

УДК 912:656.6.08

А. В. Холопцев^{1,2}

С. А. Подпорин¹

Л. Е. Курочкин¹

Арктические вторжения и риски возникновения штормов в морях, окружающих побережья Европы

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

²Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

e-mail: kholoptsev@mail.ru, SAPodporin@sevsu.ru,
l.kurochkin.mj@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние продолжительности вторжений арктического воздуха, проходящих над акваторией Датского пролива, на состояние Североатлантического колебания, фаза которого определяет расположение траекторий движения циклонов, зарождающихся на Северном субполярном гидрологическом фронте Атлантического океана. Показана возможность использования результатов наблюдений за подобными процессами для целей среднесрочного прогнозирования рисков возникновения штормов в морях, омывающих побережья Европы.

Ключевые слова: Северная Атлантика, Европа, вторжения арктического воздуха, Североатлантическое колебание, шторм, прогнозирование, безопасность судоходства

Введение

Штормы относятся к числу гидрометеорологических явлений, представляющих наибольшую опасность для судоходства в любых регионах Мирового океана. Поэтому совершенствование методик их среднесрочного прогнозирования представляет собой актуальную проблему не только гидрометеорологии и океанографии, но и эксплуатации морского транспорта.

Наибольший интерес решение рассматриваемой проблемы представляет для районов Мирового океана, по которым проходят основные пути движения судов. Одним из таких районов является Евроатлантический регион, в состав которого входят Северная часть Атлантического океана, моря, омывающие Европу, а также моря западного сектора Арктики.

Согласно современным представлениям о причинах возникновения штормов в Евроатлантическом регионе, к числу главных относится движение через него циклонов, которые зарождаются на Северном субполярном гидрологическом фронте (ССГФ) Атлантики [1–12]. Образующиеся здесь циклоны перемещаются преимущественно в восточном направлении, отклоняясь либо к северу, либо к югу. Вследствие этого, штормы могут возникать не только на Балтике, в Северном море и в Бискайском заливе, но и в Норвежском и Баренцевом морях, а также в Средиземноморье. Направление, в котором движется циклон, определяется соответствующей периоду его существования фазой Североатлантического колебания (далее — САК).

САК представляет собой крупномасштабный колебательный процесс в системе «океан — атмосфера», который проявляется в изменениях разности

атмосферных давлений (АД) в Азорском максимуме и Исландском минимуме [8]. В его положительной фазе движущиеся в сторону Европы циклоны отклоняются к северу, а в отрицательной фазе — к югу.

Состояние САК характеризуется значением его индекса, который первоначально вычислялся как разность нормированных аномалий приземного АД на станциях Пунта Дельгада (Азорские острова) и Акурейри (Исландия) [10]. В работе [13] значения индекса САК предложено определять по результатам измерений того же показателя на станциях Лиссабон и Стиккисхоульмур (Исландия). В работе [14] рекомендовано индекс САК рассчитывать, основываясь на разложении по эмпирическим ортогональным функциям полей аномалий абсолютных высот геопотенциала 700 гПа над Северной Атлантикой. Вычисленные с использованием «повернутых» эмпирических ортогональных функций методом Варимакс-вращения значения данного индекса представлены в [15]. С 2005 г. значения САК рассчитываются относительно базового периода 1981–2010 гг. по полям нормированных аномалий абсолютной высоты геопотенциала 500 гПа [1].

АД на любом участке земной поверхности определяется вертикальным распределением над ним удельного веса воздуха, который зависит, в основном, от его температуры и абсолютной влажности [16]. Следовательно, непосредственными причинами вариаций индекса САК являются изменения балансов тепла и водяного пара в воздухе над районами Исландского минимума и Азорского максимума.

Подобные изменения могут быть возникать как в результате вертикального обмена теплом и влагой между соответствующими океаническими акваториями и атмосферой, так и вследствие адвекции воздуха с разным содержанием тепла и (или) влаги. Основной причиной такой адвекции являются меридиональные смещения участков ССГФ, над которыми формируется Исландский минимум [1, 3, 8].

Связь изменений индекса САК установлена также и с другими мощными процессами, в частности, с Эль Ниньо [4, 17] и Тихоокеанским-североамериканским колебанием [1, 18, 19]. Кроме того, доказано, что значимое влияние на изменения фазы САК оказывают обрушения атмосферных планетарных волн [20–23].

Одной из причин адвекции холодного и плотного воздуха в область Исландского минимума является прохождение через нее вторжений арктического воздуха (далее — ВАВ), которые представляют собой быстрые воздушные течения с северных румбов, достигающие периферии Азорского максимума [24]. ВАВ образуется при сближении входящего в высокие широты циклона с встречающимся на его пути сегментом Арктического антициклона. Следствием такого сближения является существенное обострение барического градиента в области, разделяющей эти атмосферные вихри [25], что служит непосредственной причиной усиления в ней северного ветра [26].

Арктический воздух, доставляемый ВАВ в регионы средних широт, как правило, входит в состав образующихся в них блокирующих антициклонов [27–29]. Если ВАВ проходит над акваторией Датского пролива, участвующий в нем воздух может поступать и в зону Исландского минимума, повышая в нем АД. Так как ВАВ представляет собой сильный ветер, в период его действия в Датском проливе усиливается Восточно-Гренландское течение, которое доставляет в

Северную Атлантику холодную воду Гренландского моря. Последнее способно привести к смещению на юг соответствующего участка ССГФ, что, в свою очередь, также вызывает повышение АД в зоне Исландского минимума.

Таким образом, ВАВ, проходящие над Датским проливом, можно отнести к числу процессов, способных в некоторой степени снижать индекс САК. Вопрос «Являются ли возникающие таким образом снижения индекса САК значимыми, и при каких условиях последнее имеет место?» до настоящего времени остается без однозначного ответа. Следовательно, может быть выдвинута гипотеза, согласно которой ВАВ, пересекающие Датский пролив, могут приводить к значимому снижению индекса САК.

О возможности существования связи между САК и ВАВ свидетельствуют выводы работы [27]. Тем не менее, условия, при которых ВАВ вызывают значимое снижение индекса САК, ранее выявлены не были.

