

УДК 465.551

Г.Ф. Джиганшин, к.г.н., А.Б. Полонский, д.г.н.

Морской гидрофизический институт НАН Украины

МНОГОМАСШТАБНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАСХОДОВ ГОЛЬФСТРИМА

На основе современной базы океанографических данных вычислены и проанализированы ряды текущих месячных и среднегодовых геострофических расходов Гольфстрима в 1950 – 2004 гг. Получен значимый (на 90- 95% уровне) положительный линейный тренд среднемесячных расходов Гольфстрима. Он проявляется и в увеличении среднегодовых расходов (на 13 Св за указанный период). Дан статистический прогноз изменения расходов Гольфстрима, согласно которому в период с 2005 по 2015 гг. расход Гольфстрима уменьшится приблизительно на 7 Св (по сравнению с величиной его расхода в 2004 г).

Ключевые слова: расходы Гольфстрим, сезонная и межгодовая изменчивость расходов

Введение

Одна из главных проблем в изучении долгопериодной изменчивости климатической системы связана с адекватным описанием ее океанической компоненты. Решению этой проблемы было посвящено несколько программ по изучению циркуляции Мирового океана, выполненных в 80-90-е годы прошлого столетия. Среди них можно выделить программу РАЗРЕЗЫ, WOCE (World Ocean Circulation Experiment) и программу по изучению субтропической циркуляции в Северной Атлантике – STACS (Subtropical Atlantic Circulation Study). Особое внимание при этом уделялось западным пограничным течениям Северной Атлантики, в частности системе Гольфстрим - Североатлантическое течение. Это обусловлено тем обстоятельством, что низкочастотная изменчивость океанологических характеристик, наблюдаемая в этом звене циркуляции Северного субтропического антициклонического круговорота, несущего тепло низких широт на север, представляет собой один из основных факторов, обуславливающих аномалии климата в Европе. На это указывалось во многих работах, в том числе – и в работе В.Ф.Суховой [1]. Необходимо подчеркнуть основополагающий характер этой монографии, содержащий подробное описание характеристик и механизмов изменчивости гидрологических полей Атлантического океана на различных пространственно-временных масштабах.

Авторы многих публикаций, касающихся низкочастотной изменчивости характеристик Гольфстрима, приходят к заключению об ослаблении системы Гольфстрим – Североатлантическое течение в последние десятилетия. На это, например, настаивает группа исследователей из британского Национального океанографического центра в Саутгемптоне (National Oceanography Centre, Southampton) под руководством Гарри Брайдена [2,3]. По их мнению, интенсивность Гольфстрима в последнее время ослабла почти на 30%. Аналогичный результат был получен и на основе данных, собранных ранее американским Национальным управлением по океанам и атмосфере (NOAA) [4].

Вместе с тем имеются и публикации, говорящие об обратном. В частности, данные, приведенные в работе [5], указывают на то, что индекс бароклинного переноса системы Гольфстрим – Североатлантическое течение во второй половине прошедшего столетия (по крайней мере, начиная с конца 60-х годов) характеризуется положительным трендом. Так, по данным цитируемой работы, разница между минимальными и максимальными значениями расходов в системе Гольфстрим, которые имели место соответственно в начале 70-х годов и середине 90-х, составляли 20 Св.

Следует в связи с этим отметить, что судить о проявлениях аномальности любого звена циркуляции (в том числе и Гольфстрима) можно лишь имея статистически обеспеченный ряд характеристик этого звена циркуляции, полученный

за относительно длительный (в климатическом смысле) промежуток времени, поскольку шумы и методические погрешности разного типа могут быть достаточно большими.

Цель настоящей работы заключалась в вычислении рядов текущих среднегодовых и среднемесячных расходов Гольфстрима за период с 1950 по 2004 гг. по наиболее обеспеченному наблюдениями историческому массиву данных, выявлении характера изменчивости его расходов на межгодовом масштабе, а также прогнозе изменения расходов на последующее после 2004 г. десятилетие.

Исходные данные и методика вычислений

В работе использовалась одна из наиболее полных (из существующих на сегодняшний день) баз океанографических данных [6]. По этим данным на океанографических разрезах, ориентированных по нормали к основному потоку Гольфстрима, по геострофическим соотношениям вычислялись скорости течения. Затем, путем интегрирования скоростей течения, заключенных между нулевыми изотаксами, вычислялись текущие среднемесячные и среднегодовые величины расходов.

