

УДК 551.465

## ЗИМНИЕ АНОМАЛИИ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА ПРИ СМЕЩЕНИЯХ “СЕВЕРНОЙ СТЕНЫ” ГОЛЬФСТРИМА

© 2020 г. С. Б. Крашенинникова<sup>1, \*</sup>, И. Г. Шокурова<sup>2</sup>, М. В. Шокуров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*e-mail: svetlanabk@mail.ru

Поступила в редакцию 16.11.2018 г.

После доработки 17.05.2019 г.

Принята к публикации 18.06.2019 г.

На основе среднемесячных данных океанического реанализа *ORAS4* определяются пространственное распределение и величины аномалий температуры поверхности океана и скорости поверхностных течений, возникающих в Северной Атлантике при меридиональных смещениях “северной стены” Гольфстрима в январе–феврале. В качестве данных о смещениях Гольфстрима используются данные индекса “северной стены” Гольфстрима. Пространственные распределения аномалий, соответствующие северным и южным положениям “северной стены”, строятся на основе осреднения полей температуры поверхности океана и скорости течений, относящихся к каждой фазе индекса “северной стены” Гольфстрима. Получено, что при меридиональных смещениях “северной стены” Гольфстрима статистически значимые аномалии модуля скорости течений (0.03 м/с) и температуры поверхности океана (1°C) находятся не только в районе “стены”, но и вдоль всей северной границы Гольфстрима. Здесь значение коэффициента корреляции временных рядов скорости с индексом “северной стены” Гольфстрима составляет 0.56, температуры – 0.50. Значимые аномалии температуры (0.3°C) находятся у берегов Пиренейского полуострова и в центральной части субтропического антициклонического круговорота. Значения коэффициентов корреляции временных рядов температуры поверхности с индексом “северной стены” Гольфстрима в этих районах составляют 0.48 и 0.53 соответственно.

**Ключевые слова:** Северная Атлантика, индекс “северной стены” Гольфстрима, температура поверхности океана, скорость течений

**DOI:** 10.31857/S0030157420010153

### ВВЕДЕНИЕ

Гольфстрим играет ключевую роль в переносе массы и тепла из низких широт на север и оказывает существенное влияние на климатические условия Атлантико-Европейского и Арктического регионов [1, 27, 31]. Меридиональные сдвиги положения северной границы Гольфстрима, разделяющей воды с различными гидрологическими характеристиками, влияют на положение районов с высокой биологической продуктивностью, привязанных к фронтальным зонам. Эти сдвиги отражаются на распределении некоторых видов рыб [22, 23], численности кальмаров [9], а также могут приводить к изменениям в составе и численности планктонных сообществ [6, 33].

Район Гольфстрима является сложным для исследования объектом, так как широта, на которой течение поворачивает на восток от побережья Америки и распространяется через Северную Ат-

лантику, различается в разные сезоны и годы [30]. Из-за существующих интенсивных мезомасштабных флуктуаций в районе 65°–75° з.д., переходящих в растущие меандры между 45° и 60° з.д. [4, 18, 20, 30], путь Гольфстрима трудно предсказывается даже с помощью самых современных моделей циркуляции.

Сведения о широтных смещениях положения Гольфстрима содержатся в массиве данных индекса “северной стены” Гольфстрима (ССГ) [www.pml.ac.uk/gulfstream]. Ряд, полученный на основе обработки аэро- и спутниковых наблюдений, выполненных с 1966 г. на участке, где струя отрывается от вдольберегового положения, представлен в работе [34]. В ней проанализированы временные ряды меридиональных отклонений положения северной границы Гольфстрима от среднего значения широты на шести долготах на участке между 65° и 79° з.д., который называется “северная стена” Гольфстрима. Анализ прово-

дился методом главных компонент. Результирующий ряд индекса ССГ представляет собой первую главную компоненту, характеризующую смещение всего анализируемого участка Гольфстрима. Положительные значения индекса (положительная фаза индекса ССГ) соответствуют смещениям к северу “северной стены”, а отрицательные значения (отрицательная фаза индекса ССГ) — ее смещениям к югу.

Анализу этих данных и выявлению причин изменений положения Гольфстрима посвящено большое число исследований. На изменения положения ССГ могут оказывать существенное влияние ветровое воздействие на фоне крупномасштабных климатических сигналов [7, 13, 35], изменения положения Исландского минимума атмосферного давления [15, 32], адвекция водных масс из моря Лабрадор [11, 28], а также комплексное воздействие различных факторов [17, 29].

Изменение широтного положения Гольфстрима сопровождается возникновением аномалий температуры и скорости течений в районах его смещения, а также в других районах Северной Атлантики за счет переноса тепла течениями. Исследование температурных аномалий, связанных с изменением положения Гольфстрима, проводилось во многих работах. С меридиональными смещениями Гольфстрима связываются изменения температуры в районе шельфового склона в [24, 26]. Часть работ посвящена анализу пространственного распределения и продуктивности биологических сообществ за счет изменений температуры воды, сопровождающих смещения Гольфстрима [23, 33, 34]. Эти исследования, как правило, выполнялись по данным отдельных съемок. Исследований пространственного распределения аномалий температуры и скорости течений на основе данных океанических реанализов, созданных в настоящее время и имеющих длинные временные ряды на регулярной сетке, не проводилось. Сравнение данных океанических реанализов с контактными наблюдениями, выполненное в работах [5, 21] показывает, что они хорошо воспроизводят межгодовую изменчивость и долговременные тенденции гидрологических параметров и могут использоваться для исследования аномалий скорости и температуры в Северной Атлантике.

