

УДК 551.465

РОЛЬ РЕГИОНАЛЬНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АДВЕКЦИИ ТЕПЛА В СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКИЙ БАССЕЙН

© 2023 г. Д. А. Яковлева^{a, b, *}, И. Л. Башмачников^{a, b}

^aСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^bНаучный фонд “Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Хансена”,
14-я линия В. О., 7, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: d.iakovleva@spbu.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 27.04.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Более 90% океанического тепла поступает в Северный Ледовитый океан с Норвежским течением. В данной статье исследуются причины изменчивости океанического потока тепла с Норвежским течением (через разрез Свиной в южной части Норвежского моря) за 1993–2019 гг. Для анализа используются данные океанического реанализа GLORYS с пространственной дискретностью $1/12^\circ$. Было показано, что межгодовые колебания океанического потока тепла определяются изменчивостью расхода, который, в свою очередь, связан с изменениями градиента уровня моря через Норвежское течение. Показано, что увеличение расхода Норвежского течения происходит при понижении атмосферного давления над центральной частью Норвежского моря, что усиливает юго-западные ветра вдоль Скандинавского полуострова. Формируемые градиенты уровня моря через Норвежское течение связаны как с экмановским нагоном, так и с ротором поля ветра. Они оказывают существенное влияние на изменчивость расхода Норвежского течения в исследуемой области. Дополнительным фактором является изменчивость стерического градиента уровня моря, который влияет на изменчивость расхода только в период быстрого роста температуры воды Норвежского течения (1995–2005 гг.).

Ключевые слова: разрез Свиной, океанический поток тепла, расход, Норвежское течение, GLORYS

DOI: 10.31857/S0002351523050127, **EDN:** KOSVGB

ВВЕДЕНИЕ

Поток теплых и соленых атлантических вод поступает с Северо-Атлантическим течением в моря Северо-Европейского бассейна через Фареро-Шетландский пролив, где поток формирует восточную и западную ветви Норвежского течения, несущих теплые воды далее в Арктический бассейн. Восточная ветвь преимущественно формируется Шетландской ветвью Северо-Атлантического течения со средним расходом 3–4 Св ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$), а западная ветвь – Северо-Исландским течением Ирмингера со средним расходом менее 1 Св и Фарерской ветвью Северо-Атлантического течения со средним расходом 3–4 Св [Hansen et al., 2008].

В южной части Норвежского моря регулярные океанографические наблюдения проводятся на разрезе Свиной (около 66° с.ш.), который пересекает все три ветви Норвежского течения. Средний расход вод Норвежского течения через разрез

Свиной составляет 7–9 Св [Orvik et al., 2001; Hansen et al., 2008], а если учитывать только атлантические воды – 3–4 Св [Hansen et al., 2015]. Общий расход вод остается практически неизменным вплоть до пролива Фрама, где по данным буйковых станций на 78° с.ш. средний расход составляет 7 Св при 3 Св атлантических вод [Schauer et al., 2004; Beszczynska-Moller et al., 2011]. Атлантические воды на всем протяжении Норвежского течения наблюдаются от поверхности до глубины 400–600 м [Latarius and Quadfasel, 2016]. Однако температура атлантических вод уменьшается по мере их движения на север за счет теплообмена с атмосферой и смешения их с гренландскими холодными водами. Так, атлантические воды на разрезе Свиной выделяют: как воды с соленностью выше 35 и с температурой выше 5°C [Orvik et al., 2001], либо воды с соленностью выше 34.95 и с температурой выше 3°C [Latarius and Quadfasel, 2016], либо только по температуре более 4°C [Hansen et al., 2015]. Атлантические воды в проливе Фрама

выделяют уже по изотерме 2°C [Beszczynska-Moller et al., 2011].

Попытки связать расход через разрез Свиной со значениями основного индекса атмосферной циркуляции в северной Атлантике – Северо-Атлантической осцилляцией (CAO) не показали устойчивой значимой связи. Так, значимая связь наблюдалась с расходом восточной ветви атлантических вод за апрель 1996–февраль 1999 гг., что связывалось с изменчивостью западных ветров, но не за апрель 1995–апрель 1996 гг. [Orvik et al., 2001]. Некоторое усиление скорости восточной ветви Норвежского течения с ростом CAO было обнаружено на композитных картах спутниковой альтиметрии [Raj et al., 2018]. Летние значения расхода через разрез Свиной высоко и значимо коррелировали с индексом CAO за февраль–апрель (0.75) [Mork and Blindheim, 2000], однако причины такой межсезонной связи неясны и потому сама связь представляется сомнительной. Эти результаты свидетельствуют, что CAO, как минимум, является не единственным фактором, которой определяет интенсивность потока атлантических вод на север в этом районе. Другие авторы исследовали связь расхода ветвей Норвежского течения с локальным полем ветра. Так, Orvik и Skagseth [2003] обнаружили высокую корреляцию (0.88) между зонально интегрированным ротором напряжения ветра на 55° с.ш. и расходом восточной ветви Норвежского течения на 62° с.ш., при запаздывании расхода на 15 месяцев. Дальнейшее исследование [Orvik, 2022] показало, что в динамике восточной ветви Норвежского течения основную роль играет положение линии нулевого ротора поля ветра, разделяющее субполярный и субтропический океанические круговороты, в восточной Атлантике. Положение же линии нулевого ротора поля ветра во многом определяется значениями индекса Восточно-Атлантической осцилляции (East Atlantic Pattern – EAP).