Использование геострофических соотношений предполагает наличие информации о вертикальном распределении плотности морской воды, которая вычисляется по данным о распределении температуры и солёности. Известно, что регион Гольфстрима - один из районов Мирового океана, наиболее обеспеченный данными океанографических измерений. Между тем, анализ пространственно-временного распределения STD-станций показывает, что их количества явно недостаточно для того, чтобы для каждого текущего месяца (и даже года) в период с 1950 по 2004 гг. (лучше всего обеспеченный наблюдениями) построить океанографические разрезы, секущие Гольфстрим по нормали к основному потоку. В результате оказывается невозможным провести статистически значимый анализ межгодовой изменчивости расходов Гольфстрима. Один из возможных путей решения этой проблемы – дополнение массива STD-станций данными ХВТ измерений, которые выполняются на регулярной основе, в том числе, коммерческими судами на одной из наиболее судоходных линий, соединяющих Западную Европу с восточным побережьем США. Однако, ХВТ данным свойственны известные недостатки, а именно: меньшая по сравнению с океанографическими данными глубина зондирования, а также отсутствие информации о солёности. Поэтому для решения поставленной задачи потребовалось ответить на вопрос, возможно ли в принципе получить репрезентативную информацию о геострофических течениях, используя поле плотности в слое 0-800 м и вычисленное без учета солёности?

Для ответа на поставленный вопрос были выполнены тестовые расчеты, суть которых заключалась в сопоставлении рядов ($S_{TS,2000}$), представляющих собой геострофические расходы, вычисленные от отсчетной поверхности 2000 м, и рядов ($S_{T,400}, S_{T,600}, S_{T,800}$), представляющих расходы Гольфстрима, вычисленные соответственно от отсчетных поверхностей 400, 600 и 800 м. Во всех случаях использовался один и тот же массив STD-данных. Плотность воды определялась по формуле ЮНЕСКО, однако, при вычисления рядов ($S_{T,400}, S_{T,600}, S_{T,800}$) солёность принималась равной нулю. Более подробное описание алгоритма и процедуры вычислений приведено в [7].

Сопоставление рядов ($S_{TS,2000}$), представляющих собой геострофические расходы Гольфстрима, вычисленные от отсчетной поверхности 2000м с учетом температуры и солёности, и рядов ($S_{T,400}, S_{T,600}, S_{T,800}$), вычисленных от

перечисленных выше отсчетных поверхностей без учета солености показало, что между рядами ($S_{TS,2000}$) и ($S_{T,800}$) существует хорошая линейная связь, выражаемая уравнением регрессии $S_{TS} = 2.03006 \cdot S_T - 16.9526$ (рис.1). Это позволило привлечь данные ХВТ станций и, используя приведенное уравнение регрессии, получить более полный ряд текущих значений расходов Гольфстрима.

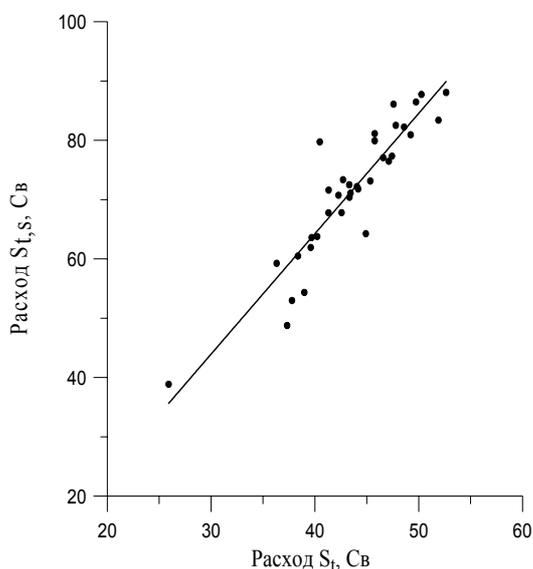


Рис.1 - Регрессионная связь величин $S_{TS,2000}$ и $S_{T,800}$.

