

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.465

С.А. Добролюбов<sup>1</sup>, Е.И. Климчук<sup>2</sup>СВЕРДРУПОВСКИЙ ПЕРЕНОС ВОД В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ<sup>3</sup>

Проанализированы среднемесячные значения интегрального меридионального переноса в Северной Атлантике, рассчитанные по соотношению Свердрупа. В качестве исходных данных использован массив касательного напряжения ветра в узлах регулярной сетки  $1 \times 1^\circ$  за период 1980—2005 гг. Расчет интегрального свердруповского переноса в районе субтропического антициклонического круговорота показал, что максимальное среднемноголетнее значение  $\psi_s = -29,8 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$  получено на  $33^\circ$  с.ш. Изучен квазиширотный перенос как сумма максимальных значений интегрального свердруповского переноса в субтропическом и субполярном круговоротах, рассмотрена его сезонная и межгодовая изменчивость. Анализ корреляций значений среднегодового зонального переноса с индексом Североатлантического колебания указывает на наличие значимой обратной связи ( $r = -0,6$ ), что подтверждает гипотезу Бьеркнеса о противофазности изменений потоков в атмосфере и в акватории Северной Атлантики.

*Ключевые слова:* интегральный свердруповский перенос, межгодовая изменчивость, квазиширотный перенос, Североатлантическое колебание.

**Введение.** Изучение механизмов воздействия океана на формирование и изменение климата — важный раздел современных океанологических исследований. К таким механизмам относятся переносы массы и тепла в океане в меридиональном и зональном направлениях, вызванные неоднородностью поля ветра и термохалинными факторами. В результате этих процессов происходит сглаживание термических контрастов между широтами, формирование долгопериодных вариаций потоков океан — атмосфера и характеристик водных масс [3].

В настоящее время климатические и океанические исследования основываются в большей степени на результатах численного моделирования (см. список литературы в [2, 12]). Вместе с тем общие физические закономерности, определяющие крупномасштабную циркуляцию вод Мирового океана, могут быть получены при анализе упрощенной системы уравнений движения. Именно такой подход был предложен Х. Свердрупом [21], который вывел соотношение, связывающее интегральную циркуляцию в верхнем (~500—1000 м) слое океана с завихренностью крупномасштабного поля ветра, предположив при этом, что течение установившееся, на глубине существует некий уровень отсутствия движения, а боковое трение, вязкость и нелинейные члены движения малы.

В районе западных пограничных течений свердруповский баланс напрямую не выполняется, для замыкания баланса массы там должны существовать

интенсивные пограничные течения вдоль берега, направленные против переноса в основной части круговорота. Таким образом, если бы течения в Субтропической Атлантике определялись только завихренностью поля ветра, то расход течений на север в системе Флоридское течение—Гольфстрим был бы равен интегральному переносу на юг на соответствующих широтах из соотношения Свердрупа. Позднее Г. Стоммел и У. Манк дополнили теорию Свердрупа, введя западное пограничное течение с учетом бокового трения у берега и замкнув, таким образом, циркуляцию. При этом следует отметить, что свердруповский режим циркуляции не противоречит существованию течений другой природы, а полный поток массы воды в современных моделях учитывает в дополнение к свердруповскому переносу неравномерность трения о дно, влияние градиентов давления за счет изменений плотности воды и рельефа дна [2]. Несмотря на это, рассчитываемые по соотношению Свердрупа значения верно отображают характерные особенности интегральной циркуляции в тропических и умеренных широтах Северной Атлантики [16].

Межгодовые и внутригодовые значения интегрального свердруповского переноса ( $\psi_s$ ) для всего Мирового океана приводятся во многих работах, например, С. Хеллермана и М. Розенштейна [13], В.А. Буркова [1], С. Годфри [11] и др. В статье С. Хеллермана [13] предложена параметризация коэффициента сопротивления морской поверхности для расчета напряжения

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, заведующий кафедрой, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: science@geogr.msu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, аспирант; e-mail: kuchmilk@mail.ru

<sup>3</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-05-00634-а) и контракта № 8327 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.

трения ветра, применяемого для вычисления среднемесячных многолетних значений интегрального  $\psi_s$ , которую впоследствии широко использовали многие ученые (см., например, [8, 14, 17] и др.). В работах Д. Майера [17] и С. Джоси [14] дано подробное пространственно-временное описание интегральной свердруповской циркуляции для района Северной Атлантики, выполненное на основе метеорологических данных судовых наблюдений.