Перемещение атлантических циклонов от места их зарождения в моря у северных или южных побережий Европы занимает, как правило, больше недели. Подтверждение адекватности выдвинутой гипотезы позволило бы использовать результаты метеорологических наблюдений за процессами образования ВАВ над Датским проливом для целей среднесрочного прогнозирования штормов в этих морях. Таким образом, выявление условий, при которых данная гипотеза адекватна, представляет не только теоретический, но и существенный практический интерес.

Целью настоящей работы является проверка гипотезы о связи индекса Североатлантического колебания с вторжениями арктического воздуха, а также выявление условий, при которых перемещение таких вторжений над областью Датского пролива способно приводить к значимому снижению индекса САК.

Материалы и методы

Для достижения указанной цели в качестве фактического материала об изменениях среднесуточных значений индекса САК использованы данные ресурса [30] за период 1.01.1950–31.12.2018 гг.

Для выявления ВАВ применены реанализ ERA-Interim, содержащий данные по среднесуточным значениям меридиональной и зональной составляющих вектора скорости ветра над водной поверхностью [31]. В указанном реанализе информация представлена для всех пунктов земной поверхности, расположенных в узлах координатной сетки с шагом $0,7 \times 0,7^\circ$, за период с 1.01.1979 по 31.12.2018 гг. Данные реанализа позволили выявить все даты указанного периода, в которые существовали воздушные течения северных румбов, пересекавшие тот или иной участок ССГФ и достигавшие периферии Азорского максимума.

В качестве источника данных о распределении температур поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике применен реанализ NOAA среднемесячных значений этих характеристик [32], содержащий информацию для каждого узла координатной сетки с шагом $1 \times 1^\circ$ за период с января 1982 г. по настоящее время.

Для достижения поставленной в работе цели были решены следующие задачи:

- оценка адекватности выдвинутой гипотезы;
- определение условий, при которых ВАВ, проходящие над Датским проливом, способны приводить к снижению индекса САК.

При решении рассматриваемых задач акватория Северной Атлантики между меридианами 0 и 60° з. д. была разбита на секторы с долготным интервалом 2,5° С использованием реанализа ERA-Interim для каждого сектора определены даты, в которые наблюдались признаки ВАВ. Для всех обнаруженных ВАВ определены периоды их существования, оценена продолжительность. Далее определялась частота, с которой снижение среднесуточных значений индекса САК происходило одновременно с выявленным ВАВ с учетом продолжительности последнего. Подобные исследования выполнены для ВАВ продолжительностью до 14 суток.

Очевидно, что, если рассматриваемая гипотеза была бы неверна, то случаи, когда индекс САК снижался и увеличивался во время обнаружения ВАВ, происходили бы с одинаковой частотой. Поэтому при решении первой задачи достаточно было убедиться в том, что при арктических вторжениях определенной продолжительности, происходящих над Датским проливом, фактическое значение частоты, с которой в это же время происходит снижение индекса САК, способно значительно превышать уровень 0,5.

При решении второй задачи требовалось установить пороговую продолжительность ВАВ, начиная с которой снижение индекса САК возникало значимо чаще, чем его повышение.

При оценке адекватности выдвинутой гипотезы наиболее сложным моментом являлось подтверждение того факта, что связь между ВАВ и САК не является простым совпадением. Для получения такого подтверждения рассматривалось влияние ВАВ на распределение ТПО на выходе из Датского пролива, а также оценивались дополнительные объемы вод Гренландского моря, доставляемые через этот пролив Восточно-Гренландским течением.

Доказать причинный характер подобной связи можно было бы, установив, что вызванное ВАВ увеличение объема вод Гренландского моря, которые доставляются в Атлантику упомянутым течением, является значимым и приводит к возникновению областей с пониженными ТПО в районах океана, прилегающих к южному входу в пролив.

Для подтверждения значимости влияния ВАВ определенной продолжительности на распределения среднемесячных ТПО в зоне ССГФ применен метод корреляционного анализа и критерий Стьюдента [33]. Проанализированы связи межгодовых изменений суммарных продолжительностей (СП) ВАВ по месяцам с вариациями ТПО в интересующем нас районе Северной Атлантики.

Учитывалось, что под влиянием ВАВ может возрастать расход Восточно-Гренландского течения, переносящего воду Гренландского моря в южном направлении. В результате этого должно происходить тем большее снижение среднемесячных ТПО акваторий Атлантики, прилегающих к южному входу в Датский пролив, чем больше продолжительность ВАВ. Корреляция межгодовых изменений СП ВАВ и ТПО должна быть значимой отрицательной.

При выполнении корреляционного анализа в каждом из сопоставляемых рядов были предварительно скомпенсированы линейные тренды. Значимость подобных связей оценивалась с использованием критерия Стьюдента. Решение о том, что связь является значимой, принималось с достоверностью не ниже 95%. Порог значимости коэффициента корреляции сопоставляемых рядов, определенный с учетом числа их степеней свободы, составил 0,34 [33].

Результаты корреляционного анализа представлялись на контурных картах в виде областей, во всех пунктах которых межгодовые изменения ТПО были

значимо связаны с вариациями СП ВАВ, происходивших над определённым сектором Северной Атлантики. Для отображения областей на картах использовался метод триангуляции Делоне [34].

Важным подтверждением наличия причинной связи между ВАВ, проходящими над Датским проливом, и САК могло бы явиться доказательство того, что при ВАВ определенной продолжительности имеет место значительное возрастание объемов вод Гренландского моря, проходящих через пролив. Для численной оценки этих объемов выполнено математическое моделирование ветрового течения в период действия ВАВ. Для этого определялся суммарный объем вод Гренландского моря, проходящий через Датский пролив за время T , соответствующее продолжительности ВАВ, при условии, что на его поверхность действует северный ветер определенной скорости. В расчетах использовалась трехмерная гидродинамическая модель POM (Princeton Ocean Model) [35–39].

Оцененный таким образом объем вод, проходящий через Датский пролив во время действия ВАВ, сравнивался с нормальным расходом приповерхностной струи Восточно-Гренландского течения в отсутствие ВАВ, который, по оценкам [40, 41], составляет 3 Свердрупа.