Океанический поток тепла атлантических вод, нижняя граница которых определяется изотермой 4°C , в среднем составляет 125 ТВт при базовой температуре 0°C [Hansen et al., 2015], тогда как общий поток океанического тепла при той же базовой температуре составляет примерно 200 ТВт [Лебедев и др., 2019]. Этот поток за 20 лет (с 1993 по 2013 гг.) увеличился примерно на 18%, причем наибольшие изменения произошли между 2003 и 2006 г. [Hansen et al., 2015]. Это связывалось с увеличением температуры вод Фарерского течения, которая с середины 1990-х до начала 2000-х гг. увеличилась на 1°C [Hansen et al., 2015]. После этого поток тепла начал уменьшаться и Orvik [2022] не выявил значимых трендов в океанической адвекции тепла восточной ветвью Норвежского течения за период 1995–2020 гг. Изменчивость интенсивности адвекции тепла восточной ветвью Норвежского течения через разрез Сви-

ной определялась изменчивостью расхода, а не температурой воды.

В целом, по данным буев ARGO, поверхностный слой вод Норвежского и Гренландского морей теплее, по крайней мере, за период 2005–2014 гг., поскольку приток теплых атлантических вод в область Норвежского и Гренландского морей был больше, чем отток [Лебедев и др., 2019]. Существенную роль в перераспределении тепла и увеличении температуры Норвежско-Гренландского региона играет перенос тепла вихрями от восточной ветви Норвежского течения в центральные области Лофотенского бассейна [Bashmachnikov et al., 2023]. Этот поток составляет примерно 30% от суммарного притока тепла в Северо-Европейский бассейн с восточной ветвью Норвежского течения.

Данная работа представляет собой дальнейшее исследование причин межгодовой изменчивости интенсивности адвекции тепла атлантических вод в моря Северо-Европейского бассейна, включая обе ветви Норвежского течения, чего не было сделано в предыдущих исследованиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе используется массив данных глобального океанического реанализа GLO-RYS (Global Ocean Physics Reanalysis) за период 1993–2019 гг. с временной периодичностью и пространственным разрешением – месяц и $1/12^{\circ}$ (<https://marine.copernicus.eu/>). Реанализ GLO-RYS основан на модели NEMO с атмосферным форсингом из базы данных ERA-Interim. Реанализ GLO-RYS ассимилирует спутниковые данные альтиметрии, температуры поверхности океана, концентрации морского льда и натурные данные профилей температуры и солёности.

В этой работе рассматривается поток атлантических вод на разрезе 66.5° с.ш. и 4° з.д.– 12.5° в.д. (рис. 1), который находится в непосредственной близости от разреза Свиной, где регулярно проводятся гидрологические съемки. Несмотря на некоторые расхождения в ориентации выбранного разреза относительно разреза, где выполнялись натурные наблюдения, далее мы будем называть используемый нами разрез разрезом Свиной. Атлантические воды выделялись от поверхности моря до изопикны 27.8 кг м^{-3} [Vesman et al., 2023]. Глубина залегания изопикны 27.8 кг м^{-3} вдоль разреза увеличивается от примерно 100 м в западной части разреза до 400 м в восточной (рис. 2).

Расход (WT) через разрез был получен по формуле:

$$WT = \iint Vdzdx, \quad (1)$$

где V – меридиональная составляющая скорости течения, dz – толщина слоя (м), dx – расстояние вдоль разреза (м).

Формула для расчета интегрированного океанического потока тепла (OHF , ТВт) через разрез:

$$OHF = \iint \rho_0 C_p (T - T_{ref}) V dz dx, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность морской воды (1027 кг/м³), C_p – удельная теплоемкость морской воды (3900 Дж/кг °С), T – температура воды (°С), T_{ref} – базовая температура морской воды. T_{ref} была взята как температура замерзания морской воды (−1.8°С).

Изменение градиентов уровня моря поперек Норвежского течения, вызванных изменчивостью полей ветра и давления, оказывает воздействие на усиление/ослабление течений. Давление на уровне моря и скорость ветра были получены по базе данных атмосферного реанализа ERA-5 (<https://climate.copernicus.eu/>) за период 1993–2019 гг. с дискретностью один месяц. Реанализ ERA-5 имеет пространственное разрешение 0.25°. Он основан на Integrated Forecasting System (IFS) Cy41r2, которая была введена в 2016 г. [Dee et al., 2011]. По полю ветра рассчитывается межгодовая изменчивость нагона и относительной завихренности в районе исследования.

Вертикальная скорость, формирующаяся вследствие прибрежного нагона экмановскими потоками (w_1 , м/с), оценивалась как:

$$w_1 = \frac{\tau_t}{\rho_0 f L}, \quad (3)$$

где τ_t – тангенциальное напряжение ветра вдоль берега (кг/м с²), f – параметр Кориолиса (с^{−1}), L – расстояние от точки сетки до берега (м).

Вертикальная скорость, формирующаяся относительной завихренностью поля ветра (w_2 , м/с), оценивалась как:

$$w_2 = -\frac{1}{\rho_0 f} rot(\tau), \quad (4)$$

где τ – тангенциальное напряжение ветра.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным массива GLORYS выделяются все три известные ветви Норвежского течения (рис. 2а), западная (вдоль субполярного фронта), восточная (захваченная кромкой шельфа) и прибрежная (вдоль берега). Первые две ветви приносят атлантические воды Северо-Атлантического течения, а последняя – шельфовые воды Северного моря. Максимальные скорости западной и восточной ветвей составляют до 10 см/с. В данной работе слой атлантических вод был выделен по потенци-

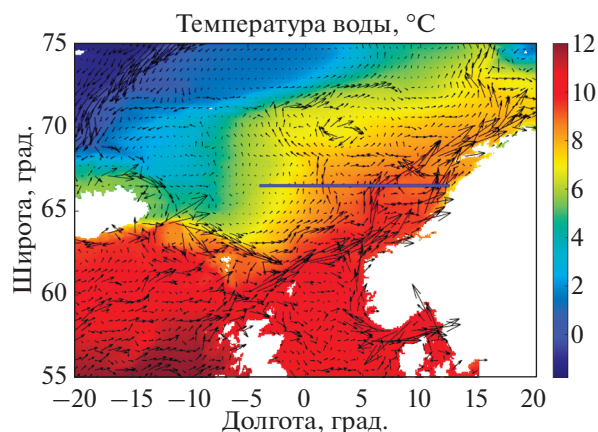


Рис. 1. Пространственное распределение температуры воды (°С) и векторов течений на поверхности моря, осредненные за период 1993–2019 гг. по данным GLORYS. Синей линией показан разрез Свиной (66.5° с.ш. и 4° з.д. – 12.5° в.д.).