Наряду с проблемой, связанной с общей нехваткой данных STD станций, имеется и вторая, не менее важная проблема, связанная с репрезентативностью результатов сопоставления расходов Гольфстрима, полученных по разрезам, выполненным в различных структурных зонах течения. В работе [8] показано, что с учетом пространственно-временного распределения имеющихся STD и ХВТ данных, а также особенностей пространственно-временной изменчивости кинематической структуры самого Гольфстрима, судить о его межгодовой изменчивости целесообразнее всего на основе рядов $S_{T,800}$, вычисленных для участка течения, заключенного приблизительно между 65° и 70° з.д. Необходимость соблюдения этого требования выдвинуло очередную проблему, которая заключается в следующем.

Как уже говорилось выше, несмотря на максимальную (по сравнению с другими регионами Мирового океана) обеспеченность данными зондирования, географическое расположение STD и ХВТ станций носит случайный характер, и выбрать единый океанографический разрез, для которого можно было бы получить достаточно представительный (в статистическом смысле) ряд $S_{T,800}$, к сожалению, не представляется возможным. Поэтому использовалась следующая процедура.

1. Для каждого текущего месяца из интервала 1950 – 2004 гг. строилась совместная карта распределения STD и ХВТ станций и динамическая топографии поверхности океана, вычисленная по распределению температуры на этих станциях от отчетной поверхности 800 м.
2. Выделялись океанографические станции, расположенные на разрезах, секущих по нормали поток Гольфстрима вблизи 70° з.д.
3. Далее от отчетной поверхности 800 м вычислялись составляющие скорости, нормальные по отношению к выбранному разрезу. При этом соленость в уравнении состояния морской воды принималась равной нулю.

4. Путем интегрирования скоростей потока, заключенных между нулевыми изотопами определялся расход $S_{T,800}$.

5. И, наконец, по формуле $S_{Гольфстрима} = 2.03006 \cdot S_{T,800} - 16.9526$ определялось текущее среднемесячное значение расхода Гольфстрима.

Реализация изложенного алгоритма позволила получить ряд из 170 текущих месячных значений расходов Гольфстрима $\{S_{год,мес}\}$, охватывающий период с 1950 по 2004 гг. Далее, путем выборки значений $S_{год,мес}$ для каждого месяца года и последующего их осреднения, вычислен ряд среднесезонных месячных значений $\{\bar{S}_{мес}\}$, позволяющий уточнить характеристики сезонной изменчивости Гольфстрима. И, наконец, путем осреднения значений $S_{год,мес}$ в пределах каждого текущего года были вычислены среднегодовые значения расходов Гольфстрима $\{\bar{S}_{год}\}$ (43 значения). Ряды $\{S_{год,мес}\}$ и $\{\bar{S}_{год}\}$ используются для получения представлений об изменчивости расходов Гольфстрима на межгодовом и декадном масштабах.

Сезонные, межгодовые и более низкочастотные колебания расхода Гольфстрима в 1950 - 2004 гг.

Среднесезонные месячные расходы Гольфстрима в окрестности 70° з.д. варьируют в пределах 94-99.5 Св при среднесезонном значении 96 Св (табл.1, рис.2). Максимум расходов наблюдается в конце зимы – начале весны (февраль – март), а минимум – в конце осени (октябрь – ноябрь). Этот результат принципиально согласуется с известными литературными данными (см., например, [4]). Амплитуда сезонных вариаций расходов Гольфстрима не превышает 2 Св.

Таблица 1 - Статистические характеристики сезонных и межгодовых вариаций Гольфстрима

Месяц года	$\bar{S}, \text{Св}$	$\sigma^2, \text{Св}^2$	$\sigma, \text{Св}$	$\sigma_{trend}^2, \text{Св}^2$	$\sigma_{detrend}^2, \text{Св}^2$	$\sigma_{trend}^2 / \sigma^2$	$\delta_{trend,55}, \text{Св}$
I	96.44	51.74	7.19	0.47	51.27	0.01	3.81
II	99.45	42.96	6.55	3.86	39.10	0.09	8.08
III	96.51	26.11	5.11	0.12	25.99	0.00	-1.90
IV	98.19	205.79	14.35	121.90	83.90	0.59	52.00
V	96.83	104.26	10.21	1.93	102.34	0.02	5.85
VI	96.58	132.83	11.53	0.57	132.26	0.00	3.13
VII	93.74	61.38	7.83	2.87	58.51	0.05	6.14
VIII	97.18	175.56	13.25	57.92	117.65	0.33	28.91
IX	93.93	81.19	9.01	1.51	79.68	0.02	5.07
X	95.10	184.32	13.58	12.70	171.62	0.07	13.43
XI	94.18	122.13	11.05	24.31	97.82	0.20	23.42
XII	94.42	113.90	10.67	0.35	113.55	0.00	-2.35
Полн.ряд за 1950-2004 гг	96.03	121.28	11.01	10.27	111.01	0.08	13.07