Результаты исследования и их анализ

В соответствии с изложенной методикой, по данным реанализа ERA-Interim выявлены все ВАВ продолжительностью от 1 до 14 суток, которые имели место над рассматриваемым регионом Северной Атлантики в период 1979–2018 гг. В качестве примера, в таблице 1 приведено количество N таких событий продолжительностью T более 6, 9, 11, 12 и 13 суток. Вторжения выявлялись в каждом секторе шириной $2,5^\circ$.

Как видно из таблицы 1, количество обнаруженных арктических вторжений зависит от расположения конкретного сектора и продолжительности события.

Таблица 1.

Количество арктических вторжений определенной продолжительности, выявленных над Северной Атлантикой в 1979–2018 гг.

Сектор ($^\circ$, з.д.)	N	Сектор ($^\circ$, з.д.)	N	Сектор ($^\circ$, з.д.)	N	Сектор ($^\circ$, з.д.)	N	Сектор ($^\circ$, з.д.)	N
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T > 6$ суток									
60–57,5	710	47,5–45	946	35–32,5	413	22,5–20	266	10–7,5	540
57,5–55	599	45–42,5	960	32,5–30	419	20–17,5	358	7,5–5	579
55–52,5	489	42,5–40	899	30–27,5	326	17,5–15	457	5–2,5	597
52,5–50	370	40–37,5	589	27,5–25	254	15–12,5	482	2,5–0	607
50–47,5	565	37,5–35	363	25–22,5	216	12,5–10	503		
$T > 9$ суток									
60–57,5	392	47,5–45	612	35–32,5	191	22,5–20	87	10–7,5	276
57,5–55	289	45–42,5	702	32,5–30	190	20–17,5	135	7,5–5	304
55–52,5	204	42,5–40	610	30–27,5	137	17,5–15	198	5–2,5	331
52,5–50	136	40–37,5	304	27,5–25	84	15–12,5	223	2,5–0	345
50–47,5	244	37,5–35	154	25–22,5	69	12,5–10	254		

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T>11 суток									
60–57,5	251	47,5–45	452	35–32,5	121	22,5–20	47	10–7,5	179
57,5–55	172	45–42,5	599	32,5–30	120	20–17,5	74	7,5–5	199
55–52,5	106	42,5–40	482	30–27,5	67	17,5–15	110	5–2,5	232
52,5–50	65	40–37,5	197	27,5–25	42	15–12,5	135	2,5–0	244
50–47,5	136	37,5–35	80	25–22,5	33	12,5–10	166		
T>12 суток									
60–57,5	193	47,5–45	384	35–32,5	92	22,5–20	35	10–7,5	148
57,5–55	127	45–42,5	551	32,5–30	88	20–17,5	49	7,5–5	162
55–52,5	74	42,5–40	433	30–27,5	48	17,5–15	87	5–2,5	187
52,5–50	47	40–37,5	158	27,5–25	24	15–12,5	105	2,5–0	204
50–47,5	107	37,5–35	64	25–22,5	26	12,5–10	130		
T>13 суток									
60–57,5	163	47,5–45	366	35–32,5	80	22,5–20	33	10–7,5	116
57,5–55	111	45–42,5	545	32,5–30	88	20–17,5	51	7,5–5	132
55–52,5	46	42,5–40	415	30–27,5	20	17,5–15	59	5–2,5	175
52,5–50	39	40–37,5	150	27,5–25	16	15–12,5	89	2,5–0	172
50–47,5	79	37,5–35	36	25–22,5	16	12,5–10	122		

Максимальное число ВАВ любой длительности выявлено в секторе 47,5°–40° з. д., который соответствует южной оконечности Гренландии. Минимальным количество обнаруженных ВАВ оказалось в секторе 27,5°–22,5° з. д., включающем значительную часть акватории моря Ирмингера. Большое число ВАВ проходило через Датский пролив (40°–27,5° з.д.).

Из таблицы 1 также следует, что более длительных вторжений обнаруживается меньше.

После обработки данных таблицы 1 с применением критерия Стьюдента было установлено, что 95% достоверность статистического вывода о значимости связи снижения индекса САК с наступлением ВАВ будет достигнута, если превышение частоты совпадений этих двух событий от среднего уровня 0,5 будет не менее 0,1.

В таблице 2 представлены значения частот (F), с которыми снижение индекса САК происходило в даты, соответствующие периодам существования ВАВ.

Таблица 2.

Частота снижения индекса САК с при наступлении ВАВ в определенном секторе Северной Атлантики

Сектор (°, з.д.)	F	Сектор (°, з.д.)	F	Сектор (°, з.д.)	F	Сектор (°, з.д.)	F	Сектор (°, з.д.)	F
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T>6 суток									
60–57,5	0,473	47,5–45	0,492	35–32,5	0,595	22,5–20	0,608	10–7,5	0,489
57,5–55	0,478	45–42,5	0,497	32,5–30	0,599	20–17,5	0,569	7,5–5	0,479
55–52,5	0,473	42,5–40	0,521	30–27,5	0,612	17,5–15	0,553	5–2,5	0,466
52,5–50	0,491	40–37,5	0,578	27,5–25	0,631	15–12,5	0,525	2,5–0	0,457
50–47,5	0,497	37,5–35	0,605	25–22,5	0,631	12,5–10	0,505		