альной температуре не менее 4°С, что соответствует изопикне 27.8 кг/м³ (рис. 2б) и значениям солёности 35.0–35.2 (рис. 2в). Прибрежная ветвь существенно распреснена (солёность 33.4), что связано с влиянием вод Балтийского моря и речного стока со Скандинавского полуострова.

Результаты анализа по массиву GLORYS показали, что, за период 1993–2019 гг. расход атлантических вод через выбранный разрез (рис. 1) колебался между 6.5–7.5 Св, не показывая значимого тренда (рис. 3). Температура воды в среднем составляла 7.3°С. Она выросла с 1995 по 2003 гг. примерно на 1°С, после чего стабилизировалась на этом уровне (рис. 3а). В согласии с натурными наблюдениями [Orvik, 2022], по данным массива GLORYS океаническая адвекция тепла обеих ветвей Норвежского течения на разрезе Свиной определялась изменчивостью расхода воды (корреляция 0.90), но имела небольшой тренд к повышению. Последний определял низкую (но значимую) корреляцию с временной изменчивостью средней по разрезу температурой воды (0.39). Средние за период значения океанической адвекции тепла составляли 242 ТВт. Относительно высокие значения связаны со взятой нами $T_{ref} = -1.8^\circ\text{C}$. При $T_{ref} = 0^\circ\text{C}$ океанический поток тепла через разрез Свиной в среднем равен 193 ТВт, что соответствует оценкам [Лебедев и др., 2019].

В связи с определяющим влиянием расхода воды на адвекцию тепла (уже выявленное ранее [Orvik, 2022]), далее нами исследовались причины изменчивости расхода. Оказалось, что изменчивость расхода почти полностью определяется изменчивостью градиента уровня моря через Норвежское течение (рис. 3б), что отражается в высоких значениях коэффициента корреляции градиента

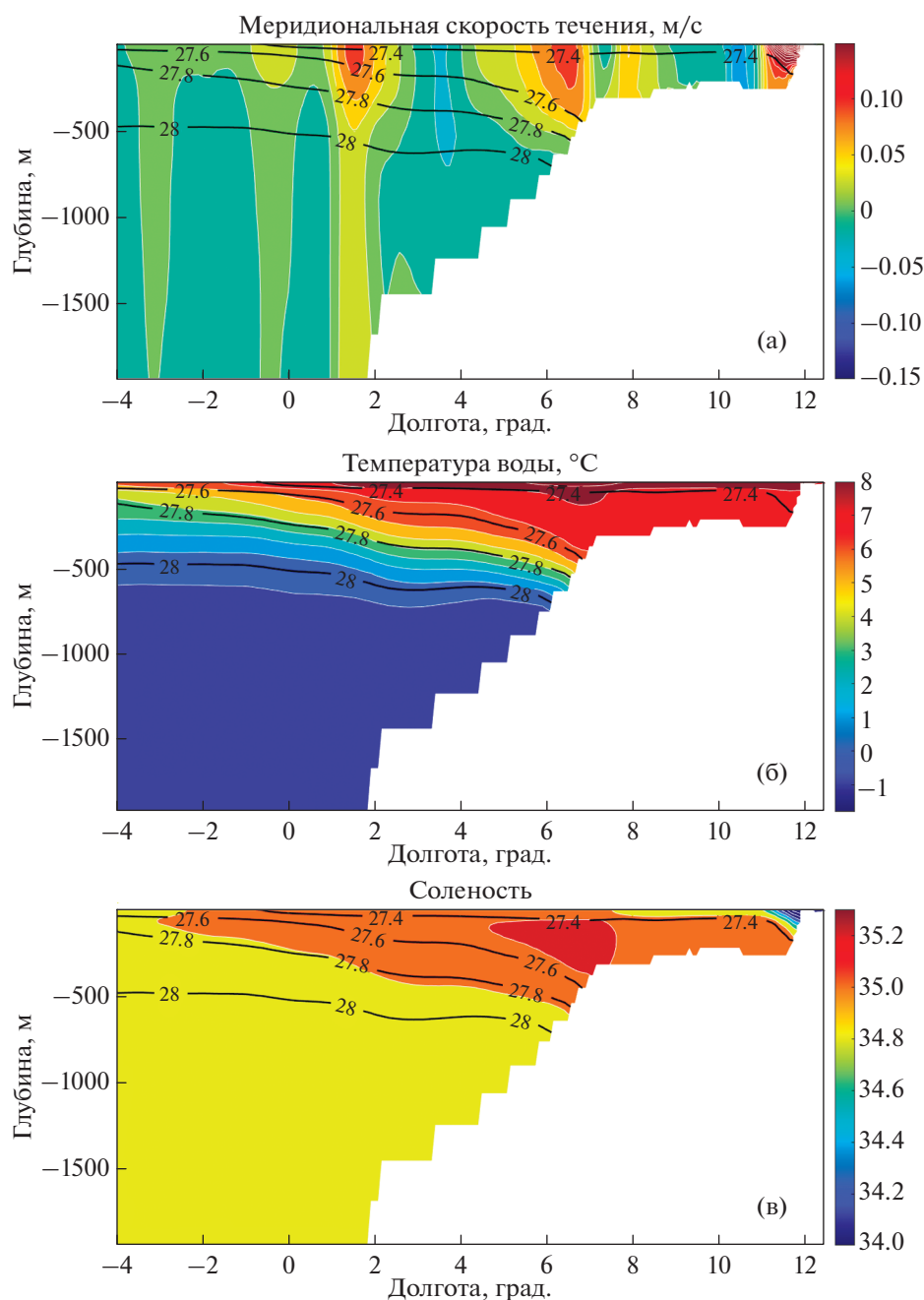


Рис. 2. а – меридиональная составляющая скорости течения (м/с); б – температура воды (°C); в – соленость воды вдоль разреза Свиной по данным GLORYS. Характеристики осреднены за период 1993–2019 гг. На рис. 2б, 2в черными линиями показаны изопикны потенциальной плотности (кг м^{-3}).