Это дает возможность использовать для оценки изменчивости среднегодовых расходов даже те годы, в которые сезонный ход плохо разрешается (т.е. наблюдения выполнены только в отдельные месяцы), поскольку амплитуда межгодовых колебаний существенно превышает 2 Св.

Судя по аппроксимирующей кривой в период зимней интенсификации Гольфстрима общая дисперсия детрендрованных рядов ($\overline{S}_{мес}$) минимальна (около 30 Св^2), и наоборот, в период летне-осеннего ослабления Гольфстрима она возрастает (до более чем 170 Св^2).

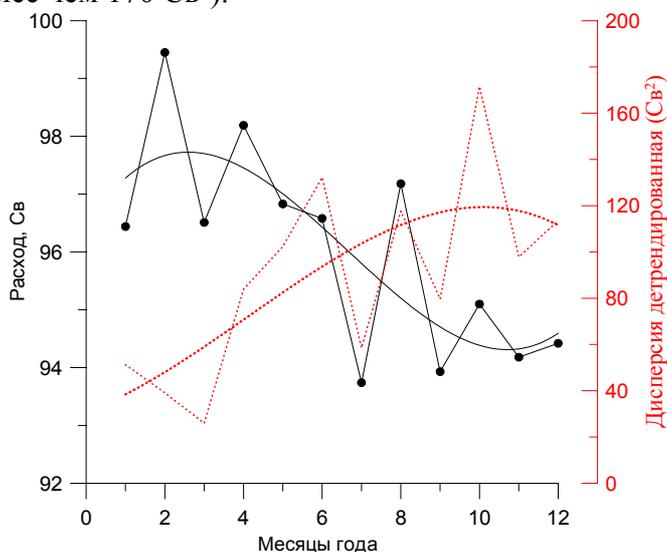


Рис.2 - Внутригодовые изменения среднегодовых месячных расходов Гольфстрима в окрестностях 70° з.д. и дисперсия детрендрованного ряда. Плавные кривые – аппроксимация рядов полиномом 3-й степени.

На рис.3а и 3б показаны текущие значения среднемесячных и среднегодовых расходов Гольфстрима в окрестности 70° з.д. за период 1950 – 2004 гг. и рассчитанный методом наименьших квадратов линейный тренд. Судя по поведению кривых, межгодовые колебания расходов Гольфстрима представляют собой суперпозицию колебаний с периодами приблизительно от 2-х до 20-ти лет, причем основная доля низкочастотной изменчивости приходится на периоды близкие к 20 годам (пунктирная кривая на рис.3б). Видно, что линейный тренд положителен, увеличение среднегодового расхода Гольфстрима за весь указанный период составляет 13 Св (табл.1), что не подтверждает утверждений об ослаблении Гольфстрима, имеющих место в литературе [2,3]. Отметим, что этот наш результат очень хорошо согласуется с результатом, полученным в работе [5]. Для иллюстрации сказанного на рис.3в приведен график межгодовых флуктуаций индекса бароклинного переноса в системе Гольфстрим – Североатлантическое течение, полученный в этой работе.

О значимости тренда можно судить по величине $\frac{\sigma_{trend}^2}{\sigma^2}$ (где σ_{trend}^2 - дисперсия, обусловленная этим трендом, σ^2 - суммарная дисперсия) и по общему количеству независимых оценок расходов. Как видно из табл. 1, на положительный тренд приходится приблизительно 8% общей изменчивости среднегодового расхода Гольфстрима, что, при имеющемся количестве независимых оценок, свидетельствует о значимой (на 95% доверительном уровне) величине тренда. Судя по аппроксимирующей кривой, приведенной на рис.3а, положительный тренд в расходах Гольфстрима наблюдается приблизительно с начала 60-х годов.