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T>9 суток									
60–57,5	0,482	47,5–45	0,496	35–32,5	0,604	22,5–20	0,587	10–7,5	0,477
57,5–55	0,471	45–42,5	0,501	32,5–30	0,620	20–17,5	0,574	7,5–5	0,463
55–52,5	0,483	42,5–40	0,527	30–27,5	0,617	17,5–15	0,564	5–2,5	0,462
52,5–50	0,482	40–37,5	0,591	27,5–25	0,607	15–12,5	0,527	2,5–0	0,457
50–47,5	0,491	37,5–35	0,641	25–22,5	0,629	12,5–10	0,503		
T>11 суток									
60–57,5	0,489	47,5–45	0,501	35–32,5	0,614	22,5–20	0,545	10–7,5	0,472
57,5–55	0,480	45–42,5	0,504	32,5–30	0,639	20–17,5	0,513	7,5–5	0,464
55–52,5	0,502	42,5–40	0,536	30–27,5	0,621	17,5–15	0,553	5–2,5	0,467
52,5–50	0,496	40–37,5	0,597	27,5–25	0,645	15–12,5	0,530	2,5–0	0,460
50–47,5	0,504	37,5–35	0,678	25–22,5	0,627	12,5–10	0,507		
T>12 суток									
60–57,5	0,484	47,5–45	0,503	35–32,5	0,654	22,5–20	0,536	10–7,5	0,470
57,5–55	0,478	45–42,5	0,507	32,5–30	0,655	20–17,5	0,492	7,5–5	0,475
55–52,5	0,514	42,5–40	0,539	30–27,5	0,605	17,5–15	0,546	5–2,5	0,469
52,5–50	0,523	40–37,5	0,605	27,5–25	0,645	15–12,5	0,520	2,5–0	0,462
50–47,5	0,525	37,5–35	0,702	25–22,5	0,633	12,5–10	0,505		
T>13 суток									
60–57,5	0,477	47,5–45	0,501	35–32,5	0,701	22,5–20	0,533	10–7,5	0,469
57,5–55	0,477	45–42,5	0,509	32,5–30	0,678	20–17,5	0,501	7,5–5	0,477
55–52,5	0,521	42,5–40	0,539	30–27,5	0,599	17,5–15	0,518	5–2,5	0,463
52,5–50	0,547	40–37,5	0,613	27,5–25	0,663	15–12,5	0,496	2,5–0	0,466
50–47,5	0,535	37,5–35	0,702	25–22,5	0,673	12,5–10	0,505		

Из таблицы 2 следует, что частота снижений среднесуточных значений индекса САК в периоды существования ВАВ, зависит от расположения сектора, в котором обнаружено ВАВ, а также от его продолжительности.

Установлено, что минимальная продолжительность ВАВ, при которой могло быть зафиксировано значимое превышение F уровня 0,5, составляет 5 суток. По мере увеличения продолжительности ВАВ, количество секторов, в которых превышение F является значимым, растет.

Для каждого месяца далее были оценены значения частот f , с которыми за период 1979–2018 гг. выявленные ВАВ захватывали акваторию Датского пролива. Эти оценки приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Частоты, с которыми за период 1979–2018 гг. выявленные ВАВ проходили над районами Датского пролива

Месяц	f	Месяц	f	Месяц	f
Январь	0,28	Май	0,65	Сентябрь	0,56
Февраль	0,29	Июнь	0,68	Октябрь	0,52
Март	0,34	Июль	0,79	Ноябрь	0,44
Апрель	0,56	Август	0,71	Декабрь	0,28

Как видно из таблицы 3, арктические вторжения, пересекавшие ССГФ в 1979–2018 гг., проходили над Датским проливом в не менее чем 50% случаев с апреля по сентябрь.

На рис. 1 представлена контурная карта Северной Атлантики, на которой схематически отображены расположения изолиний коэффициента корреляции временных рядов СП таких ВАВ и ТПО с параметром $+0,34$ и $-0,34$, которые соответствуют выбранному уровню значимости рассматриваемой связи и месяцам: апрель, июнь и сентябрь.

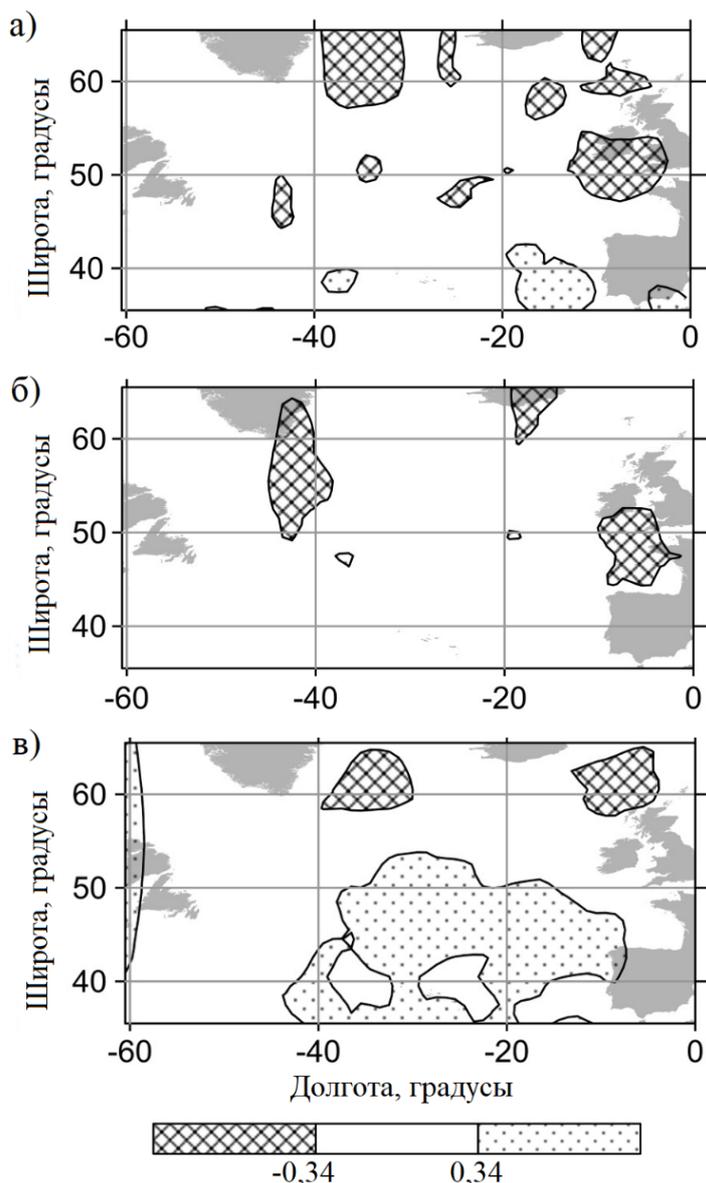


Рис. 1. Расположения районов Северной Атлантики, для которых достоверность вывода о значимости связей межгодовых изменений среднемесячных значений ТПО с вариациями СП ВАВ, пересекающих Датский пролив, составляет не менее 0,95, для месяцев:
а – апрель; б – июнь; в – сентябрь

Из рис. 1 следует, что в апреле, июне и сентябре к югу от Датского пролива существовали районы, в которых корреляция межгодовых изменений среднемесячных значений ТПО и СП ВАВ над проливом являлась значимой отрицательной.