Одним из авторов статьи [4] выполнены оригинальные расчеты среднемесячных и среднегодовых интегральных значений свердруповского переноса для района субтропических и умеренных широт Северной Атлантики, проанализирован вклад рассчитанных среднемесячных значений  $\psi_s$  в суммарный перенос воды через Флоридский пролив, полученный независимым электрометрическим методом. Предлагаемая статья посвящена исследованию среднегодовых интегральных значений свердруповского переноса в Северной Атлантике, включая квазиширотный поток восточного направления, а также их взаимосвязи с индексом Североатлантического колебания (САК). Поиск подобных связей может способствовать более корректному пониманию роли атмосферных процессов в формировании межгодовой изменчивости крупномасштабной циркуляции вод Северной Атлантики.

**Материалы и методы исследований.** Искомые величины  $\psi_s$  рассчитывались по данным о касательном напряжении ветра (зональная ( $\tau_y$ ) и меридиональная ( $\tau_x$ ) составляющие) в узлах регулярной сетки с пространственным разрешением  $1 \times 1^\circ$ , из массива NOC v 1.1 (Британский океанографический центр, г. Саутгемптон) за период 1980—2005 гг. [23]. Этот массив состоит из двух массивов — COADS v.1a (Comprehensive Ocean — Atmosphere Dataset, 1980—1993) и iCOADS (international Comprehensive Ocean — Atmosphere Dataset, 1993—2005). Значения  $\tau_x$  и  $\tau_y$  получены по данным о составляющих скорости ветра  $u$ ,  $v$  на высоте 10 м над уровнем моря с применением параметризации коэффициента трения  $C_d$ , предложенной Смитом в работе [20].

Выбор массива NOC v 1.1 обусловлен тем, что он основан на данных прямых судовых измерений, поэтому считается на сегодняшний день одним из наиболее достоверных и доступных [6, 14]. Данные массива использованы для расчета среднемесячных значений ротора касательного напряжения ветра за 1980—2005 гг. для акватории всего Мирового океана и интегрального свердруповского переноса на разных широтах в Северной Атлантике.

В работе также использованы среднемесячные значения индекса САК за исследуемый период, полученные Дж. Харрелом по разнице атмосферного давления между Исландским минимумом и Азорским максимумом [24]. (Значения индекса САК ( $>0$  и  $<0$ ) представлены на электронном ресурсе NOAA Climate Prediction Center с 1950 г. по настоящее время.) Индекс САК представляет значительный практический

интерес, поскольку характеризует интенсивность зонального потока в атмосфере во внетропической зоне Северной Атлантики. Наиболее информативно при сравнительном анализе использование индекса САК только для зимних месяцев, поскольку именно на это время приходится максимум потоков явного и скрытого тепла из океана в атмосферу.

Авторами выполнен совокупный анализ вариаций среднемесячных и среднегодовых значений интегрального свердруповского переноса, зонального (квазиширотного) свердруповского переноса и колебаний индекса САК в Северной Атлантике с целью установления взаимных корреляционных связей за период с 1980 по 2005 г.

Значения свердруповского переноса  $\psi_s$  рассчитывались по соотношению Свердрупа [21], которое позволяет по данным о распределении ветра над океаном получить значение полного меридионального переноса массы воды. Ротор касательного напряжения ветра вычисляли на основе исходных значений  $\tau_x$  и  $\tau_y$  по формуле [5]:

$$\text{rot}_z \bar{\tau} = \frac{\partial \tau_y}{\partial \tau_x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial \tau_y},$$

где  $x$ ,  $y$  — расстояние стороны квадрата исходной сетки:  $1,11 \cdot 10^5 \cdot \cos \varphi$  (м) и  $1,11 \cdot 10^5$  м, соответственно,  $\varphi$  — широта.

Интегральные меридиональные значения свердруповского переноса рассчитаны путем интегрирования полученных значений ротора касательного напряжения ветра  $\text{rot}_z \tau$  с учетом конфигурации морских берегов от восточной границы океана  $x_e$  (где значение принималось равным нулю) до западной границы океана  $x_w$  по следующему уравнению [5]:

$$\psi_s = \beta \rho^{-1} \int_{x_e}^{x_w} \text{rot}_z \bar{\tau} dx,$$

где  $\beta$  — изменение параметра Кориолиса с широтой  $\partial f / \partial y = 2\Omega \cos \varphi / r$ ,  $\Omega$  — угловая скорость вращения Земли ( $7,29 \cdot 10^{-5}$ , рад/с),  $r$  — средний радиус Земли (6371, км),  $\rho$  — плотность воды (1025, кг/м<sup>3</sup>).