Данные табл.1 показывают, что при средней величине дисперсии тренда, равной $\sim 10 \text{ Св}^2$, имеет место значительный разброс дисперсий трендов по месяцам года (от значений, близких к нулевым, до $\sim 120 \text{ Св}^2$).

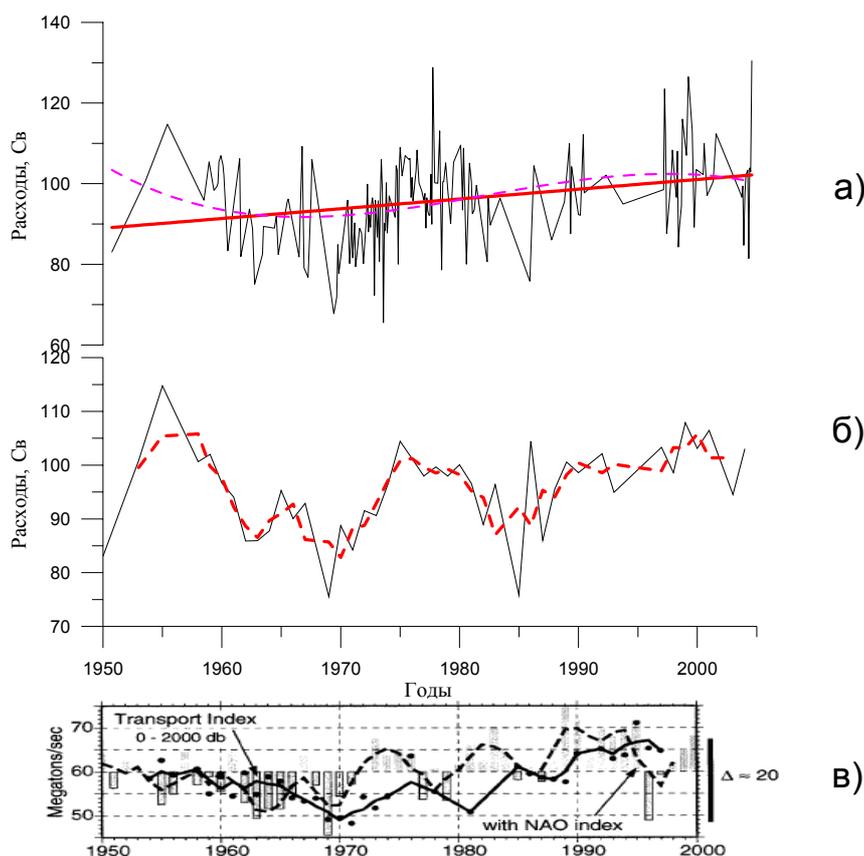


Рис.3 - Текущие значения среднемесячных (а) и среднегодовых (б) расходов Гольфстрима в окрестности 70° з.д. за период 1950 – 2004 гг., вычисленные в настоящей работе, индекс геострофического переноса в системе Гольфстрим – Североатлантическое течение и индекс Североатлантического колебания по данным работы [5] (в). Прямая линия на рис.3а – линейный тренд, плавная кривая на рис.3а – аппроксимация трендов полиномом 4-й степени. Прерывистая линия на рис. 3б – результат пятиточечного сглаживания.

Наибольшие величины дисперсий трендов, характеризующей его значимость, приходятся на апрель, август и ноябрь (120Св^2 , 58Св^2 , 24Св^2 соответственно). Оценка статистической значимости трендов показывает, что линейные тренды расходов Гольфстрима в эти месяцы значимы на 90-95% доверительном уровне. Значимость трендов, полученных для других месяцев года, не превышает 90%-ного уровня. Тем не менее, тренд среднегодовых расходов Гольфстрима, на наличие которого обращено внимание выше, статистически значим. Необходимо вместе с тем подчеркнуть, что фактически выделенный линейный тренд скорее характеризует усиление переносов в Системе Гольфстрим - Североатлантическое течение, связанное с квазипериодической Атлантической мультидекадной осцилляцией (АМО), типичный период которой (50-75 лет) превышает длину анализируемого ряда. На это указывают результаты многочисленных работ последних лет, посвященных анализу АМО (см. работу [10] и библиографию в ней) и временной ход расходов Гольфстрима, приведенный на рис. 4. Результаты прогноза изменений расходов Гольфстрима, описание которого содержится в следующем разделе, также не противоречит этому утверждению.