Цель работы — проанализировать пространственное распределение и получить количественные оценки аномалий скорости течений и температуры поверхности Северной Атлантики, связанные со смещением “северной стены” Гольфстрима на основе использования данных океанического реанализа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

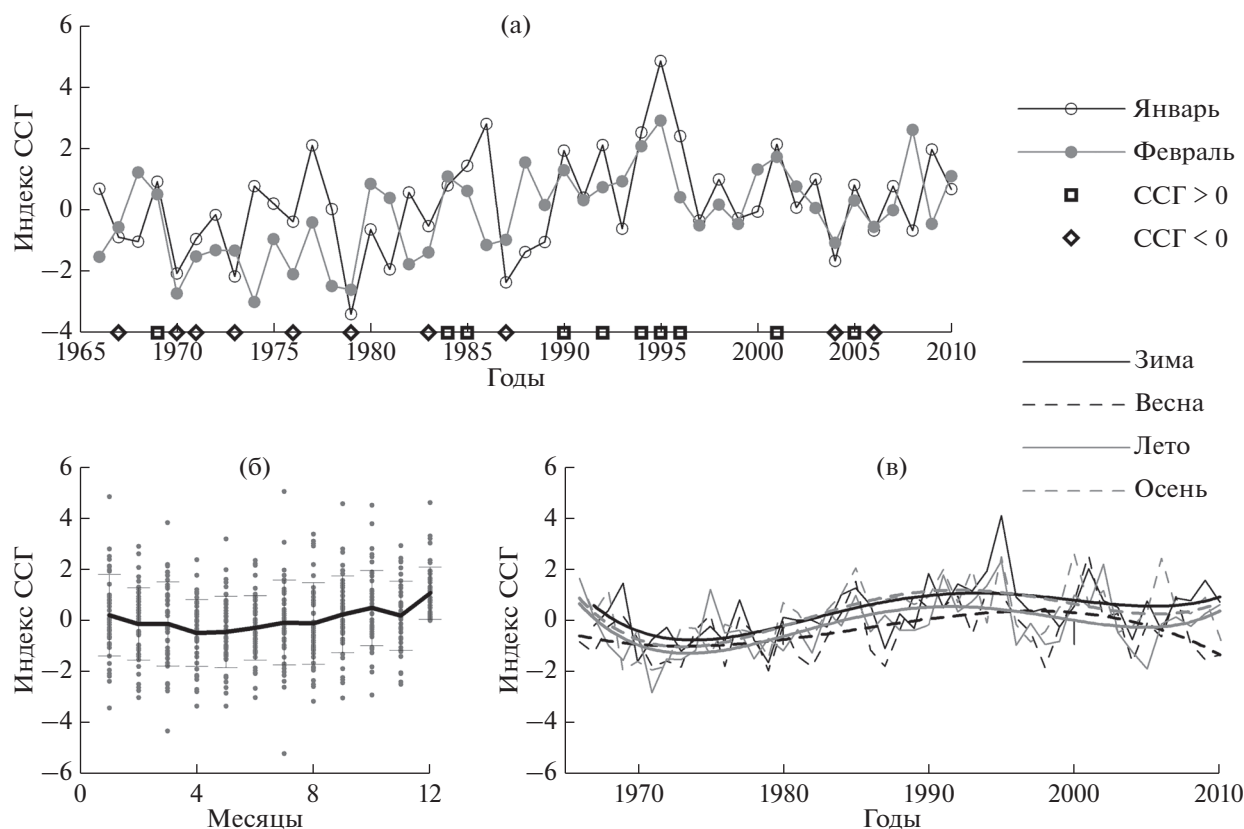
Для исследования изменения положения Гольфстрима использовался временной ряд среднемесячных значений индекса ССГ 1966–2010 гг. [[www.pml.ac.uk/gulfstream](http://www.pml.ac.uk/gulfstream)] и его продленный ряд (1966–2017 гг.) [<http://www.pml-gulfstream.org.uk>].

Использовались данные о температуре поверхности океана  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и скорости течений на поверхности  $V = (u, v)$  ( $\text{мс}^{-1}$ ) океанического реанализа *ORAS4* за 1958–2017 гг. с пространственным горизонтальным разрешением  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  [[http://ftp.icdc.zmaw.de/EASYInit/ORA-S4/monthly\\_1x1/](http://ftp.icdc.zmaw.de/EASYInit/ORA-S4/monthly_1x1/)] для района  $10^{\circ}$ – $65^{\circ}$  с.ш.,  $0^{\circ}$ – $80^{\circ}$  з.д. в Северной Атлантике. Реанализ *ORAS4* базируется на модели океана *NEMO* [<http://www.nemo-ocean.eu/>] версии 3.0 и системе усвоения данных *NEMOVAR* и поверхностного форсинга *ECMWF* [21]. По этим данным в каждом узле сетки были вычислены ряды отклонений (аномалий) температуры поверхности океана (ТПО), модуля и компонент  $u$  и  $v$  вектора скорости течений от среднемноголетнего значения.

Исследование проводилось для зимних месяцев (январь и февраль), так как зимой аномалии температуры, возникающие при смещении Гольфстрима, более выражены за счет контрастов между холодными водами, поступающими с севера, и теплыми водами Гольфстрима. Кроме того, учитывалось, что влияние температуры и интенсивности течения Гольфстрим на условия в других районах Северной Атлантики и на климат Европы наиболее сказывается в зимнее время [31].

Пространственные распределения аномалий ТПО, модуля скорости течений, соответствующие каждой из двух фаз индекса ССГ, рассчитывались на основе формирования композитов — наборов полей аномалий температуры и скорости течений, объединенных по годам с положительными и отрицательными значениями индекса по данным за январь–февраль. Выбирались те годы, в которые значение индекса ССГ для января и февраля были одного знака (рис. 1а). Были выбраны следующие годы с положительным индексом ССГ — 1969, 1984, 1985, 1990, 1992, 1994, 1995, 1996, 2001, 2005 и отрицательным индексом — 1967, 1970, 1971, 1973, 1976, 1979, 1983, 1987, 2004, 2006. Осреднением за эти годы были построены поля аномалий ТПО и скорости течений, соответствующие смещениям ССГ к северу и к югу.

Статистическая значимость величины аномалий скорости течений и ТПО определялась в каждом узле сетки как значимость разности между значениями в средних полях композитов, соответствующих разным фазам индекса ССГ. Использовался  $t$ -критерий Стьюдента для двух независимых выборок  $t = (x_1 - x_2) / \sqrt{(s_1^2 + s_2^2) / n}$ , где  $x_1$ ,  $x_2$  — средние значения аномалий,  $s_1^2$ ,  $s_2^2$  — дисперсии,  $n$  — число лет в композитах [36].



**Рис. 1.** Межгодовая изменчивость индекса ССГ [www.pml.ac.uk/gulfstream] в январе и феврале (а), сезонный цикл индекса ССГ (доверительный интервал –  $\pm\sigma$  среднеквадратическое отклонение) (б), межгодовая изменчивость индекса ССГ, осредненного за зимний (декабрь–февраль), весенний (март–май), летний (июнь–август), осенний (сентябрь–ноябрь) сезоны (в). Жирные кривые – полиномиальные тренды 5-го порядка.