В результате расчетов для района Северной Атлантики получено распределение среднемесячных значений интегрального меридионального свердруповского переноса  $\psi_s$  в верхнем слое океана от экватора примерно по  $70^\circ$  с.ш. (рис. 1, а,  $1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Положительные значения  $\psi_s$  соответствуют переносу вод во внутренней части круговорота к полюсам, а отрицательные — к экватору. Интегральный свердруповский перенос схематично изображен на рис. 1, б. Здесь значения  $\psi_s$  с обратным знаком соответствуют ветровому компоненту западных пограничных течений — в Восточно-Гренландском, Лабрадорском, Северо-Атлантическом (западнее Ньюфаундлендской банки), Флоридском течениях, Гольфстриме и др. Квазиширотные течения на рис. 1, б показывают ветровую составляющую Северо-Атлантического тече-

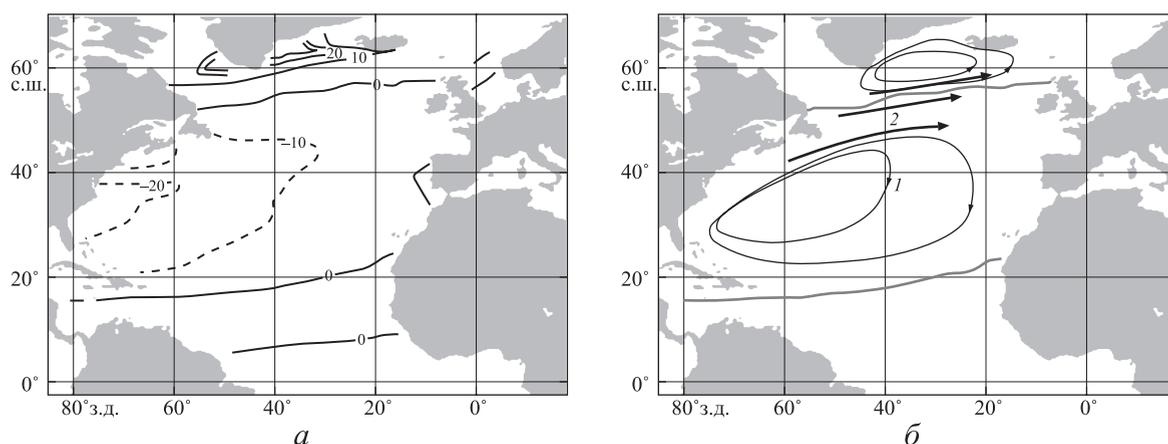


Рис. 1. Среднеголетние значения интегрального свердруповского переноса (Св) в Северной Атлантике, рассчитанные по данным массива NOC v 1.1. (пунктир — изолинии с отрицательной (антициклонической) завихренностью поля ветра) (а), а также схематичное изображение свердруповского переноса (б): 1 — свердруповский перенос во внутренней части бассейна, 2 — квазиширотный свердруповский перенос

ния после прохождения Ньюфаундлендской банки у 50° с.ш., которая численно равна сумме расходов уже в двух круговоротах — субтропическом и субполярном.

**Результаты исследований и их обсуждение. Мери-диональный свердруповский перенос.** Распределение интегральных значений свердруповского переноса вод в океане подчинено единой закономерности: в широтном направлении чередуются области с отрицательными и положительными значениями  $\psi_s$  (области антициклонической и циклонической завихренности). Границы этих областей, представленные изолиниями с нулевыми значениями (рис. 1), являются границами океанических круговоротов. На основе вычисленных среднеголетних значений  $\psi_s$  получено, что тропический циклонический круговорот в Северной Атлантике выражен в пределах ~5–15° с.ш., субтропический антициклонический круговорот расположен с ~15° по 48–50° с.ш. Значения свердруповского переноса здесь отрицательны и сам перенос направлен к экватору во внутренней части круговорота. Максимальное среднеголетнее значение  $\psi_s = -29,8$  Св находится на 33° с.ш. (рис. 2), что согласуется с результатами, полученными в работах [13, 14, 17], в которых максимальное значение  $\psi_s$  получено на 30–33° с.ш. Субполярный циклонический круговорот расположен с 50 по ~60° с.ш., однако его северная граница по соотношению Свердрупа в приполярных районах не может быть определена из-за наличия препятствия — о-ва Гренландия. Судя по рис. 2, максимальное среднеголетнее значение интегрального свердруповского переноса (+18,5 Св) в субполярном круговороте находится на 56° с.ш.