уровня моря с расходом воды (0.82), а также с океаническим потоком тепла (0.64). Это позволяет предположить, что расход (и океаническая адвекция тепла) на разрезе Свиной определяется полем ветра, который обычно и формирует градиенты уровня моря.

В связи с вышесказанным были рассчитаны корреляции среднегодовой адвекции океанического потока тепла атлантических вод с индекса-

ми атмосферной циркуляции, определяющих основные моды изменчивости полей атмосферного давления в Северной Атлантике и прилегающих регионах, а также с океаническими индексами АМОЦ и АМО (табл. 1). Результаты не позволили выявить высокой значимой связи ни с одним из индексов. Ранее низкая корреляция скорости Норвежского течения с индексом САО (0.36) была получена по среднемесячным значениям за пе-

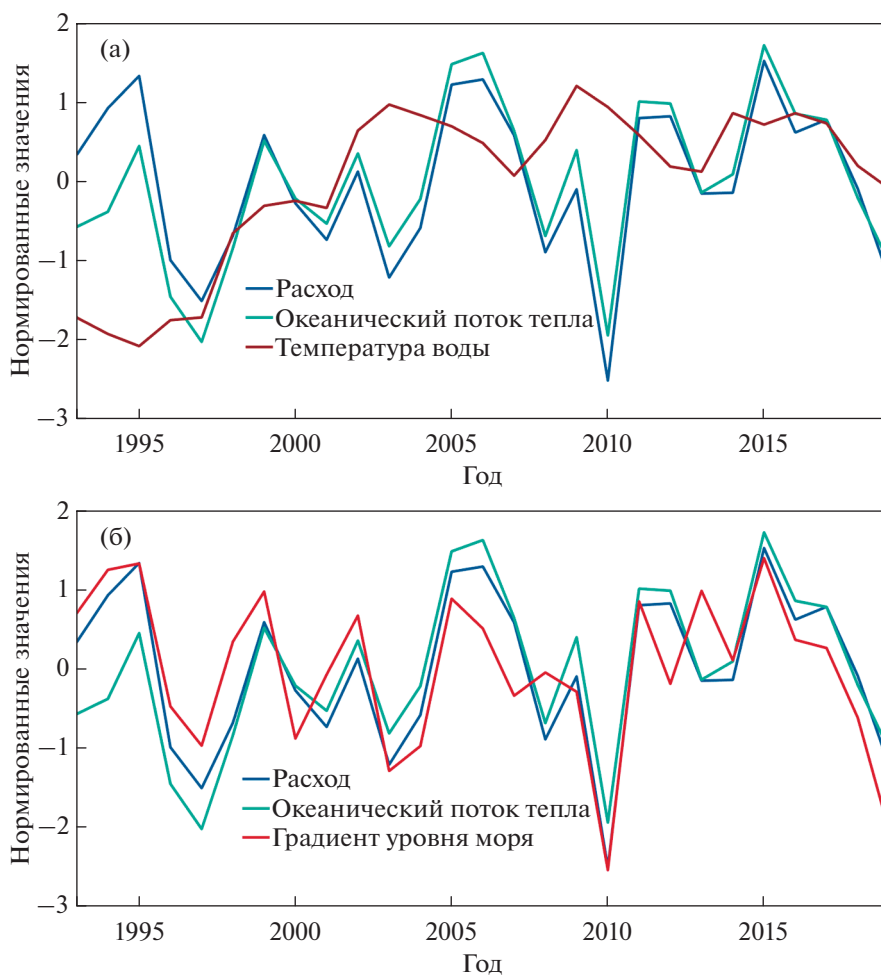


Рис. 3. Межгодовая изменчивость среднегодовых нормированных значений через разрез Свиной за период 1993–2019 гг.: а – расхода (синяя линия), океанического потока тепла (зеленая линия) и температуры воды (красная линия) атлантических вод; б – расхода, океанического потока тепла и градиента уровня моря.

риод 1995–1999 гг. [Skagseth, 2004]. В связи с тем, что использованные индексы отражают основные моды крупномасштабной изменчивости поля атмосферного давления (таких крупных регионов, как всей или значительной части Северной Атлантики или СЛО), мы можем предположить существенную роль региональной составляющей

поля атмосферного давления в межгодовой изменчивости интенсивности адвекции тепла Норвежским течением.

Композитные карты полей давления и ветра в годы наибольших и наименьших значений расхода воды на разрезе Свиной показали, что в годы наибольших расходов через разрез Свиной (1995,

Таблица 1. Корреляции океанической адвекции тепла атлантических вод, расхода воды через разрез Свиной и градиента уровня моря вдоль разреза Свиной с основными атмосферными индексами за период 1993–2019 гг. Жирным шрифтом выделены значимые корреляции. EAP – East Atlantic Pattern (Восточно-Атлантическая осцилляция), TNH – Tropical/Northern Hemisphere Pattern, АМОЦ – Атлантическая меридиональная океаническая циркуляция, АМО – Атлантическая мультideкадная осцилляция, EAWRP – East Atlantic/Western Russia Pattern, NAO – North Atlantic Oscillation (или CAO), PEP – Polar/Eurasia Pattern, SP – Scandinavian Pattern. Все индексы осреднены за январь–март, кроме АМОЦ и АМО, которые осреднены за год. Уровень значимости = 0.38