Дополнительно для обнаружения статистической связи между индексом ССГ и значениями аномалий ТПО и скорости течений вычислялись корреляции  $r$  между их временными рядами в каждом узле сетки для каждого месяца. Значимость коэффициента корреляции  $r$  определялось по  $t$ -критерию Стьюдента  $t = r\sqrt{n-2}/\sqrt{1-r^2}$ , где  $n$  – длина рядов [36]. Для длины ряда в 45 лет коэффициенты корреляции, превышающие значение 0.30, являются значимыми на 1% доверительном уровне.

Для анализа корреляционных связей аномалий скорости течений и ТПО с индексом Североатлантического колебания использовался его ряд среднемесячных значений за 1958–2017 гг. [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml].

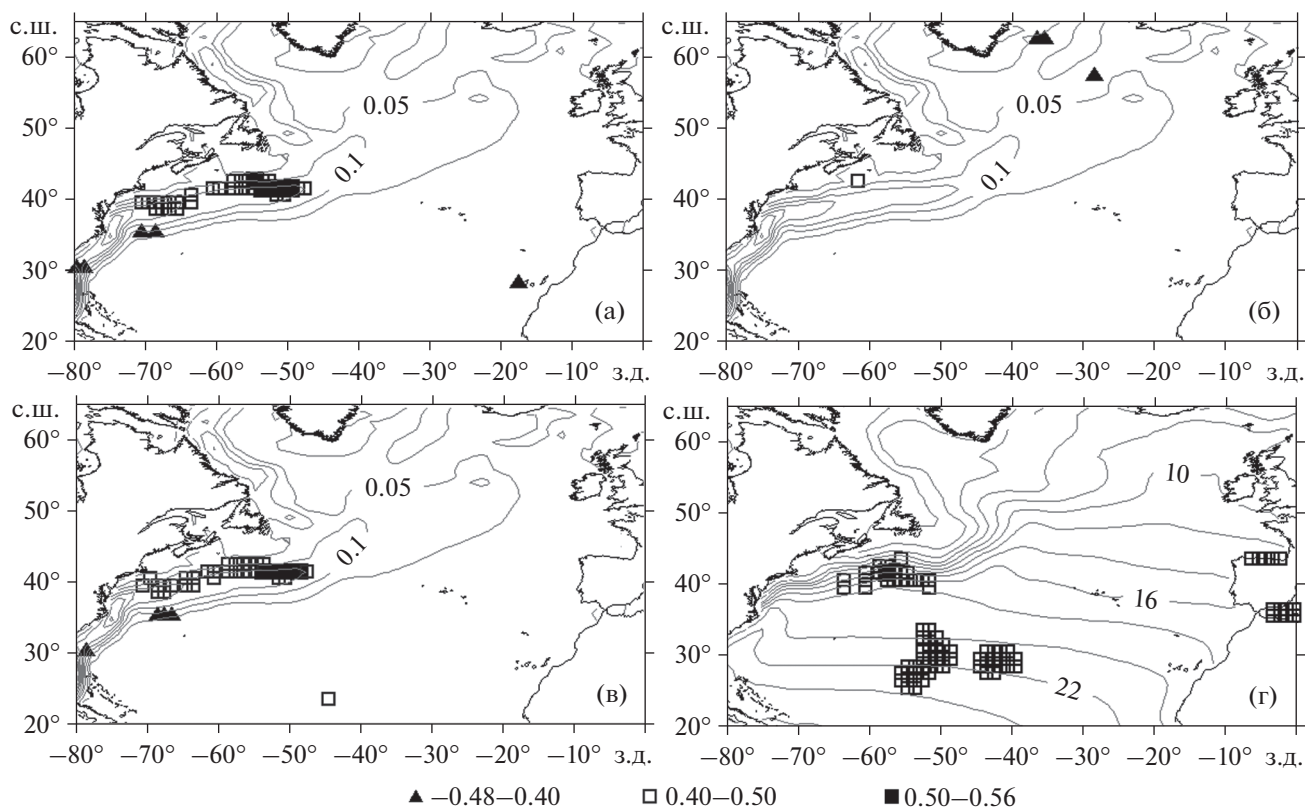
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Внутригодовая и межгодовая изменчивость индекса ССГ.** Сезонная изменчивость значений индекса ССГ выражена слабо, и различия между среднемесячными значениями индекса незначи-

мы (рис. 1б). Величина амплитуды среднемноголетнего сезонного цикла индекса ССГ в 2 раза меньше амплитуды его межгодовой изменчивости (рис. 1б и 1в), что подтверждает результаты работ [2, 34]. Следует отметить, что минимальные значения индекса наблюдаются весной–летом, максимальные – осенью–зимой (рис. 1б).

В межгодовой изменчивости индекса ССГ наблюдаются низкочастотные колебания (рис. 1в), которые присутствуют во все сезоны и имеют сравнительно синхронный характер. Это предполагает существование на длительных временных масштабах единого, не зависящего от сезона, механизма, обуславливающего причины таких изменений. Смещение “северной стены” Гольфстрима в южном направлении происходило в 1970-е гг., в северном – в 1990-е гг., на что ранее обращалось внимание в работах [2, 14, 25].

**Пространственное распределение коэффициентов корреляции компонент скорости течений и ТПО с индексом ССГ.** Пространственное распределение коэффициентов корреляции в каждой точке сетки между временными рядами индекса ССГ и компонент скорости течений, модуля скорости и



**Рис. 2.** Пространственное распределение коэффициентов корреляции, вычисленных в каждом узле сетки, между индексом ССГ и компонентами скорости  $u$  (а) и  $v$  (б), модулем скорости  $V$  (в) и ТПО (г). Изолинии – средние за январь–февраль поле модуля скорости ( $\text{мс}^{-1}$ ) (а, б, в) и поле температуры,  $^{\circ}\text{C}$  (г).

ТПО, осредненных за январь–февраль, приведено на рис. 2. Положительные коэффициенты корреляции (0.40–0.56) индекса ССГ с зональной компонентой скорости  $u$  (рис. 2а) и модулем скорости  $V$  (рис. 2в) расположены вдоль северной границы Гольфстрима, отрицательные вдоль южной границы, в районе “северной стены”. Максимальные значения коэффициентов корреляции находятся в районе северной границы Гольфстрима. Значения коэффициентов корреляции индекса ССГ с меридиональной компонентой скорости  $v$  (рис. 2б), превышающие по абсолютной величине 0.40, расположены точно в районах “северной стены” Гольфстрима и Восточно-Гренландского течения.

Положительные значения коэффициентов корреляции ССГ с ТПО, имеющие значения 0.40–0.53, расположены в районе северной границы Гольфстрима ( $50^{\circ}$ – $65^{\circ}$  з.д.), вдоль северного и южного побережий Пиренейского полуострова и в центре субтропического антициклонического круговорота. Максимальные значения коэффициентов корреляции расположены в районе северной границы Гольфстрима.