Несмотря на то что в большинстве случаев пространственно-временные характеристики  $\psi_s$ , полученные разными авторами [1, 8, 14, 17], согласуются между собой, количественно оценки свердруповского переноса могут различаться. Такие расхождения обусловлены, во-первых, выбором исходного массива данных (метеорологические, спутниковые, данные ре-

анализа), во-вторых, методикой расчета касательного напряжения ветра  $\tau$  и коэффициента сопротивления  $i$ , в-третьих, применением метода пространственно-временного сглаживания данных. Распределение полученных нами значений  $\psi_s$  для Северной Атлантики несколько отличается от распределения значений свердруповского переноса, приведенных в статье С. Джоси (см. рис. 13 в [14]) по тому же массиву данных. Причина этого заключается в разном подходе при пространственном сглаживании исходных данных.

Нами сглаживание проводилось путем вычисления средних значений полей касательного напряжения ветра по 9 точкам в квадрате 3×3°. При этом, однако, в обеих работах вблизи 30° с.ш. изолинии свердруповского переноса схожи и имеют ярко выраженную С-образную форму с двумя максимумами на ~28 и

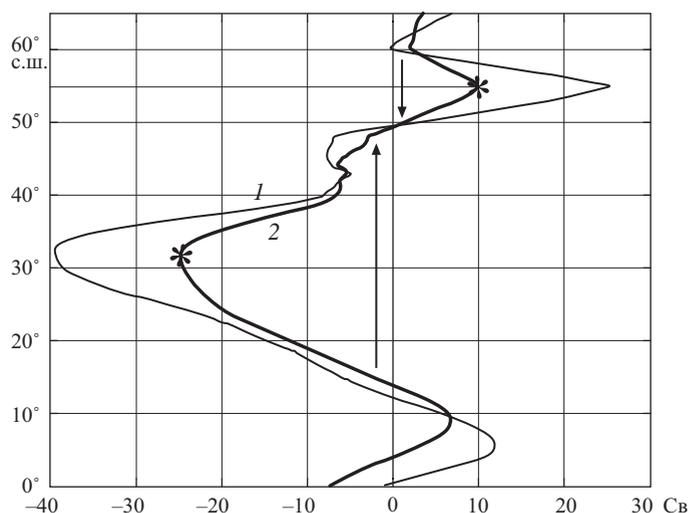


Рис. 2. Распределение среднеголетних интегральных значений свердруповского переноса по широтам в Северной Атлантике: 1 — среднее за январь, 2 — среднегодовое значение. Звездочки — максимумы в субтропическом (~33° с.ш.) и субполярном (~56° с.ш.) круговоротах. Стрелками показано направление компенсационного переноса противоположного направления в западной пограничной области, формирующего квазиширотный поток на восток

~33° с.ш. у западного берега (рис. 1, а также рис. 7 в [8] и рис. 4,  $c-k$  в [22]). Временной ряд среднемесячных значений интегрального свердруповского переноса на 27° с.ш. имеет сходство по структуре с аналогичным рядом, полученным по данным реанализа NCEP за период 1980—2007 гг. (рис. 1 в [6]). По результатам вычислений в обоих массивах максимумы свердруповского переноса (по модулю) наблюдаются для 1981, 1985, 1988, 1998 гг., минимумы — для 1987, 1992, 1993, 2000 и 2006 гг. Среднепогодный свердруповский перенос, вычисленный нами, на  $2,3 \pm 2,7$  Св отличается от результатов, полученных в работе [6]. Это связано прежде всего с различием исходных рядов данных, а также с выбранным методом пространственного сглаживания.