	EAP	TNH	АМОЦ	АМО	EAWRP	NAO	PEP	SP
Адвекция тепла	-0.21	0.22	0.00	0.43 (АМО опережает на 1 год)	-0.07	0.26	-0.18	-0.15
Расход воды	-0.28	0.16	-0.25	-0.08	-0.05	0.44	-0.04	-0.21
Градиент уровня моря	-0.11	0.03	-0.30	-0.22	-0.07	0.33	0.05	-0.15

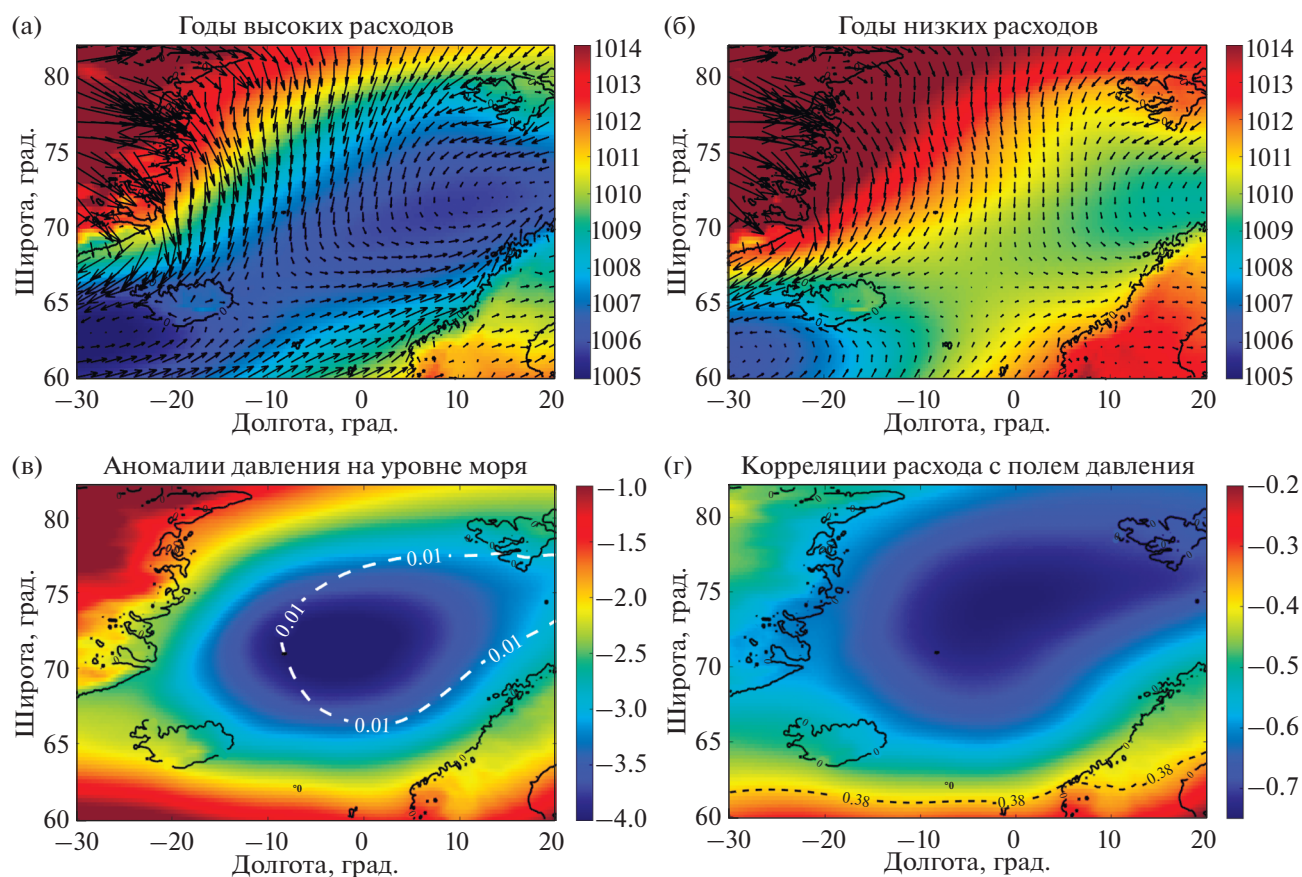


Рис. 4. а — среднее поле давления на уровне моря (гПа) и направление ветра в годы наибольших расходов на разрезе Свиной (1995, 2005, 2006, 2015 годы); б — среднее поле давления на уровне моря (гПа) и направление ветра в годы наименьших расходов на разрезе Свиной (1996, 1997, 2003, 2010, 2019 годы); в — аномалии давления на уровне моря (получены как разность среднего давления в годы наибольших расходов и в годы наименьших расходов на разрезе Свиной); в области внутри петли, очерченной белым пунктиром, различия давления значимы при уровне значимости $\geq 99\%$ (p -значение ≤ 0.01); г — корреляции расхода через разрез Свиной с полем давления на уровне моря при среднегодовом осреднении (пунктирной линией отмечен уровень значимости 0.38).

2005, 2006, 2015 годы) углубляется Исландский минимум и область низкого давления вытягивается на северо-восток через все Норвежское море (рис. 4а). При этом увеличиваются градиенты давления в районе разреза Свиной и усиливается юго-западный ветер. Это увеличивает прибрежный нагон, а также региональные значения ротора поля ветра. В годы наименьших расходов через разрез Свиной (1996, 1997, 2003, 2010 годы) отрицательная аномалия атмосферного давления в области Исландского минимума и Норвежского моря, а также сила ветра в районе исследования, наоборот, ослабевают (рис. 4б). Наиболее выраженная изменчивость аномалий атмосферного давления формируется над Норвежским морем, которая лишь опосредованно связана с индексом САО (рис. 4в). Для выявления значимости полученных аномалий, для рядов среднегодовых значений давления в годы высоких и в годы низких расходов на разрезе Свиной был проведен дисперсионный анализ (ANOVA). Анализ показал, что в цен-

тральной области наиболее интенсивных аномалий атмосферного давления в центральной части Норвежского моря, различия давления в годы высоких и низких потоков на разрезе Свиной статистически значимы при уровне значимости ($\geq 99\%$, т.е. p -статистики ≤ 0.01). Дополнительно были также рассчитаны корреляции изменчивости расхода через разрез Свиной с изменчивостью атмосферного давления на уровне моря в каждой точке района исследования (рис. 4г). Наиболее сильные отрицательные корреляции около -0.7 (существенно выше уровня значимости) очерчивают примерно ту же область центральной части Норвежского моря, что на рис. 4в.