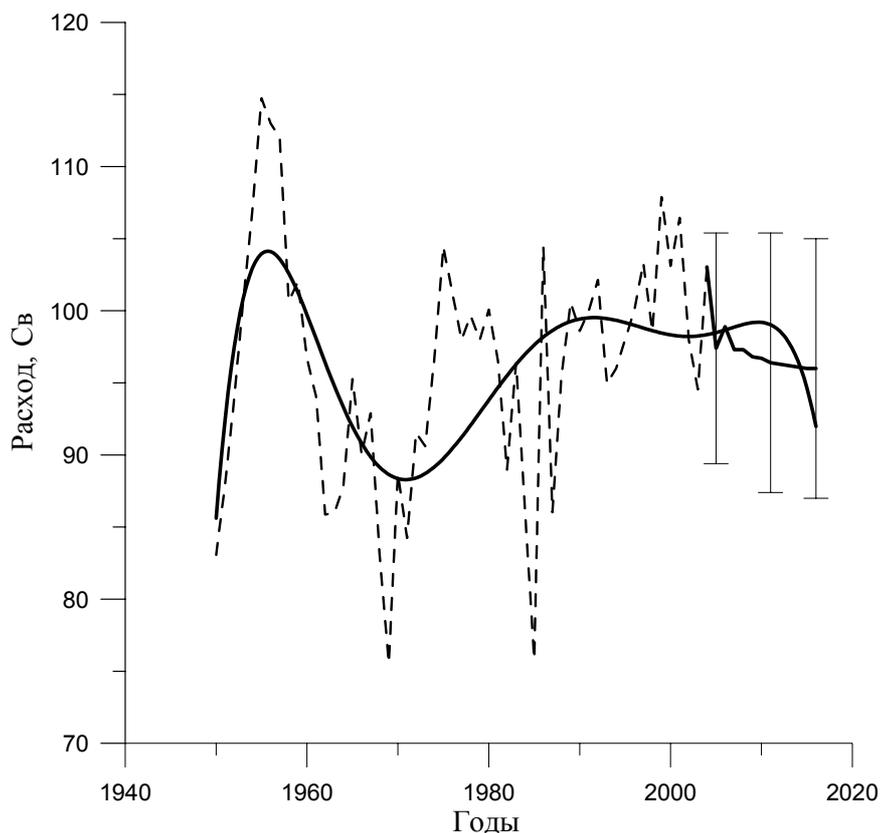


Рис.4 - Текущие среднегодовые значения расходов Гольфстрима за период 1950-2004 гг (пунктирная линия) и прогноз на следующее десятилетие, вычисленный по модели AR2 (сплошная толстая кривая). Вертикальные линии – 90% доверительный уровень прогноза. Сглаженная кривая – полиномиальные тренды 6-го порядка.

Прогноз колебаний расходов Гольфстрима на период 2005-2015 гг

Получив пятидесятилетние ряды $\{S_{год,мес}\}$ и $\{\bar{S}_{год}\}$, мы попытались спрогнозировать изменчивость расходов Гольфстрима на следующее после 2004г. десятилетие, пользуясь разработанными статистическими методами. В частности, была использована авторегрессионная модель второго порядка (AR2), имеющая следующий вид

$$\bar{S}_{год} = \bar{S} + a\bar{S}_{год-1} + b\bar{S}_{год-2} + \gamma,$$

где индекс $год$ относится к расходам Гольфстрима для прогнозируемого года, а индексы $год - 1$, $год - 2$ – соответственно два предыдущих двух лет; γ - белый шум.

Подбор коэффициентов модели \bar{S}, a, b осуществлялся с помощью стандартного алгоритма минимизации γ . Полученная таким образом прогностическая формула имеет вид

$$\bar{S}_{год} = 95.82 + 0.2822\bar{S}_{год-1} + 0.3655\bar{S}_{год-2}.$$

Результаты прогноза представлены на рис. 4, из которого следует, что расходы Гольфстрима с 2005 по 2015 гг. уменьшаться. Вероятная величина этого уменьшения составит ~ 7 Св.