Определить достоверность рассчитанных значений интегрального свердруповского переноса и оценить его долю в суммарном переносе у западной границы можно, сравнив  $\psi_s$  с ежедневными измерениями расхода воды во Флоридском проливе [25]. Среднепогодный расход Флоридского течения, полученный путем осреднения данных за 1982—2005 гг. на 26,75° с.ш., равен  $32,1 \pm 2,5$  Св. Среднепогодное значение  $\psi_s$  на 27° с.ш., рассчитанное по данным массива NOC v 1.1. за период 1980—2005 гг., равно (по модулю)  $22,7 \pm 11$  Св. Таким образом, доля свердруповского переноса в суммарном переносе на 27° с.ш. составляет ~70%. Этот результат согласуется с расчетами У. Шмитца и Т. Таунсенд [18, 22], которые показали, что до ~80% расхода воды во Флоридском проливе может быть обусловлено интегральным свердруповским переносом, оставшиеся 20% — действием термохалинных факторов. Необходимо, например, учитывать существование меридиональной термохалинной циркуляции в Атлантике, при которой около 15—20 Св теплой воды в верхнем слое движется на север, охлаждается в полярных широтах и в результате конвекции формирует глубинный поток на юг с таким же расходом [3]. Следовательно, свердруповскому ветровому переносу верхнего слоя вод в основной части субтропического круговорота должен соответствовать более интенсивный (на 15—20 Св) поток на север в западной пограничной области.

**Зональный свердруповский перенос.** Нами также рассчитаны значения *зонального* свердруповского пе-

реноса (или индекса переноса), как сумма по модулю максимальных значений  $\psi_s$  в субполярном и субтропическом круговоротах по аналогии с индексом бароклинного переноса [9]. Действительно, потоки в западной пограничной области субтропического круговорота направлены на север, в субполярном круговороте — на юг (показаны стрелками на рис. 2). Для поддержания баланса массы, вероятно, на границах двух этих круговоротов должен существовать квазиширотный поток, направленный на восток. По существу, этот зональный поток составляет основу Северо-Атлантического течения восточнее Ньюфаундлендской банки (50° з.д.).

Среднемесячные и среднегодовые значения зонального свердруповского переноса рассчитаны за период с 1980 по 2005 г. Сезонный ход изменчивости полученных величин характеризуется максимумом зимой и минимумом в конце лета (июль, август, сентябрь), второй минимум отмечен в мае. В зимний период значения зонального переноса в ~2,5 раза больше значений, наблюдаемых в летне-осенний период. Судя по рис. 2, среднегодовой зональный свердруповский перенос составляет ~45—50 Св, а в зимний сезон — ~70 Св.

Межгодовая изменчивость величин зонального свердруповского переноса представлена на рис. 3. Типичный размах межгодовых флуктуаций зонального переноса в Северной Атлантике составляет ~20 Св, а его среднепогодная величина равна 48,3 Св. Следует отметить, что за 26 лет средние за год значения увеличились на 9 Св. Минимальное среднегодовое значение отмечено в 1983 г. — 37,3 Св, максимальное — в 2001 г. (60,5 Св). Выявлено также, что зональный перенос характеризуется межгодовой изменчивостью с периодом приблизительно 5—7 лет, при этом максимумы отмечены для 1980, 1987, 1997, 2001 гг.

**Свердруповский перенос и индекс САК.** Нами проанализирована связь зональных переносов в Северной Атлантике с аналогичным показателем для атмосферы. Для этого проведен сравнительный анализ индекса САК, представляющего собой интенсивность зонального переноса в атмосфере в умеренных широтах и квазиширотного свердруповского переноса в поверхностном слое океана. Тестовые расчеты показали, что наиболее эффективное сравнение обеих ве-

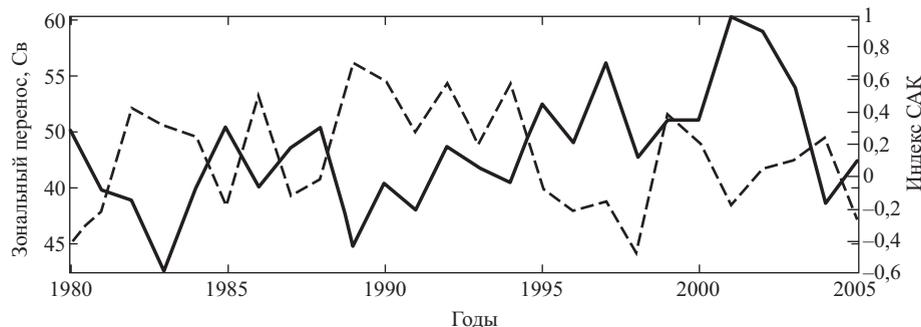


Рис. 3. Межгодовая изменчивость значений зонального свердруповского переноса и индекса САК (пунктир)

личин происходит, если принимать во внимание только данные для зимы, поскольку именно в этот период года они максимальны и наиболее вариативны. Таким образом, сравнение обоих рядов проводилось по среднезимним значениям (декабрь, январь, февраль), предварительно очищенным от многолетнего тренда.