Нетрудно заметить, что отрицательной она являлась и для некоторых акваторий Северо-Восточной Атлантики и Норвежского моря. Последнее объясняется тем, что ширина фронта рассматриваемых ВАВ захватывала не только Датский пролив и Гренландское море, но и западную часть Норвежского моря.

Из рис. 1 также видно, что в те же месяцы существовали районы, где корреляция рассматриваемых процессов была значимой и при этом положительной. Эти районы располагались южнее области теплого Северо-Атлантического течения. Их существование, очевидно, можно объяснить возникающим ветровым сгоном в них вод из данной области, вызванным воздействием ВАВ.

Аналогичным образом установлено, что в любые месяцы с апреля по октябрь статистические связи межгодовых изменений среднемесячных значений ТПО рассматриваемого региона и СП ВАВ, пересекающих Датский пролив, являлись значимыми. При этом их характер в целом соответствует качественным представлениям о возможных особенностях таких связей.

С помощью модели РОМ оценены объемы вод Гренландского моря, дополнительно доставляемые ветровым течением через Датский пролив в Атлантику за период существования ВАВ. При этом предполагалось, что продолжительность ВАВ равна 5 суткам, т. е. минимальному уровню этого показателя, при котором влияние ВАВ на индекс САК было признано значимым.

Оценки дополнительно доставляемых объемов вод (q_{cp}) были выполнены для случаев, когда средняя скорость ветра во время действия ВАВ составляла 20, 15 и 10 м/с. Полученные результаты сопоставлены со средними объемами тех же вод, которые переносит в Атлантику приповерхностная струя Восточно-Гренландского течения в отсутствие ВАВ (Q_{cp}) [40, 41].

Результаты, соответствующие всему сечению пролива и верхнему десятиметровому слою его вод, представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Оценки дополнительных объемов вод, доставляемых в результате арктических вторжений длительностью 5 суток через Датский пролив в Атлантику, и их отношение к расходу вод Восточно-Гренландского течения при отсутствии ВАВ

Средняя скорость ветра, м/с	20	15	10
q_{cp} (через все сечение пролива), км ³	198,5	140,4	119,3
q_{cp}/Q_{cp} (через все сечение)	0,153	0,108	0,092
q_{cp} (через слой 0–10 м), км ³	68,7	50,9	46,1
q_{cp}/Q_{cp} (через слой 0–10 м)	0,795	0,589	0,533

Из таблицы 4 следует, что при рассматриваемых скоростях ветра, объемы вод, дополнительно доставляемых в Атлантику ветровым течением в Датском проливе, инициируемым ВАВ минимальной продолжительности, сопоставимы с объемами, доставляемыми приповерхностной струей Восточно-Гренландского

течения. При этом значительная часть дополнительных объемов проходит через верхний десятиметровый слой вод пролива. Последний факт вполне логичен, поскольку течение, инициируемое ВАВ, является ветровым. Отношение q_{cp}/Q_{cp} для указанного слоя при любых рассматриваемых ВАВ, превышает уровень 0,5.

При ВАВ большей продолжительности значения отношения q_{cp}/Q_{cp} будут еще больше. Последнее свидетельствует о том, что выявленные изменения распределений ТПО, АД, а также индекса САК, которые вызваны ВАВ над Датским проливом, действительно, носят причинный характер.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наблюдения за образованием ВАВ, проходящих над Датским проливом, позволяют выявить момент связанного с этим процессом начала снижения индекса САК. Последнее вероятно, если продолжительность ВАВ составит более 5 суток. Обнаружение такого ВАВ позволит предсказать особенности поведения циклона, который в это время может формироваться на каком-либо участке ССГФ. В своем движении в сторону Европы он, очевидно, будет отклоняться к югу и создавать риски возникновения штормов в Средиземноморье.

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что:

1. Вторжения арктического воздуха продолжительностью более 5 суток, проходящие над Датским проливом, способны оказывать значимое влияние на состояние Североатлантического колебания, которое проявляется в синхронных снижениях среднесуточных значений его индекса.

2. Следствием арктических вторжений над Датским проливом является отклонение траекторий движения атлантических циклонов к югу и связанное с этим повышение рисков возникновения штормов в Средиземном, Эгейском, Черном и Азовском морях. В морях у северных побережий Европы при этом риски возникновения штормов будут снижаться.

3. Время достоверного прогнозирования штормов в морях, омывающих побережья Европы, можно значительно увеличить при должном учете влияния арктических вторжений на индекс САК.

Литература

1. Нестеров Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада, лтд, 2013. 144 с.
2. Курбаткин Г. П., Смирнов В. Д. Межгодовые вариации температуры тропосферы, связанные с декадными изменениями североатлантического колебания // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 435–447.
3. Мохов И. И., Елисеев А. В. и др. Североатлантическое колебание: диагноз и моделирование десятилетней изменчивости и ее долгопериодной эволюции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 5. С. 605–616.
4. Полонский А. Б., Башарин Д. В. О влиянии Североатлантического и Южного колебаний на изменчивость температуры воздуха в Европейско-Средиземноморском регионе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 1. С. 135–145.