Корреляции расхода Норвежского течения с полем атмосферного давления в зоне Исландского минимума, который является одним из центров действия атмосферы для расчета индексов САО и ЕАР, ослабевают в 1.5–2 раза. Это и является причиной низкой корреляции градиента

уровня моря (и расхода воды) с этими атмосферными индексами (табл. 1).

Поле ветра формирует градиенты уровня моря через конвергенцию (дивергенцию) экмановских потоков, которые проявляются как в виде прибрежного нагона, так и за счет локального ротора поля ветра. Рассчитанный по формуле (3) нагон быстро убывает с расстоянием от берега, но даже над восточной ветвью Норвежского течения, на расстоянии 250 км от берега, создаваемые им вертикальные скорости сравнимы с вертикальными скоростями под действием ротора поля ветра. Градиенты вертикальной скорости поверхности моря вдоль разреза Свиной, которые и вызывают изменчивость уровня моря, для нагона и ротора поля ветра (рис. 5а) значимо и положительно коррелируют между собой, хотя коэффициент корреляции невелик (0.41). В межгодовой изменчивости градиента уровня моря вдоль разреза доминирует влияние нагона. Среднее значение градиента вертикальной скорости, как следствия нагона, составляет 3.3×10^{-12} , а среднее значение градиента вертикальной скорости, возникающей под влиянием воздействием ротора поля ветра, составляет 1.6×10^{-12} . Корреляция наблюдаемого градиента уровня моря с интенсивностью нагона значима и положительна, хотя и невелика (0.46). С градиентом уровня, формируемым ротором поля ветра, аналогичная корреляция также положительна, но не превышает уровня значимости (0.30). Корреляции межгодовой изменчивости расхода и океанического потока тепла с изменчивостью градиента уровня, формируемого нагоном, тоже значимы и положительны, и составляют 0.54 и 0.46, соответственно. Корреляции межгодовой изменчивости расхода и океанического потока тепла с изменчивостью градиента уровня, связанного с ротором поля ветра, незначимы (0.38 и 0.36, соответственно). Совместный учет градиента ротора поля ветра и нагона несколько повышают корреляции как с расходом (0.57), так и с океаническим потоком тепла (0.50).

Градиент уровня моря через Норвежское течение имел схожую межгодовую изменчивость и с градиентом стерических колебаний, рассчитанных для слоя 0–500 м (рис. 5б). Среднее значение градиента уровня моря вдоль разреза составлял 6×10^{-7} м, а градиент стерических колебаний — -1×10^{-7} м. Корреляция между ними значимая положительная 0.57. Нужно отметить, что наибольшая связь (0.82) градиента стерических колебаний с градиентом уровня моря прослеживается между 1995 и 2006 гг., когда среднегодовая температура вод Норвежского течения монотонно росла (рис. 3а). Значимых связей градиента стерических колебаний с расходом или с океаническим потоком тепла обнаружено не было.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе проведен анализ причин межгодовой изменчивости океанической адвекции теплых атлантических вод через разрез Свиной (66.5° с.ш., 4° з.д. — 12.5° в.д.) на основе данных океанического реанализа GLORYS за период 1993–2019 гг. Разрез Свиной был выбран в связи с хорошей обеспеченностью данными натуральных наблюдений, ассимилируемых реанализом GLORYS.

Было выявлено, что изменчивость океанической адвекции тепла, в первую очередь, связана с изменчивостью расхода воды через разрез (корреляция 0.9), а не с температурой воды (корреляция 0.4). [Tsubouchi et al., 2021], анализируя область истоков Норвежского течения, утверждают, что увеличение потока атлантических вод связано со скоростью течения за период 1998–2002 гг., а за 2000–2004 гг. связаны с увеличением температуры воды. За исследуемый нами период 1993–2019 гг. температура воды на разрезе Свиной имела выраженную тенденцию к росту с 1995 по 2005 гг., но даже в этот период не определяла характера межгодовой изменчивости потока тепла через разрез. Такое различие с результатами [Tsubouchi et al., 2021] может быть связано с расположением исследуемых авторами разрезов на несколько градусов южнее нашего региона. Довольно быстрое падение когерентности изменчивости потоков тепла на различных разрезах вдоль Норвежского и Западно-Шпицбергенского течений было выявлено [Vesman et al., 2023]. Вместе с тем мы допускаем смену доминирующих механизмов изменчивости потока тепла на разных временных масштабах. Так, на примере Нордкапского течения, ранее было показано, что с увеличением временного масштаба осреднения роль расхода в изменчивости потока тепла уменьшается, а роль изменчивости температуры воды, наоборот, увеличивается [Башмачников и др. 2018].

Ранее была проанализирована изменчивость температуры верхнего слоя океана в связи с изменчивостью Атлантической меридиональной океанической циркуляции (АМОЦ) [Яковлева и др. 2023]. Было показано, что на меж-десятилетних масштабах изменчивости усиление АМОЦ ведет к увеличению температуры воды в юго-восточной части Норвежского моря. Действительно, с 1995 по 2005 гг., рост температуры воды на разрезе Свиной согласуется с ростом интенсивности АМОЦ [Chen and Tung, 2018; Кузнецова и Башмачников, 2021]. Однако в период с 2005 по 2015 гг., когда интенсивность АМОЦ уменьшалась, температура воды на разрезе Свиной не падала, а даже немного росла (рис. 3а). Это свидетельствует о важности региональных факторов не только в изменчивости расхода, но и температуры атлантических вод Норвежского течения.