**Значения коэффициента кросс-корреляции ( $r$ ) между зональным свердруповским переносом и индексом САК**

Временной лаг, годы	-3	-2	-1	0	1	2	3
$r$	-0,02	-0,03	0,02	-0,63	0,23	-0,18	0,07

\* Доверительный интервал  $\pm 0,4$ .

В таблице приведены результаты расчетов связи зонального свердруповского переноса и индекса САК. Коэффициент корреляции  $r$  обоих рядов при нулевом временном лаге составил  $-0,63$  (при уровне значимости  $p < 0,05$ ), что указывает на существование заметной обратной взаимосвязи. Судя по величине  $r^2$ , можно сказать, что лишь 40% изменчивости зонального переноса можно объяснить вариативность индекса САК. Сравнение обоих рядов при учете среднемесячных значений за март дает высокую обратную зависимость: коэффициент корреляции равен  $-0,72$  (при уровне значимости  $p < 0,05$ ). Положительные значимые значения коэффициента корреляции  $r \geq 0,45$  (при уровне значимости  $p < 0,05$ ) получены при лидировании индекса САК на 4–5 лет. При анализе данных, представленных на рис. 3, выявлено, что взаимодействие обоих рядов происходит с разной временной периодичностью, так, с 1980 по 1995 г. максимальные значения обоих параметров различаются на 1–2 года, с 1996 по 2000 г. оба ряда совпадают, а с 2001 по 2005 г. они действуют в противофазе. Поэтому при заданных равноновременных сдвигах анализ изучаемых временных рядов не выявил положительной корреляции. Кроме того, отсутствие прямой взаимосвязи обусловлено тем, что зональный перенос в атмосфере определяется у восточной границы океана (Исландия—Азорские о-ва), в то время как зональный свердруповский перенос рассчитывается у западной границы океана.

Следует отметить, что Р. Карри и М. Маккартни [9], сравнив индекс бароклинного переноса (т.е. за счет градиентов плотности воды) с индексом САК без временного сдвига, не получили высоких значений коэффициента корреляции ( $r = 0,32$ ). Эти исследователи выявили, что индекс переноса в некотором роде *следует* за атмосферным индексом циркуляции, т.е. ослабевает после отрицательной фазы индекса САК ( $< 0$ ) и усиливается после положительной ( $> 0$ ), а при лидировании индекса САК на 1–2 года коэффициент корреляции  $r$  составил 0,58.

Ж. Бьеркнесом в 1964 г. [7] выдвинута гипотеза о том, что меридиональный перенос тепла в Атланти-

ческом океане усиливается в те годы, когда ослабевает соответствующий ему меридиональный перенос в атмосфере. То же самое можно предположить и о зональном переносе, тесно связанном с меридиональным, т.е. усиление квазиширотного потока в умеренных широтах Атлантики (в том числе ветрового) должно сопровождаться ослаблением зонального переноса в атмосфере, реализуемого в терминах индекса САК. Эта гипотеза (так называемая компенсация Бьеркнеса) недавно была подтверждена и в рамках анализа результатов глобальной модели циркуляции океан—атмосфера HadCM3: аномалии переноса тепла в атмосфере и в Атлантике имели высокую отрицательную корреляцию вне тропических широт, особенно во временном масштабе нескольких лет и десятилетий [19]. Таким образом, отрицательную корреляцию при нулевом временном сдвиге, представленную в таблице, можно объяснить гипотезой Ж. Бьеркнеса. Однако выдвинутое предположение требует дальнейших исследований. Подчеркнем, что мы исследуем не интегральный зональный перенос в океане, а лишь его ветровую составляющую.