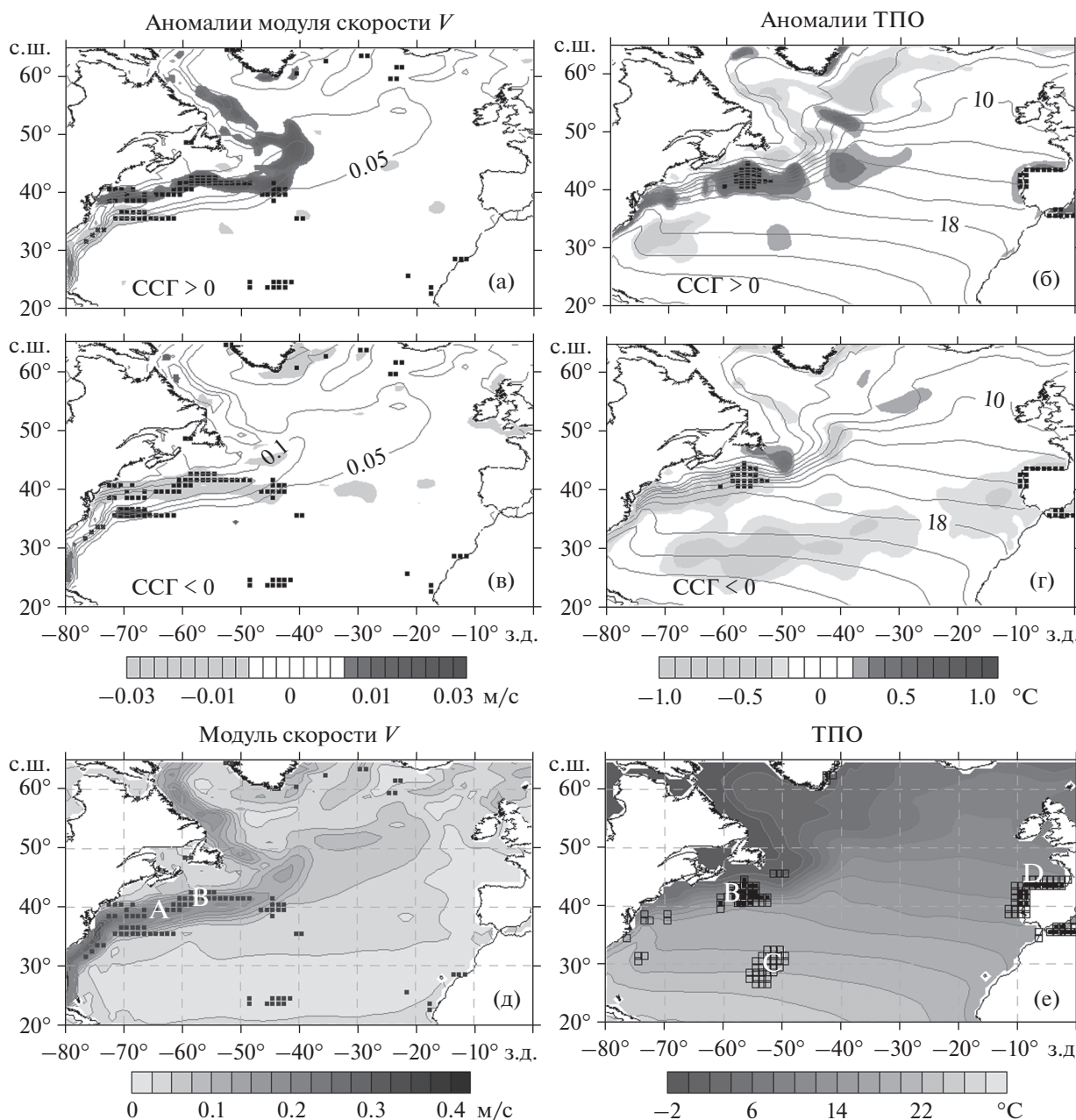
Распределение коэффициентов корреляции ССГ с зональной компонентой скорости и модулем

скорости хорошо согласуются между собой, и для них получены наибольшие значения (рис. 2а, 2в). Поэтому далее пространственное распределение аномалий скорости течений, возникающих при положительной и отрицательной фазах ССГ, анализируется только для модуля скорости.

#### Среднегодовое распределение аномалий модуля скорости течений для двух фаз индекса ССГ.

Пространственные распределения значимых на 5% доверительном уровне средних аномалий скорости течений для положительной и отрицательной фаз индекса ССГ представлены на рис. 3а, 3в, 3д.

При положительной фазе индекса ССГ (смещении “северной стены” к северу) положительные аномалии скорости (0.02–0.03 м/с) расположены по всей северной границе Гольфстрима, в том числе восточнее “северной стены” (рис. 3а). В районе Восточно-Гренландского течения положительные аномалии составляют 0.01 м/с. В районах Канарского и Северного пассатного течений значимые положительные аномалии скорости течений имеют невысокие значения. При положительной фазе индекса ССГ Гольфстрим более продвинул в зonalном направлении к востоку (аномалия в райо-



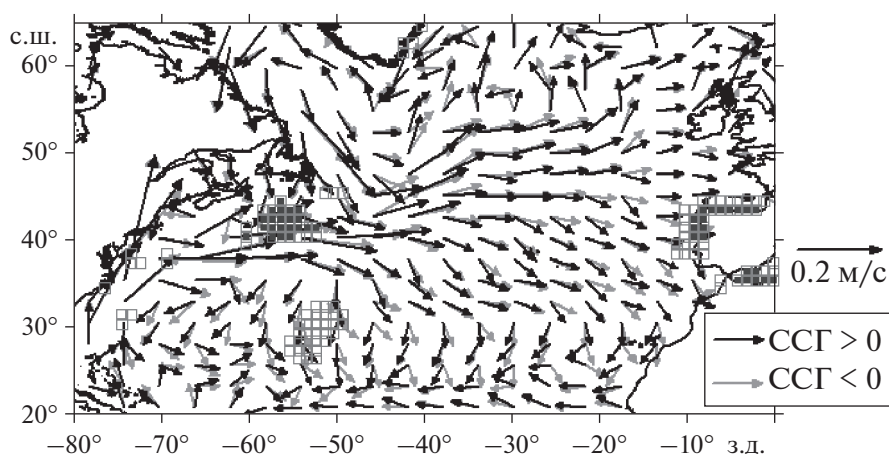
**Рис. 3.** Средние аномалии модуля скорости (а, в) и ТПО (б, г) при положительной фазе индекса ССГ (а, б) и при отрицательной фазе (в, г) и среднееголетние поля модуля скорости течений (д, изолинии – а, в) и ТПО (е, изолинии – б, г) за январь–февраль. Черными квадратами (а–е) отмечены районы, в которых аномалии значимы на 5% доверительном уровне, белыми квадратами (е) – на 10% .