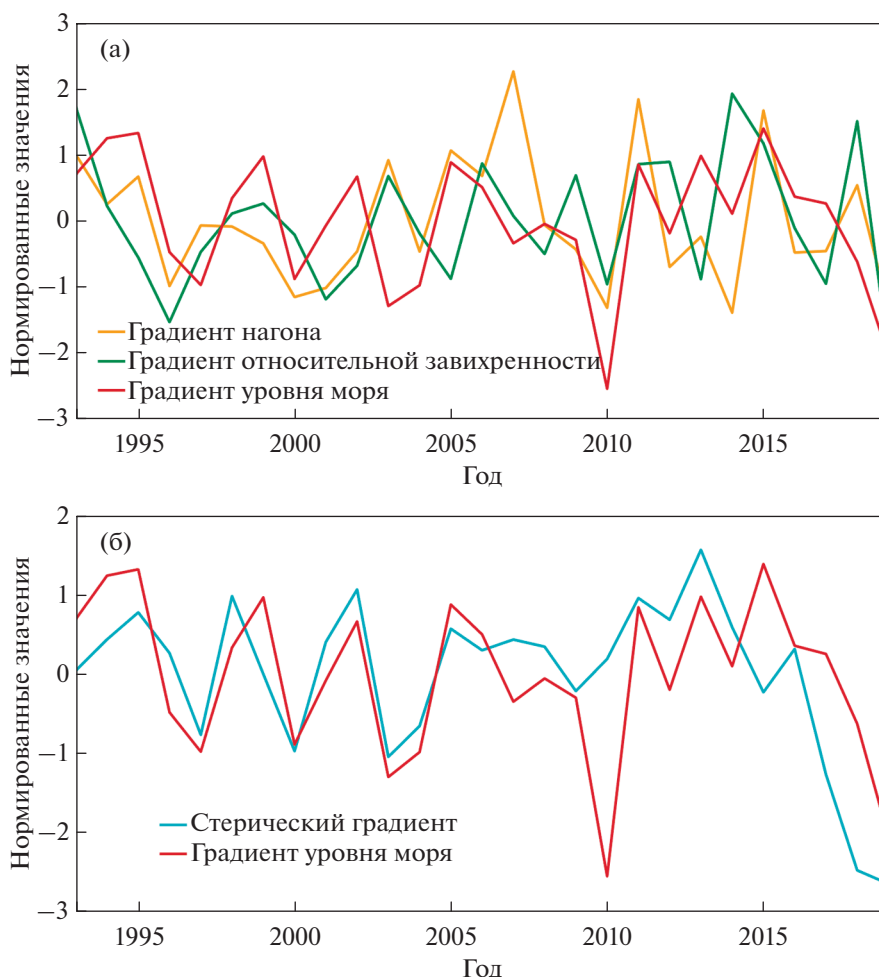


Рис. 5. Межгодовая изменчивость среднегодовых нормированных значений градиента уровня моря на разрезе Свиной за 1993–2019 гг. (красным) и (а) – градиента уровня моря, связанного с нагоном (желтым), градиента уровня моря, связанного с относительной завихренностью поля ветра (зеленым); и (б) – градиента стерической составляющей уровня моря (голубым).

Детали механизма изменчивости расхода через регулирование градиентов уровня моря региональным атмосферным воздействием исследованы нами впервые. Корреляция межгодовой изменчивости градиента уровня моря вдоль разреза с расходом составляет 0.82, а с океанической адвекцией тепла – 0.64. Было показано, что увеличение расхода через разрез Свиной связано с выраженной отрицательной аномалией атмосферного давления над центральной частью Норвежского моря. Эта аномалия слабо связана с САО, что определяет малые коэффициенты корреляции расхода и САО. Это отличает исследуемый регион от района южнее, где корреляции расхода течения с САО более выражены [Raj et al., 2018; Tsubouchi et al., 2021].

Формирование отрицательной аномалии давления над Норвежским морем приводит к усилению юго-западного ветра вдоль всего Скандинавского полуострова, что способствует нагону и увеличению градиентов уровня моря. Это пока-

зывает, что полученные результаты для разреза Свиной будут определять изменчивость восточной (но не западной) ветви Норвежского течения вдоль всего Скандинавского полуострова. Севернее, к западу от Шпицбергена, выявленная атмосферная аномалия уже не приводит к усилению геострофической составляющей Западно-Шпицбергенского течения, что, вероятно, и является одной из причин снижения коэффициентов корреляции между потоками океанического тепла к западу от Скандинавского полуострова и к западу от Шпицбергена до незначимых [Vesman et al., 2023].

ВЫВОДЫ

На основе проведенного анализа, можно сделать следующие выводы.

Межгодовая изменчивость адвективного потока тепла на разрезе Свиной полностью определяется расходом. Эту связь, однако, не следует автоматически экстраполировать на меж-десятилет-

ную изменчивость, которая требует отдельного изучения.

Расход на разрезе Свиной определяется градиентом уровня моря, который формируется, прежде всего, экмановским нагоном. Корреляция изменчивости градиента уровня моря, вызванного совместной изменчивостью величины нагона и локального ротора поля ветра, значимо коррелирует с расходом (0.57) и с океаническим потоком тепла (0.50).

В период роста средней температуры Норвежского течения (с 1995 по 2005 гг.) важную роль в формировании межгодовой изменчивости уровня моря через Норвежское течение может также играть межгодовая изменчивость стерического градиента уровня моря.

Выявленная аномалия поля атмосферного давления в центральной части Норвежского моря, приводящая к росту расхода на разрезе Свиной, будет оказывать влияние и на расход восточной ветви Норвежского течения вдоль всего Скандинавского полуострова, но не на дальнейшую адвекцию тепла на север вдоль Западно-Шпицбергенского течения.