При детальном рассмотрении изменчивости максимальных значений интегрального  $\psi_s$  в обоих круговоротах и индекса САК прямая взаимосвязь между ними не обнаружена. Для Субтропической Атлантики это можно объяснить тем, что Североатлантическое колебание слабо влияет на поле ветра у Западного побережья океана в субтропических широтах [6]. По другим расчетам, атмосферное влияние на субтропический круговорот на межгодовых масштабах определяется распространением долгопериодных баротропных и бароклинных волн Россби, которые в свою очередь также воздействуют на горизонтальную свердруповскую циркуляцию [10]. Циркуляция океана в субполярных широтах, по модельным данным высокого разрешения, не подчиняется относительно простому соотношению Свердрупа и, вероятней всего, сочетает несколько режимов изменчивости [10]. Однако в работах [4, 15] анализ корреляционной зависимости между интегральными значениями  $\psi_s$  и индексом САК вблизи субполярного фронта ( $49^\circ$  с.ш.) показал наличие статистически значимой связи —  $r \approx 0,5$  (при уровне значимости  $p < 0,05$ ).

**Выводы:**

— по данным массива метеорологических данных судовых наблюдений с оптимальным для решаемых задач пространственным разрешением количественно оценены среднемесячные и среднегодовые значения интегрального свердруповского переноса в Северной Атлантике за более чем 25-летний период. Рассчитанное максимальное среднелетнее значение свердруповского переноса составило  $-29,8$  Св в субтропическом круговороте для  $33^\circ$  с.ш., что согласуется с расчетами других авторов;

— рассчитан вклад переноса массы, обусловленного горизонтальной свердруповской циркуляцией, в суммарный меридиональный перенос. По имеющим-

ся фактическим данным расхода воды, во Флоридском проливе на 27° с.ш. его доля составляет ~70%;

— впервые вычислены значения зонального свердруповского переноса как сумма по модулю максимальных значений  $\psi_s$  в субполярном и субтропическом круговоротах. Этот перенос отражает квазиширотный поток ветровой природы, направленный на восток, среднемноголетнее значение которого равно 48,3 Св. Выявлено, что за 26-летний период произошло увеличение его значений на 18,5%;

— сравнительный анализ значений зонального свердруповского переноса с индексом Североатлантического колебания показал, что оба параметра находятся в тесной взаимосвязи, но с обратной корреляцией (в противофазе), коэффициент корреляции  $r = -0,6$ . Следовательно, усиление квазиширотного потока (ветровая составляющая) в умеренных широтах

Атлантики сопровождается ослаблением зонального переноса в атмосфере, реализуемого в терминах индекса САК, что подтверждает гипотезу Ж. Бьеркнеса о взаимной компенсации потоков в океане и атмосфере в Северной Атлантике;