не с центром 40° с.ш. 45° з.д., рис. 3а) по сравнению с отрицательной фазой (рис. 3в).

Отрицательные аномалии скорости (–0.02 м/с) за счет смещения Гольфстрима на север наблюдаются на южной границе Гольфстрима (36°–37° с.ш., 61°–73° з.д) (рис. 3а). Значимая отрицательная аномалия отмечается и на восточной границе струи южнее мыса Хаттерас (рис. 3а). Возможно, это связано с тем, что в положительную фазу Гольфстрим больше прижимается к бе-

регу, чем в отрицательную. На такое смещение также указывается в работе [24].

**При отрицательной фазе ССГ** (смещении “северной стены” к югу) ситуация обратная (рис. 3в). На всей северной границе Гольфстрима, в Восточно-Гренландском течении, у побережья Африки и на северной границе Северного Пассатного течения наблюдаются отрицательные аномалии скорости. Максимальные по амплиту-



**Рис. 4.** Поле поверхностных течений при разных фазах ССГ. Черными квадратами отмечены районы, в которых аномалии ТПО значимы на 5% доверительном уровне, белыми квадратами – на 10%.

де аномалии ( $-0.03$  м/с) отмечаются в районе “северной стены” Гольфстрима между  $65^\circ$  и  $79^\circ$  з.д.

Отметим, что пространственное положение значимых на 5% доверительном уровне аномалий скорости (рис. 3а, 3в) соответствует районам с наибольшими корреляциями между временными рядами индекса ССГ и модуля скорости течений (рис. 2в).

**Среднегодовое поле аномалий температуры поверхности океана для двух фаз индекса ССГ.** Карты распределения осредненных аномалий ТПО для разных фаз индекса ССГ (рис. 3б, 3г, 3е) показывают наличие значимых аномалий вдоль северной границы Гольфстрима, в районе его вдольберегового потока ( $30^\circ$ – $40^\circ$  с.ш.), у побережья Пиренейского полуострова и в центральной части субтропического антициклонического круговорота.

Аномалии, значимые на 5% доверительном уровне, составляющие  $1^\circ\text{C}$  в положительную фазу индекса ССГ и  $-0.6^\circ\text{C}$  в отрицательную фазу, отмечаются вдоль северной границы Гольфстрима ( $50^\circ$ – $65^\circ$  з.д.). Высокие значения аномалий в положительную фазу, при смещении потока к северу связаны с наличием резких градиентов температуры между теплыми водами Гольфстрима и холодными водами Лабрадорского течения в зимние месяцы.

Аномалии вдоль Пиренейского полуострова, значимые на 5% доверительном уровне, составляют  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ . Аномалии в центральной части субтропического антициклонического круговорота (рис. 3а, 3б, 3д) значимы на 10% доверительном уровне. Их величина составляет  $0.25^\circ\text{C}$  в положительную фазу индекса ССГ и  $-0.4^\circ\text{C}$  – в отрицательную фазу.

**Направление скорости течений при разных фазах ССГ.** В направлениях скорости течений осредненных полей, полученных для каждой из

фаз индекса ССГ, имеются различия, как показано на рис. 4. Заметные изменения наблюдаются в области субтропического антициклонического круговорота, между  $20^\circ$  и  $30^\circ$  с.ш., где направление скорости течения изменяется с юго-восточного в отрицательную фазу на юго-западное – в положительную. В районе ответвления Португальского течения от Северо-Атлантического течения направление скорости течений в положительную фазу по сравнению с отрицательной изменяется с северо-восточного на юго-восточное, а в области ответвления Азорского течения от Гольфстрима – с восточного на юго-восточное направление. Таким образом, в положительную фазу индекса ССГ в районе восточнее и севернее Гольфстрима увеличивается перенос тепла в восточном направлении, что может сопровождаться возникновением положительных аномалий температуры у берегов Пиренейского полуострова. В отрицательную фазу увеличивается перенос в северо-восточном направлении.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами [10, 12]. В работе [12] по данным альтиметрических измерений проанализированы режимы смещения северного субполярного фронта на декадных временных масштабах в соответствии с изменениями индекса САК. Показано, что при смещении Гольфстрима к югу сегмент субполярного фронта, проходящий по восточной границе Северо-Атлантического течения, смещается к западу, что указывает на увеличение переноса теплых вод на север. При смещении Гольфстрима к северу фронт смещается к востоку, что сопровождается уменьшением переноса теплых вод на север. Эти два режима хорошо согласуются с распределением направления скорости течений при двух фазах индекса ССГ (рис. 4).

В работе [10] при исследовании бюджета тепла в районе Гольфстрима показано, что в режиме бо-

**Таблица 1.** Статистические характеристики временных рядов средних аномалий скорости и температуры в районах А, В, С и D

	Аномалии $V$ , м/с		Аномалии ТПО, °С		
	А	В	В	С	Д
СКО	0.017	0.024	1.16	0.54	0.69
Max	0.043	0.039	2.26	1.31	1.40
Min	-0.033	-0.069	-2.79	-1.10	-1.24
Среднее (аномалии > 0)	0.020	0.029	1.40	0.67	0.50
Среднее (аномалии < 0)	-0.015	-0.025	-1.01	-0.51	-0.63
Корреляция с индексом ССГ	0.51 (0.44*)	0.56 (0.47*)	0.50 (0.40*)	0.53 (0.37*)	0.48 (0.30*)
Корреляция с индексом САК	0.60 (0.51*)	0.61 (0.45*)	0.40 (0.17*)	0.53 (0.35*)	0.50 (0.24*)

Примечание. Звездочкой обозначены корреляции для рядов с удаленным трендом.