Работа выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.2251.21.0006 (идентификатор RF-225121X0006, соглашение № 075-10-2021-104 в информационной системе “Электронный бюджет” РФ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башмачников И.Л., Юрова А.Ю., Бобылев Л.П., Весман А.В.* Сезонная и межгодовая изменчивость потоков тепла в районе Баренцева моря // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 1–11.
- Кузнецова Д.А., Башмачников И.Л.* О механизмах изменчивости Атлантической меридиональной океанической циркуляции (АМОЦ) // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 843–855.
<https://doi.org/10.31857/S0030157421060071>
- Лебедев К.В., Филюшкин Б.Н., Кожелупова Н.Г.* Водобмен Полярных морей с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами на основе наблюдений Арго // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 2. С. 183–197.
- Яковлева Д.А., Башмачников И.Л., Кузнецова Д.А.* Влияние Атлантической меридиональной океанической циркуляции на температуру верхнего слоя Северной Атлантики и атлантического сектора Северного Ледовитого океана // Океанология. 2023. Т. 63. № 2. С. 173–181.
- Bashmachnikov I.L., Raj R.P., Golubkin P., Kozlov I.E.* Heat transport by mesoscale eddies in the Norwegian and Greenland seas // J. Geophysical Research: Oceans. 2023. P. e2022JC018987.
<https://doi.org/10.1029/2022JC018987>
- Beszczynska-Moller A., Woodgate R.A., Lee C. et al.* A synthesis of exchanges through the main oceanic gateways to the Arctic Ocean // Oceanography. 2011. V. 24. № 3. P. 82–99.
- Chen X., Tung K.K.* Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation // Nature. 2018. V. 559. № 7714. P. 387–391.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly J. royal meteorological society. 2011. V. 137. № 656. P. 553–597.
- Hansen B., Østerhus S., Turrell W.R. et al.* The inflow of Atlantic water, heat, and salt to the nordic seas across the Greenland–Scotland ridge // Arctic–subarctic ocean fluxes: Defining the role of the northern seas in climate. 2008. P. 15–43.
- Hansen B., Larsen K.M.H., Hátún H. et al.* Transport of volume, heat, and salt towards the Arctic in the Faroe Current 1993–2013 // Ocean Science. 2015. V. 11. № 5. P. 743–757.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049.
- Latarius K., Quadfasel D.* Water mass transformation in the deep basins of the Nordic Seas: Analyses of heat and freshwater budgets // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2016. V. 114. P. 23–42.
- Mork K.A., Blindheim J.* Variations in the Atlantic inflow to the Nordic Seas, 1955–1996 // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2000. V. 47. № 6. P. 1035–1057.
- Orvik K.A.* Long-Term Moored Current and Temperature Measurements of the Atlantic Inflow Into the Nordic Seas in the Norwegian Atlantic Current; 1995–2020 // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49. № 3. P. e2021GL096427.
- Orvik K.A., Skagseth Ø.* The impact of the wind stress curl in the North Atlantic on the Atlantic inflow to the Norwegian Sea toward the Arctic // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. № 17.
- Orvik K.A., Skagseth Ø., Mork M.* Atlantic inflow to the Nordic Seas: current structure and volume fluxes from moored current meters, VM-ADCP and SeaSoar-CTD observations, 1995–1999 // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2001. V. 48. № 4. P. 937–957.
- Raj R.P., Nilsen J.Ø., Johannessen J.A. et al.* Quantifying Atlantic Water transport to the Nordic Seas by remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 216. P. 758–769.
- Schauer U, Fahrbach E., Osterhus S., Rohardt G.* Arctic warming through the Fram Strait: Oceanic heat transport from 3 years of measurements // J. Geophysical Research: Oceans. 2004. V. 109. № C6.
- Skagseth Ø.* Monthly to annual variability of the Norwegian Atlantic slope current: Connection between the northern North Atlantic and the Norwegian Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2004. V. 51. № 3. P. 349–366.
- Tsubouchi T., Våge K., Hansen B. et al.* Increased ocean heat transport into the Nordic Seas and Arctic Ocean over the period 1993–2016 // Nature Climate Change. 2021. V. 11. № 1. P. 21–26.
- Vesman A.V., Bashmachnikov I.L., Golubkin P.A., Raj R.P.* The coherence of the oceanic heat transport through the Nordic seas: oceanic heat budget and interannual variability // Russian J. Earth Sciences. 2023. P. 1–24.

The role of Regional Atmospheric Circulation in Interannual Variability of the Ocean Heat Advection in the Nordic Seas

D. A. Iakovleva^{1, 2, *} and I. L. Bashmachnikov^{1, 2}

¹St. Petersburg State University, SPbSU, Universitetskaya nab., 7/9, St. Petersburg, 199034 Russian

²Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, 14 Line Vasilievsky Island, 7, St. Petersburg, 199034 Russia

*e-mail: d.iakovleva@spbu.ru

More than 90% of oceanic heat enters the Arctic Ocean with the Norwegian Current. In this paper we examine the mechanisms of variability of the oceanic heat flux in the Norwegian Current (across the Svinoy section in the southern Norwegian Sea) in 1993–2019. GLORYS oceanic reanalysis with a spatial resolution of $1/12^\circ$ is used. It is found that the variability of oceanic heat flux is associated with that of water transport, which, in turn, is associated with variability of the sea level gradient across the Norwegian Current. It is shown that an increase in water transport of the Norwegian Current is a result of a decrease of the atmospheric pressure over the central part of the Norwegian Sea. The latter intensifies the southwesterly winds along the Scandinavian Peninsula. The sea level gradients across the Norwegian Current, formed by the winds, are primarily associated with Ekman pumping towards the coast, as well as with the wind stress curl. Both have a significant impact on the variability of water transport through the section. Another factor is variability of the steric sea level gradient, which significantly affects the water transport during the period of a rapid temperature rise of in the Norwegian Current (1995–2005).

Keywords: Svinoy section, oceanic heat flux, discharge, Norwegian Current, GLORYS