual variability of surface air temperature in the Dvina Bay of the White Sea for the period 1915–2015], Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy', 2018, no. 2(368), p. 110–119. (In Russian)

Lociya Belogo moray [White Sea Sailing Direction]. Saint-Petersburg, Min. oborony' SSSR, GUNiO Publ., 1995, no. 1110, 336 p. (In Russian)

Moron V., Vautard R., Ghil M. Trends, interdecadal and interannual oscillations in global sea-surface temperatures. Climate Dynamics, 1998, vol. 14, p. 545–569. DOI: 10.1007/s003820050241.

Rodriguez-Fonseca B., Suarez-Moreno R., Ayarzaguena B. Lypez-Parages J., Gymara I., Villamayor J., Mohino E., Losada T., Castaco-Tierno A. A Review of ENSO Influence on the North Atlantic. A Non-Stationary Signal. Atmosphere, 2016, vol. 7, no. 7, p. 87. DOI: 10.3390/atmos7070087.

Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y-T, Chuang H., Iredell M., Ek M., Meng J., Yang R., Mendez M.P., Wang W., Chen M., Becker E. The NCEP Climate Forecast System Version 2. Journal of Climate, 2014, vol. 27, p. 2185–2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.

Serykh I.V. O dinamike i strukture global'noj atmosfernoj oscillyacii v klimaticheskih modelyah i real'nosti [On the dynamics and structure of the Global Atmospheric Oscillation in climate models and reality], Okeanologicheskie issledovaniya, 2018, vol. 46, no. 1, p. 14–28. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).2. (In Russian)

Serykh I.V., Sonechkin D.M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation. *International Journal of Climatology*, 2020. DOI: 10.1002/joc.6488.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. Haos i poryadok v atmosfernoj dinamike. Part 1. Haoticheskie variacii pogody [Chaos and order in atmospheric dynamics. Part 1. Chaotic weather variations], Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedeniy. Prikladnaya Nelineynaya Dinamika, 2017, vol. 25, no. 4, p. 4–22. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-4-4-22. (In Russian)

Serykh I.V., Sonechkin D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin. Theoretical and Applied Climatology, 2019, vol. 137(3–4), p. 2639–2656. DOI: 10.1007/s00704-018-02761-0.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. Sopostavlenie vremennyh energeticheskih spektrov indeksov El'-Nin'o – Yuzhnogo kolebaniya i global'nyh polej temperatury i atmosfernogo davleniya v pripoverhnostnom sloe [An intercomparison of the temporal power spectra of El Nińo – Southern oscillation indices and the global temperature and pressure fields in the surface layer], Fundamental and Applied Climatology, 2017, vol. 2, p. 144–155. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-1-144-155. (In Russian)

Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections. Pure and Applied Geophysics, 2019, vol. 176(8), p. 3737–3755. DOI: 10.1007/s00024-019-02182-8.

Sistema Belogo morya. Prirodnaya sreda vodosbora Belogo morya. [The system of the White Sea. The natural environment of the White Sea catchment basin], vol. 1, Moscow, Nauchny mir Publ., 2010, 480 p. (In Russian)

Stickler A., Brönnimann S., Valente M.A., Bethke J., Sterin A., Jourdain S., Roucaute E., Vasquez M.V., Reyes D.A., Allan R., Dee D. ERA-CLIM: Historical Surface and Upper-Air Data for Future Reanalyses. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2014, vol. 95, no. 9, p. 1419–1430. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00147.1.

Tolstikov A.V. Izmenchivost' temperatury poverhnostnogo sloya Belogo moray [Temperature variability of the surface layer of the White Sea], Moscow, GEOS Publ., 2016, 212 p. (In Russian)

Tolstikov A.V., Chernov I.A. Variability of biogeochemical processes in the White Sea under different climatic conditions

according to modeling data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN* [Proc. of the Karelian Scientific Center], Petrozavodsk. KarNC RAN Publ., 2019, no. 6, p. 1–11. DOI: 10.17076/eb95. (In Russian)

Tolstikov A.V., Filatov N.N., Zdorovennov R.E. Beloe more i ego vodosbor [White Sea and its catchment basin], Database Registration Certificate, no. 2010620435, August 16, 2010. (In Russian)

*Torrence D.C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, vol. 79, p. 61–78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.

Torrence D.C., Webster P.J. Interdecadal changes in the ENSOmonsoon system. Journal of Climate, 1999, vol. 12, p. 2679–2690. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2679:ICITEM>2.0.CO;2.

Vakulenko N.V., Serykh I.V., Sonechkin D.M. Haos i poryadok v atmosfernoj dinamike, part 3. Predskazuemost' El'-Nin'o [Chaos and order in atmosheric dynamics, part 3. Predictability of El Nińo], Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedeniy. Prikladnaya Nelineynaya Dinamika, 2018, vol. 26, no. 4, p. 75–94. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94. (In Russian)

Received 31.03.2019 Revised 20.11.2019 Accepted 06.03.2020