5. Полонский А. Б., Башарин Д. В., Воскресенская Е. Н. и др. Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии // *Морской гидрофизический журнал*. 2004. № 2. С. 42–59.
6. Попова В. В., Шмакин А. Б. Влияние североатлантического колебания на многолетний гидротермический режим Северной Евразии. I. Статистический анализ данных наблюдений // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 5. С. 62–74.
7. Попова В. В., Шмакин А. Б. Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в Северной Евразии во второй половине XX – начале XXI веков // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т. 46. № 2. С. 161–175.
8. Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M. An overview of the North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact // *Geophys. Monogr. Ser.* 2003. Vol. 134. Pp. 1–35.
9. Johnson N. C., Feldstein S. B., Tremblay D. The continuum of Northern Hemisphere teleconnection patterns and a description of the NAO shift with the use selforganizing maps // *J. Climate*. 2008. Vol. 21. No. 23. Pp. 6454–6371.
10. Lamb P. J., Peppier R. A. North Atlantic oscillation: Concept and an application // *Bull. Amer. Met. Soc.* 1987. Vol. 68. No. 10. Pp. 1218–1225.
11. Rodwell M. J., Rowell D. P., Folland C. K. Simulating the winter North Atlantic Oscillation and European Climate, 1947–1997 // *Research activities in atmospheric and oceanic modeling*. 1999. Rep. No. 28. WMO/TD 942. Pp. 633–634.
12. Intercomparison and validation of ocean-atmosphere energy flux fields. Final report of the Joint WCRP/SCOR working group on air-sea fluxes (SCOR working group 110) / WCRP–112. WMO/TD. No. 1036, 2000. 303 с.
13. Смирнов Н. П., Воробьев В.Н., Качанов С.Ю. Североатлантическое колебание и климат. СПб: РГГМУЮ, 1998. 121 с.
14. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Weath. Rev.* 1987. Vol. 115. No. 6. Pp. 1083–1126.
15. *Climate Diagnostics Bulletin*. Climate Prediction Center / US Department of Commerce, 1999. 80 p.
16. Sulby M. L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. New York: Academic Press. 1996. 560 p.
17. Мохов И. И., Смирнов Д. А. Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо — Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний нелинейными методами // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42. № 5. С. 650–667.
18. Pinto J. G, Reyers M., Ulbrich U. The variable link between PNA and NAO in observations and in multi-century CGCM simulations // *Clim. Dyn.* 2011. Vol. 36, No. 1–2. Pp. 337–354.
19. Johansson A., et al. On the level and origin of seasonal forecast skill in Northern Europe // *J. Atm. Sci.* – 1998. Vol. 55, No. 1. Pp. 103–127.
20. Benedict J.J., Lee S., Feldstein S. B. Synoptic view of the North Atlantic Oscillation // *J. Atm. Sci.* 2004. Vol. 61. No. 2. Pp. 121–144.
21. Franzke C., Lee S., Feldstein S. B. Is the North Atlantic Oscillation a breaking wave? // *J. Atm. Sci.* 2004. Vol. 61. No. 2. Pp. 145–160.
22. Martius O., Schwierz C., Davies H. C. Breaking waves at the tropopause in the wintertime Northern Hemisphere: climatological analyses of the orientation and the theoretical LC1/2 classification // *J. Atm. Sci.* 2007. Vol. 64. No. 7. Pp. 2576–2592.

23. Strong C., Magnusdottir G. Tropospheric Rossby wave breaking and the NAO/NAM // *J. Atm. Sci.* 2008. Vol.65. No. 9. Pp. 2861–2876.
24. Холопцев А. В., Семенов В. А., Кононова Н. К. Продолжительные арктические вторжения и Эль-Ниньо Южное колебание // *Известия РАН. Серия географическая.* 2018. № 4. С. 22–32.
25. Mankin M. Atmospheric dynamics. London: Cambridge Univ. press, 2011. 512 p.
26. Холопцев А.В., Подпорин С.А., Курочкин Л.Е. Арктические вторжения и тенденции изменения метеоусловий в океанических регионах умеренного климатического пояса // Труды III международной конференции “Science: discoveries and progress” III International Scientific Conference. Czech Republic, Karlovy Vary, Russia, Moscow. September 28–29. 2018. Pp. 450–460.
27. Шакина Н. П., Иванова А. Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // *Метеорология и гидрология.* 2010. № 11. С. 5–18.
28. Quiroz R. S. The climate of 1983–84 winter — a season of strong blocking and severe cold in North America // *Mon. Weath. Rev.* 1984. Vol. 112. No. 9. Pp. 1894–1912.
29. Мохов И. И., Акперов М. Г., Прокофьева М. А. Блокинг в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // *Доклады Академии наук.* 2013. Т. 449. № 5. С. 1–5.
30. North Atlantic Oscillation (NAO). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>
31. Climate Data Guide. URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim>.
32. NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>
33. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
34. Скворцов А. В., Мирза Н. С. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. Томск: Изд-во Томского университета, 2006. 168 с.
35. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model // *Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Science.* 1987. Vol. 4. Pp. 1–16.
36. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. Vol. 20. Pp. 851–875.
37. Wannawong W., Wongwises U., Vongvisessomjai S. Mathematical Modeling of Storm Surge in Three Dimensional Primitive Equations // *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering.* 2011. Vol. 5. No. 6. Pp. 797–806.
38. Stelling G.S., Duijnmeijer S.P.A. A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows // *Int. J. Numer. Meth. Fluids.* 2003. Vol. 43. Pp. 1329–1354.
39. Smit P., Zijlema M., Stelling G. 2013. Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model // *Coast. Engng.* 2013. Vol. 76. Pp. 1–16.
40. Мошонкин С.Н., Филюшкин Б.Н. Влияние придонных гравитационных течений в проливах на водные массы Северной Атлантики // *Водные массы океанов и морей (к 100-летию А.Д. Добровольского).* 2007. С. 130–146.

41. Aukrust P., Oberhuber J. M. Modelling of the Greenland, Iceland and Norwegian Seas with a coupled sea ice — mixed layer — isopycnal ocean model // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. No. C3. Pp. 4771–4789.