лее интенсивного и “вытянутого” (“*elongated*”) в зональном направлении Гольфстрима (что в нашей работе соответствует положительной фазе ССГ, рис. 3а) происходит увеличение переноса тепла на восток и наблюдаются положительные аномалии поверхностной температуры в субтропическом антициклоническом круговороте. В режиме “сжатого” (“*contracted*”) Гольфстрима (что в нашей работе соответствует отрицательной фазе ССГ, рис. 3в) в субтропическом антициклоническом круговороте наблюдаются отрицательные аномалии температуры. Указанные режимы могут служить объяснением наличия значимых положительных корреляций между индексом ССГ и ТПО и значимых аномалий ТПО, полученных у берегов Пиренейского полуострова и в центре субтропического круговорота (рис. 2в, рис. 3б и 3г).

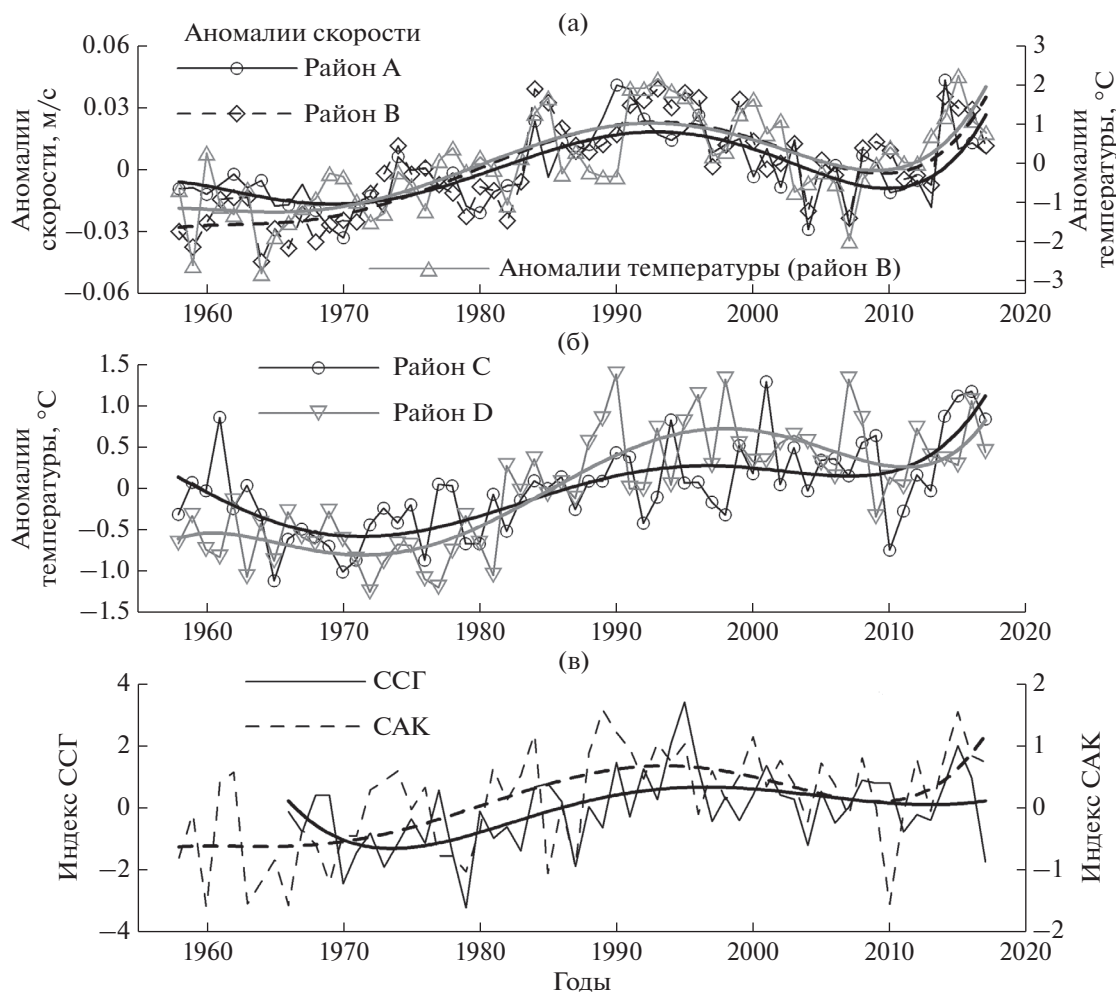
**Долговременная изменчивость скорости течений и ТПО в районах со значимыми аномалиями.** Для более подробного анализа межгодовой изменчивости аномалий скорости течений и ТПО были выбраны следующие четыре района (отмечены буквами на рис. 3д, 3е). Район А (39°–40° с.ш., 60°–65° з.д.) – для анализа изменчивости скорости в районе среднего широтного положения северного участка Гольфстрима (рис. 3д). Районы В, С, D – районы со значимыми аномалиями скорости течений и ТПО. В районе В (41°–43° с.ш., 55°–57° з.д.) рассматривалась изменчивость скорости течений и ТПО на северной границе Гольфстрима (рис. 3д, 3е). В центре субтропического антициклонического круговорота – район С (29°–31° с.ш., 51°–53° з.д.) и у северной границы Пиренейского полуострова – район D (43°–44° с.ш., 4°–7° з.д.) рассматривалась изменчивость ТПО (рис. 3е).

Статистические характеристики рядов аномалий скорости и ТПО, корреляции с индексом САК (табл. 1) рассчитывались по всей длине имеющихся рядов 1958–2017 гг., корреляции с индексом ССГ – для периода 1966–2017 гг. Анализ временных рядов показывает наличие значительных межгодовых вариаций скорости и температуры в

январе–феврале в указанных районах (рис. 5, табл. 1). Вариации скорости на северной границе Гольфстрима (район В) превышают вариации в самом течении (район А) (табл. 1). Наибольшая изменчивость температуры также отмечается на северной границе Гольфстрима (район В). Размах аномалий модуля скорости и температуры в районе В достигает 0.06 м/с и 4°С соответственно. Такой размах изменчивости температуры может существенно сказываться на изменениях биологических сообществ [8, 16], а также отражаться на региональном климате [19]. В центре субтропического антициклонического круговорота (район С) и у северных берегов Пиренейского полуострова (район D) размах температуры меньше в 2 раза и составляет соответственно 2.4 и 2.6°С. Отметим, что значения средних аномалий, полученных по данным 1958–2017 гг. (табл. 1), превышают значения на рис. 3а–3г, полученные по более короткому ряду 1966–2010 гг.