— выполненные нами оригинальные исследования зонального свердруповского переноса могут служить основой для дальнейшего изучения сезонной и межгодовой изменчивости интегрального зонального переноса в Северной Атлантике. Результаты, подтверждающие противофазность изменений зональных потоков в атмосфере и в умеренных широтах Северной Атлантики, заставляют искать механизмы взаимного приспособления полей атмосферного давления и реакции океана на ветровое воздействие. Несомненно, неопределимую помощь в выявлении таких процессов могут дать совместные модели атмосферы и океана.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков В.А. Общая циркуляция Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 253 с.
2. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2012. 297 с.
3. Добролюбов С.А., Соков А.В. Роль глубинных вод Северной Атлантики в изменчивости теплообмена океана и атмосферы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2002. № 6. С. 42—48.
4. Климчук Е.И. Пространственно-временная изменчивость меридионального переноса массы в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. 2013. № 2. С. 65—74.
5. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика: В 2 т. Т. 1. М.: Мир, 1984. 398 с.
6. Atkinson C.P., Bryden H.L., Hirschi J.J.-M., Kanzow T. On the variability of Florida Straits and wind driven transports at 26 °N in the Atlantic Ocean // Ocean Sci. Discuss. 2010. Vol. 7 (2). P. 919—971.
7. Bjerknes J. Atlantic air-sea interaction. Advances in Geophysics. Vol. 10. N.Y.: Academic Press, 1964. P. 1—82.
8. Buning C.W., Isemer H.J. Monthly mean wind stress and Sverdrup transports in the North Atlantic: A comparison of the Hellerman-Rosenstein and Isemer-Hasse climatologies // J. Phys. Oceanogr. 1991. Vol. 21. P. 221—235.
9. Curry R.G., McCartney M. Ocean gyre circulation changes associated with the North Atlantic Oscillation // J. Phys. Oceanogr. 2001. Vol. 31. P. 3374—3400.
10. DiNezio P.N., Gramer L.J. Observed interannual variability of the Florida Current: wind forcing and the North Atlantic Oscillation // J. Phys. Oceanogr. 2009. Vol. 39, N 3. P. 721—736.
11. Godfrey S.J. A Sverdrup model of the depth-integrated flow for the world ocean allowing for island circulations // Astrophys. Fluid Dyn. 1989. Vol. 45. P. 89—112.
12. Griffies S.M., Buning C., Bryan F.O. et al. Developments in ocean climate modeling // Ocean Modeling. 2000. Vol. 2. P. 123—192.
13. Hellermann S., Rosenstein M. Normal monthly wind stress over the World Ocean with error estimates // J. Phys. Oceanogr. 1983. Vol. 13. P. 1093—1107.
14. Josey S.A., Kent E.A., Taylor P.K. Wind Stress forcing of the Ocean in the SOC Climatology: comparisons with the NCEP-NCAR, ECMWF, UWM/COADS, and Hellermann-Rosenstein Datasets // J. Phys. Oceanogr. 2002. Vol. 32. P. 1993—2019.
15. Kelly K.A. Heat and mass transport anomalies in the Gulf Stream region. URL: <http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/OSTST/2007/kelly.pdf> (дата обращения: 16.02.2013).
16. Leetmaa A., Niiler P., Stommel H. Does the Sverdrup relation account for the mid-Atlantic circulation? // J. Mar. Res. 1977. Vol. 35. P. 1—10.
17. Mayer D.A., Weisberg R.H. A description of COADS surface meteorological fields and the implied Sverdrup transports for the Atlantic Ocean from 30 °S to 60 °N // J. Phys. Oceanogr. 1993. Vol. 23. P. 2201—2221.
18. Schmitz W.J., Richardson P.L. On the sources of the Florida Current // Deep Sea Res. 1991. Vol. 38. P. 379—409.
19. Shaffrey L., Sutton R. Bjerknes compensation and the decadal variability of the energy transports in a coupled climate model // J. of Climate. 2006. Vol. 19. P. 1167—1181.
20. Smith S.D. Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds // J. Phys. Oceanogr. 1980. Vol. 10. P. 709—726.
21. Sverdrup H.U. Wind-driven currents in the barotropic ocean with application to the equatorial currents of the Eastern Pacific // Proc. Nat. Acad. Sci, USA. 1947. Vol. 11. P. 318—326.
22. Townsend T.L., Hurlburt H.E., Hogan P.J. Modeled Sverdrup flow in the North Atlantic from 11 different wind stress climatologies // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2000. Vol. 32. P. 373—417.
23. National Oceanographic Center, UK. URL: <http://www.noc.soton.ac.uk> (дата обращения: 11.10.2008).
24. Climate Prediction Center, NOAA, USA. URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov> (дата обращения: 15.03.2011).
25. AOML Physical Oceanography Division, NOAA, USA. URL: <http://www.aoml.noaa.gov/phod/floridacurrent/index.php> (дата обращения: 21.04.2012).

---

S.A. Dobrolyubov, E.I. Klimchuk

SVERDRUP TRANSPORT IN THE NORTH ATLANTIC

Monthly values of the latitudinal mass transport in the North Atlantic based on the Sverdrup relation are analyzed. A continuous wind stress dataset NOC v 1.1 with a spatial resolution of  $1 \times 1^\circ$  for the period of 1980—2005 is used as a basic data. Estimates of the Sverdrup transport values in the area of subtropical gyre showed the maximum of mean annual Sverdrup transport values ( $-29,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) on  $33^\circ \text{N}$ . The quasi-latitudinal (zonal) barotropic wind transport values were calculated as a summation of maximum Sverdrup transport values in subtropical and subpolar gyres, and their seasonal and interannual variability was examined. The correlation analysis of the annual values of zonal transport and NAO index indicates a significant inverse correlation ( $r = -0,6$ ), which confirms the Bjerknes' compensation theory suggesting that transports in the ocean and the atmosphere covariate in an out-of-phase manner in the North Atlantic region.

*Key words:* Sverdrup transport, interannual variability, North Atlantic Oscillation (NAO), North Atlantic.