A.V. Kholoptsev^{1,2}
S. A. Podporin¹
L. Ye. Kurochkin¹

Arctic air outbreaks and storm risks in the seas of Europe

¹FSAEI “Sevastopol state university”, Sevastopol, Russian Federation

²Sevastopol office of federal state budgetary institution “State Oceanographic Institute of N. N. Zubov”, Sevastopol, Russian Federation

e-mail: kholoptsev@mail.ru, SAPodporin@sevsu.ru,
l.kurochkin.mj@mail.ru

Abstract. *This paper aims to investigate the impact of Arctic air outbreaks (AAO) passing over the Denmark Strait on the state of the North Atlantic oscillation (NAO). NAO is a powerful manifestation of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere that significantly affects propagation of cyclones originating in the Northern subpolar hydrological front of the Atlantic. Insights into the mechanisms of the NAO index variations are of key importance for prediction of cyclone-driven storms, which is especially the case for the sea areas adjacent to European coasts due to their intense marine traffic. Untimely weather forecasts will significantly compromise shipping safety and lead to great economic losses due to ship delays and damage to the cargo.*

In this research we demonstrate that Arctic air outbreaks can impact the NAO index in two ways. Firstly, since the air involved in the outbreak is cold, dense, and dry, when reaching the Icelandic Low area, it tends to increase the atmospheric pressure therein. Secondly, since the outbreak in its nature is a strong wind, when taking place over the Denmark Strait, it intensifies the East Greenland Current, which transports more cold waters from the Greenland Sea to the North Atlantic. This process tends to shift the corresponding section of the subpolar hydrological front southward, which, in turn, leads to the air pressure rise in the Icelandic Low area.

A hypothesis is proposed presuming that a correlation exists between an AAO occurrence over the Denmark Strait and the NAO index variations. To verify it, meteorological datasets obtained from ERA-Interim (meridional and zonal wind surface velocities) and NOAA (sea surface temperatures) reanalyses are used. The datasets available include modelled data spanning from 1979 till 2018.

For the specified period, all AAO-events that took place in the North Atlantic are detected and their duration estimated. Frequencies of concurrent AAO occurrence and the mean daily NAO index drop are determined. The minimal duration of an AAO-event capable of influencing the NAO index is found to be 5 days or more.

Statistical approach (including correlational analysis and Student’s t-test) is used to establish the correlation significance between AAO-events and the NAO index variations. It is shown that the longer the AAO-event, the more significant is its impact on the NAO index. The areas of the North Atlantic exhibiting the significant correlation are presented on counter maps by use of Delaunay triangulation technique.

It is also proved that Arctic outbreaks can substantially increase flows of the East Greenland Current thus delivering more cold water into the area of the Icelandic Low. This is also a contributing factor for the NAO index decrease.

Monitoring of AAO-events in the area of the Denmark Strait is shown to facilitate better prediction of Atlantic cyclones behavior and issuing timely warnings in case such cyclones are likely to deviate southwards into the busy waterways of the Mediterranean.

Keywords: *North Atlantic, Europe, Arctic air outbreaks, North Atlantic Oscillation, storm, weather prediction, safety of navigation*

References

1. Nesterov Ye. S. Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean (North Atlantic Oscillation: Atmosphere and Ocean). Moscow: Triada, Ltd (Publ.), 2013, 144 p. (in Russian).
2. Kurbatkin G. P., Smirnov V. D. Mezhsodovye variacii temperatury troposfery, svjazannye s dekadnymi izmenenijami severoatlanticheskogo kolebanija (Tropospheric temperature interannual variations associated with decadal changes in the North Atlantic Oscillation). Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana, 2010, vol. 46, no. 4, Pp. 435–447 (in Russian).
3. Mohov I. I., Eliseev A. V. i dr. Severoatlanticheskoe kolebanie: diagnoz i modelirovanie desjatiletnej izmenchivosti i ee dolgoperiodnoj jevoljucii (North Atlantic Oscillation: Diagnosis and modeling of ten-year variability and its long-period evolution). Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana, 2000, vol. 36, no. 5, Pp. 605–616. (in Russian).
4. Polonskij A. B., Basharin D. V. O vlijanii Severoatlanticheskogo i Juzhnogo kolebanij na izmenchivost' temperatury vozduha v Evropejsko-Sredizemnomorskom regione (On the influence of the North Atlantic and Southern fluctuations on air temperature variability in the Euro-Mediterranean region). Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana, 2002, vol. 38, no. 1, Pp. 135–145. (in Russian).
5. Polonskij A. B., Basharin D. V., Voskresenskaja Ye. N. i dr. Severoatlanticheskoe kolebanie: opisanie, mehanizmy i vlijanie na klimat Evrazii (North Atlantic Oscillation: Description, Mechanisms and Impact on the Climate of Eurasia). Morskoy gidrofizicheskij zhurnal, 2004, no. 2, Pp. 42–59. (in Russian).
6. Popova V. V., Shmakin A. B. Vlijanie severoatlanticheskogo kolebanija na mnogoletnij gidrotermicheskij rezhim Severnoj Evrazii. I. Statisticheskij analiz dannyh nabljudenij (Influence of the North Atlantic oscillations on the long-term hydrothermal regime of Northern Eurasia. I. Statistical analysis of observational data). Meteorologija i gidrologija, 2003, no. 5, Pp. 62–74. (in Russian).
7. Popova V. V., Shmakin A. B. Regional'naja struktura kolebanij temperatury prizemnogo vozduha v Severnoj Evrazii vo vtoroj polovine XX–nachale XXI vekov (Regional structure of surface air temperature fluctuations in Northern Eurasia in the second half of the XX–beginning of the XXI centuries). Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana, 2010, vol. 46, no. 2, Pp. 161–175. (in Russian).
8. Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottensen G., Visbeck M. An overview of the North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Geophys. Monogr. Ser., 2003, vol. 134, Pp. 1–35.
9. Johnson N. C., Feldstein S. B., Tremblay D. The continuum of Northern Hemisphere teleconnection patterns and a description of the NAO shift with the use selforganizing maps. J. Climate, 2008, vol. 21, no. 23, pp. 6454–6371.