Для анализа низкочастотных колебаний скорости течений и ТПО, характеризующих тенденции долговременной изменчивости, временные ряды в указанных районах сглаживались полиномами 5-го порядка (рис. 5). В северной части Гольфстрима (район А) и на его северной границе (район В) происходило уменьшение температуры и скорости течений с 1960-х до начала 1980-х и с середины 2000-х до середины 2010-х гг. Увеличение температуры и скорости течений отмечалось с начала 1980-х до середины 2000-х гг. и в конце рассматриваемого временного периода. В работе [3] по данным спутниковых альтиметрических измерений за 1993–2015 гг. отмечаются аналогичные долговременные тенденции изменчивости скорости в Гольфстриме и изменений его меридионального положения.

Временная изменчивость аномалий скорости и ТПО в указанных районах имеет значимую положительную корреляцию с индексом ССГ. В районе северной границы Гольфстрима (район В) она максимальная и составляет 0.56 (табл. 1). Коэффициенты корреляции ( $r$ ) между индексом ССГ и



**Рис. 5.** Межгодовая изменчивость аномалий скорости течения в районах А, В (а), аномалий ТПО в районах В (а), С, D (б), индекса ССГ [<http://www.pml-gulfstream.org.uk>] и индекса САК [<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>] (в). Жирные кривые – полиномиальные тренды 5-го порядка. Положение районов А, В, С, D приведено на рис. 3д и 3е.

скоростью течений в районе А, а также температуры в районах В и С превышают 0.5. Аномалии скорости на северной границе (район В) имеют положительную связь ( $r = 0.76$ ) со скоростью течения в самом Гольфстриме (район А), то есть смещения северной границы происходят при увеличении скорости в Гольфстриме.

Ряды аномалий температуры и скорости течений в указанных районах, а также индексы САК и ССГ имеют положительные тренды. Вклады дисперсий, вносимые трендами в суммарную дисперсию исходных рядов индексов САК и ССГ, равны 24 и 26% соответственно, скорости течений – 14% (район А) и 34% (район В), температуры поверхности океана – 30% (районы В и С) и 50% (район D). Таким образом, тренды вносят существенный вклад в суммарную дисперсию, поэтому после удаления трендов корреляции уменьшаются (табл. 1).

После удаления трендов коэффициенты корреляции температуры с индексом ССГ во всех районах со значимыми аномалиями (районы В, С, D) превышают значения корреляции с индексом САК (таблица). В стречне Гольфстрима (районе А) корреляция скорости течения с индексом САК превышает корреляцию с индексом ССГ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных океанического реанализа ORAS4 в Северной Атлантике построено пространственное распределение и выполнены оценки аномалий ТПО и модуля скорости течений для января–февраля для разных фаз индекса Гольфстрима.

Выделены районы со значимыми аномалиями модуля скорости течений и ТПО, которые возникают одновременно с событиями меридиональных смещений “северной стены” Гольфстрима.



Значимые аномалии скорости течений отмечаются в районе северной границы и вдольберегового Гольфстрима (0.03 м/с), в районах Восточно-Гренландского и Северного Пассатного течений. Значимые аномалии ТПО присутствуют в районе северной части Гольфстрима (1°C), в центральной части субтропического антициклонического круговорота (0.3°C) и у берегов Пиренейского полуострова (0.3°C).

Эти же районы выделяются на основе расчета корреляций индекса ССГ с компонентами скорости течений и ТПО. Значимые положительные коэффициенты корреляции (0.40–0.56) с зональной компонентой и модулем скорости течений получены вдоль северной границы Гольфстрима и отрицательные (–0.48...–0.40) – вдоль его южной границы, в районе ССГ. Значимая отрицательная связь индекса ССГ с меридиональной компонентой скорости  $v$  обнаружена в районе ССГ и Восточно-Гренландского течения.

Получено, что размах межгодовых колебаний модуля скорости течений в районе северной границы Гольфстрима равен 0.06 м/с. Диапазон колебаний температуры в этом районе составляет 4°C, а в районах центра субтропического антициклонического круговорота и северной границы Пиренейского полуострова – в 2 раза меньше.

Для средних значений модуля скорости и температуры по указанным районам выявлено наличие положительных связей с индексами ССГ и САК на межгодовом масштабе.

**Источник финансирования.** Работа выполнена по темам государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН “Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом” (АААА-А18-118021490093-4) и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Морского гидрофизического института РАН “Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан–атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата” (№ 0827-2018-0001).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в Баренцевом море и их предсказуемость // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 38–56.
2. Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость гидрофизических характеристик в Гольф-

стриме // Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 454–462.

3. Федоров А.М., Кубряков А.А., Белоненко Т.В. Многолетние изменения крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике на основе спутниковых альтиметрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017. Т. 14. № 7. С. 225–237.
4. Andres M. On the recent destabilization of the Gulf Stream path downstream of Cape Hatteras // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. № 18. P. 9836–9842.
5. Balmaseda M.A., Mogensen K., Weaver A.T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4 // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2013. V. 139. № 674. P. 1132–1161.
6. Borkman D.G., Smayda T.J. Gulf Stream position and winter NAO as drivers of long-term variations in the bloom phenology of the diatom *Skeletonema costatum* “species complex” in Narragansett Bay, RI, USA // J. Plankton Res. 2009. V. 31. № 11. P. 1407–1425.
7. Curry R.G., McCartney M.S. Ocean Gyre Circulation changes associated with the North Atlantic Oscillation // J. Phys. Oceanogr. 2001. V. 31. P. 3374–3400.
8. Davis X.J., Joyce T.M., Kwon Y.O. Prediction of silver hake distribution on the Northeast US shelf based on the Gulf Stream path index // Continental Shelf Research. 2017. V. 138. P. 51–64.
9. Dawe E.G., Colbourne E.B., Drinkwater K.F. Environmental effects on recruitment of short-finned squid (*Illex illecebrosus*). ICES // J. Mar. Sci. 2000. V. 57. P. 1002–1013.
10. Dong S., Kelly K.A. Heat budget in the Gulf Stream region: The importance of heat storage and advection // J. Phys. Oceanogr. 2004. V. 34. № 5. P. 1214–1231.
11. Drinkwater K.F. Atmospheric and sea-ice conditions in the northwest Atlantic during the decade, 1991–2000 // J. Northwest Atl. Fish. Sci. 2004. V. 34. P. 1–11.
12. Dvoryaninov G.S., Kubryakov A.A., Sizov A.A. et al. The North Atlantic Oscillation: A dominant factor in variations of oceanic circulation systems of the Atlantic Ocean // Doklady Earth Sciences. – Pleiades Publishing. 2016. V. 466. № 1. P. 100–104.
13. Frankignoul C., de Coetlogon G., Joyce T.M., Dong S.F. Gulf Stream variability and ocean–atmosphere interactions // J. Phys. Oceanogr. 2001. V. 31. P. 3516–3529.
14. Gangopadhyay A., Chaudhuri A.H., Taylor A.H. On the nature of temporal variability of the Gulf Stream Path from 75° to 55° // Earth Interactions. 2016. V. 20. № 9. P. 1–17.
15. Hammed S., Piontkovski S. The dominant influence of the Icelandic Low on the position of the Gulf Stream northwall // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № 9. L09303–L09303.
16. Huntley M.E., Lopez M.D.G. Temperature-dependent production of marine copepods: a global synthesis // The American Naturalist. 1992. V. 140. № 2. P. 201–242.
17. Joyce T.M., Deser C., Spall M.A. The relation between decadal variability of subtropical mode water and the North Atlantic Oscillation // J. of Climate. 2000. V. 13. № 14. P. 2550–2569.
18. Kang D., Curchitser E.N. Gulf Stream eddy characteristics in a high-resolution ocean model // J. of Geophys. Res.: Oceans. 2013. V. 118. № 9. P. 4474–4487.

19. *Kuwano-Yoshida A., Minobe S., Xie S.P.* Precipitation response to the Gulf Stream in an atmospheric GCM // *J. of Climate*. 2010. V. 23. № 13. P. 3676–3698.
20. *Lee T., Cornillon P.* Propagation and growth of Gulf Stream meanders between 75° and 45° W // *J. Phys. Oceanogr.* 1996. V. 26. P. 225–241.
21. *Mogensen K., Balmaseda M.A., Weaver A.* The NEMO-VAR ocean data assimilation system as implemented in the ECMWF ocean analysis for System 4. Technical Memorandum № 668. ECMWF. CERFACS, Toulouse, 2012.
22. *Nunn A.D., Harvey J.P., Britton J.R. et al.* Fish, climate and the Gulf Stream: the influence of abiotic factors on the recruitment success of cyprinid fishes in lowland rivers // *Freshwater Biology*. 2007. V. 52. № 8. P. 1576–1586.
23. *Nye J.A., Joyce T.M., Kwon Y.O. et al.* Silver hake tracks changes in Northwest Atlantic circulation // *Nature Communications*. 2011. V. 2. P. 412.
24. *Peña-Molino B., Joyce T.M.* Variability in the slope water and its relation to the Gulf Stream path // *Geophys. Res. Letters*. 2008. V. 35. № 3. L03606. <https://doi.org/10.1029/2007GL032183>
25. *Pérez-Hernández M.D., Joyce T.M.* Two modes of Gulf Stream variability revealed in the last two decades of satellite altimeter data // *J. Phys. Oceanogr.* 2014. V. 44. P. 149–163.
26. *Peterson I., Greenan B., Gilbert D. et al.* Variability and wind forcing of ocean temperature and thermal fronts in the Slope Water region of the Northwest Atlantic // *J. of Geophys. Res.: Oceans*. 2017. V. 122. № 9. P. 7325–7343.
27. *Polyakov I.V., Alexeev V.A., Bhatt U.S. et al.* North Atlantic warming: patterns of long-term trend and multidecadal variability // *Climate Dynamics*. 2010. V. 34. № 2–3. P. 439–457.
28. *Rossby T., Benway R.L.* Slow variations in mean path of the Gulf Stream east of Cape Hatteras // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. № 1. P. 117–120.
29. *Rossby T., Flagg C.N., Donohue K.* Interannual variations in upper ocean transport by the Gulf Stream and adjacent waters between New Jersey and Bermuda // *J. Mar. Res.* 2005. V. 63. P. 203–226.
30. *Rossby T., Flagg C.N., Donohue K. et al.* On the long-term stability of Gulf Stream transport based on 20 years of direct measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. № 1. P. 114–120.
31. *Seager R., Battisti D.S., Yin J. et al.* Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters? // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2002. V. 128. № 586. P. 2563–2586.
32. *Sunchez-Franks A., Hameed S., Wilson R.E.* The Icelandic Low as a Predictor of Gulf Stream North Wall Position // *J. Phys. Oceanogr.* 2016. V. 46. P. 817–826.
33. *Taylor A.H.* North–South shifts of the Gulf Stream and their climatic connection with the abundance of zooplankton in the UK and its surrounding seas // *J. Mar. Sci.* 1995. V. 52. Iss. 3–4. P. 711–721.
34. *Taylor A.H., Stephens J.A.* Latitudinal displacements of the Gulf Stream (1966 to 1977) and their relation to changes in temperature and zooplankton abundance in the NE Atlantic // *Oceanol. Acta*. 1980. V. 3. P. 145–149.
35. *Taylor A.H., Stephens J.A.* The North Atlantic oscillation and the latitude of the Gulf Stream // *Tellus A*. 1998. V. 50. № 1. P. 134–142.
36. *Thiébaux H.J.* Statistical Data Analysis for Ocean and Atmospheric Sciences. Academic Press, 1994. 247 p.

## Winter Currents Velocity and Sea Surface Temperature Anomalies Accompanying the Gulf Stream “North Wall” Displacements

S. B. Krasheninnikova<sup>a, #</sup>, I. G. Shokurova<sup>b</sup>, M. V. Shokurov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia*

<sup>b</sup>*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: svetlanabk@mail.ru*

Spatial distribution and magnitude of the sea surface temperature anomalies and surface current velocity anomalies occurring in the North Atlantic during the meridional displacements of the Gulf Stream “northern wall” in January–February are determined based on the monthly average oceanic reanalysis data *ORAS4*. As Gulf Stream displacements Data, the Gulf Stream “northern wall” index data is used. The spatial distribution of the anomalies corresponding to the northern and southern positions of the “northern wall” is based on the averaging of the fields of the sea surface temperature and velocity related to each phase of the Gulf Stream “northern wall” index. It was obtained that during the meridional displacements of the Gulf Stream “northern wall”, statistically significant anomalies of the currents velocity (0.03 m/s) and the sea surface temperature (1°C) are located not only in the area of the “wall” but also along the entire northern boundary of the Gulf Stream. Here, the value of the correlation coefficient of the current velocity time series with the Gulf Stream “northern wall” index is 0.56, the temperature is 0.50. Significant temperature anomalies (0.3°C) are located off the coast of the Iberian Peninsula and in the central part of the Subtropical anticyclonic gyre. The values of the correlation coefficients of the sea surface temperature time series with the Gulf Stream “northern wall” index in these areas are 0.48 and 0.53 respectively.

**Keywords:** North Atlantic, Gulf Stream “northern wall” index, sea surface temperature, current velocities