10. Lamb P. J., Peppier R. A. North Atlantic oscillation: Concept and an application. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1987, vol. 68, no. 10, Pp. 1218–1225.
11. Rodwell M. J., Rowell D. P., Folland C. K. Simulating the winter North Atlantic Oscillation and European Climate, 1947–1997. Research activities in atmospheric and oceanic modeling, 1999, Rep. no. 28, WMO/TD 942, Pp. 633–634.
12. Intercomparison and validation of ocean-atmosphere energy flux fields. Final report of the Joint WCRP/SCOR working group on air-sea fluxes (SCOR working group 110). WCRP–112, WMO/TD, no. 1036, 2000, 303 p.
13. Smirnov N. P., Vorob'ev V. N., Kachanov S. Yu. Severoatlanticheskoe kolebanie i klimat (North Atlantic Oscillation and Climate). St. Petersburg: RGGMUUYU (Publ.), 1998, 121 p. (in Russian).
14. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Weath. Rev.*, 1987, vol. 115, no. 6, Pp. 1083–1126.
15. Climate Diagnostics Bulletin. Climate Prediction Center. US Department of Commerce, 1999, 80 p.
16. Sulby M. L. Fundamentals of Atmospheric Physics. New York: Academic Press (Publ.), 1996, 560 p.
17. Mohov I. I., Smirnov D. A. Issledovanie vzaimnogo vlijaniya processov El'-Nin'o — Juzhnoe kolebanie i Severo-Atlanticheskogo i Arkticheskogo kolebanij nelinejnymi metodami (Investigation of the mutual influence of the processes of El Nino – Southern Oscillation and the North Atlantic and Arctic oscillations by nonlinear methods). *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2006, vol. 42, no. 5, Pp. 650–667. (in Russian).
18. Pinto J. G., Reyers M., Ulbrich U. The variable link between PNA and NAO in observations and in multi-century CGCM simulations. *Clim. Dyn.*, 2011, vol. 36, no. 1–2, Pp. 337–354.
19. Johansson A., et al. On the level and origin of seasonal forecast skill in Northern Europe. *J. Atm. Sci.*, 1998, vol. 55, no. 1, Pp. 103–127.
20. Benedict J.J., Lee S., Feldstein S.B. Synoptic view of the North Atlantic Oscillation. *J. Atm. Sci.*, 2004, vol. 61, no. 2, Pp. 121–144.
21. Franzke C., Lee S., Feldstein S. B. Is the North Atlantic Oscillation a breaking wave? *J. Atm. Sci.*, 2004, vol. 61, no. 2, Pp. 145–160.
22. Martius O., Schwierz C., Davies H.C. Breaking waves at the tropopause in the wintertime Northern Hemisphere: climatological analyses of the orientation and the theoretical LC1/2 classification. *J. Atm. Sci.*, 2007, vol. 64, no. 7, Pp. 2576–2592.
23. Strong C., Magnusdottir G. Tropospheric Rossby wave breaking and the NAO/NAM. *J. Atm. Sci.*, 2008, vol. 65, no. 9, Pp. 2861–2876.
24. Kholoptsev A.V., Semenov V.A., Kononova N.K. Prodolzhitel'nye arkticheskie vtorzhenija i El-Nino Juzhnoe kolebanie (Long arctic invasion and El-Nino–Southern Oscillation). *Izvestija RAN. Serija geograficheskaja*, 2018, no. 4, Pp. 22–32. (in Russian).
25. Mankin M. Atmospheric dynamics. London: Cambridge Univ. press (Publ.), 2011, 512 p.
26. Kholoptsev A. V., Podporin S. A., Kurochkin L. Ye. Arkticheskie vtorzheniya i tendencii izmeneniya meteoulovij v okeanicheskikh regionah Umerennogo klimaticheskogo poyasa (Arctic Air Outbreaks and Weather Trends in Oceanic Regions of the Temperate Climate Zone). Proceedings of III International Scientific Conference “Science:

- Discoveries and Progress”. Czech Republic, Karlovy Vary, Russia, Moscow, September 28–29, 2018, Pp. 450–460. (in Russian).
27. Shakina N. P., Ivanova A. R. Blokirujushhie anticiklony: sovremennoe sostojanie issledovanij i prognozirovanija (The blocking anticyclones: The state of studies and forecasting). *Meteorologija i gidrologija*, 2010, no. 11, pp. 5–18. (in Russian).
 28. Quiroz R. S. The climate of 1983–84 winter — a season of strong blocking and severe cold in North America. *Mon. Weath. Rev.*, 1984, vol. 112, no. 9, Pp. 1894–1912.
 29. Mohov I. I., Akperov M. G., Prokof'eva M. A. Blokingi v Severnom polusharii i Evro-Atlanticheskom regione: ocenki izmenenij po dannym reanaliza i model'nym raschetam (Blockings in the Northern hemisphere and Euro-Atlantic region: Estimates of changes from reanalysis data and model simulations). *Doklady Akademii nauk*, 2013, vol. 449, no. 5, Pp. 1–5. (in Russian).
 30. North Atlantic Oscillation (NAO). URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>
 31. Climate Data Guide. URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim>.
 32. NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>.
 33. Kobzar A. I. *Prikladnaja matematicheskaja statistika (Applied Mathematical Statistics)*. Moscow: Fizmatlit (Publ.), 2006, 816 p. (in Russian).
 34. Skvortsov A. V., Mirza N. S. *Algoritmy postroenija i analiza trianguljicii (Algorithms for constructing and analyzing triangulation)*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta (Publ.), 2006, 168 p. (in Russian).
 35. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Science*. 1987, vol. 4, Pp. 1–16.
 36. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982, vol. 20, Pp. 851–875.
 37. Wannawong W., Wongwiset U., Vongvisessomjai S. Mathematical Modeling of Storm Surge in Three Dimensional Primitive Equations. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 2011, vol. 5, no. 6, Pp. 797–806.
 38. Stelling G. S., Duijnmeijer S.P.A. A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 2003, vol. 43, Pp. 1329–1354.
 39. Smit P., Zijlema M., Stelling G. 2013. Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model. *Coast. Engng.*, 2013, vol. 76, Pp. 1–16.
 40. Moshonkin S. N., Filjushkin B. N. Vlijanie pridonnyh gravitacionnyh techenij v prolivah na vodnye massy Severnoj Atlantiki (The influence of benthic gravity currents in the straits on the water masses of the North Atlantic). *Vodnye massy okeanov i morej (k 100-letiju A. D. Dobrovol'skogo)*, 2007, Pp. 130–146. (in Russian).
 41. Aukrust P., Oberhuber J. M. Modelling of the Greenland, Iceland and Norwegian Seas with a coupled sea ice — mixed layer — isopycnal ocean model. *J. Geophys. Res.*, 1995, vol. 100, no. C3, Pp. 4771–4789.

Поступила в редакцию 12.02.2020 г.