Выводы

Среднегодовое месячные геострофические расходы Гольфстрима в окрестности 70° з.д. в период с 1950 по 2004 гг. варьируют в пределах 99 – 94 Св при среднегодовом значении 96 Св. Максимум расходов наблюдается в конце зимы – начале весны (февраль – март), а минимум – в конце осени (октябрь – ноябрь). Амплитуда годовых вариаций – 2 Св.

В период зимней интенсификации Гольфстрима общая дисперсия расходов минимальна (около 40 Sv^2), и наоборот, в период летнее – осеннего ослабления Гольфстрима общая дисперсия его расходов возрастает до 120 Sv^2 .

Получен положительный линейный тренд текущих среднегодовых расходов Гольфстрима за период с 1950 по 2004 г., что проявляется в значимом (на 90% уровне) увеличении расхода Гольфстрима за указанный период на 13 Sv . Этот тренд характеризует усиление переносов в Системе Гольфстрим - Североатлантическое течение, связанное с квазипериодической Атлантической мультидекадной осцилляцией, что подтверждается временным ходом расходов Гольфстрима и статистическим прогнозом изменения расходов Гольфстрима, указывающим на его ослабление между 2004 и 2015 г. ($\sim 7 \text{ Sv}$).

Список литературы

1. Суховой В.Ф. Изменчивость гидрологических условий Атлантического океана. «Наукова думка», Киев, 1977, 215 с.
2. Bryden H., M. Alvarez, F. F. Perez and A. F. Rios. «Physical and biogeochemical transports structure in the North Atlantic subpolar gyre»; *Journal Of Geophysical Research*, 109. 2004; C03027, doi:10.1029/2003JC002015.
3. Bryden, H., J. Marotzke, W. Johns and S. Cunningham. 2004. «An array to monitor the North Atlantic meridional overturning circulation at 26N», *Geophysical Research Abstracts*, 6, 05991.
4. Programme of NOAA Research: The GULFSTREAM-IV, www.publicaffairs.noaa.gov/grounders/pdf/gulfstream.pdf
5. Curry R.G. and McCartney M.S. Ocean Gyre Circulation Changes Associated with the North Atlantic Oscillation. // *Journal of Physical Oceanography*, 2001, vol. 31, pp.3374 – 34*00.
6. Boyer T.P., Antonov J.I., Garcia D.R., Johnson D.R., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Pitcher M.T., Baranova O.K., Smoliar I.V., 2000. World Ocean Database 2005. S Levitus, Ed., NOAA Atlas NESDIS 60, U.S. Government / <http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/ODV>, 2001.
7. Джиганшин Г.Ф., Полонский А.Б., Крашенинникова С.Б. Влияние межгодовой изменчивости поля ветра в Северном субтропическом круговороте на расходы Гольфстрима. // Системы контроля окружающей среды. Севастополь, 2006. – С.296-299.
8. Джиганшин Г.Ф., Полонский А.Б. Низкочастотная изменчивость расходов Гольфстрима: описание и механизмы // *Морской гидрофизический журнал*, 2009 (принята к печати).
9. Стоммел Г., Гольфстрим. Физическое и динамическое описание. Москва, 1963. Изд-во иностранной литературы, 263с.
10. Полонский А.Б. Роль океана в изменениях климата. Киев. Наукова Думка. 2008, 184 стр.

Багатомасштабна мінливість витрат Гольфстріму. Джиганшин Г.Ф., Полонский А.Б.

На основі сучасної бази океанографічних даних обчислені і проаналізовані ряди поточних місячних і середньорічних геострофічних витрат Гольфстріму в 1950 – 2004 рр. Одержаний значущий (на 90- 95% рівні) позитивний лінійний тренд середньомісячних витрат Гольфстріму. Він виявляється і в збільшенні середньорічних витрат (на 13 Sv за вказаний період). Даний статистичний прогноз зміни витрат Гольфстріму, згідно якому в період з 2005 по 2015 рр. витрата Гольфстріму зменшиться приблизно на 7 Sv (в порівнянні з величиною його витрати в 2004 р).

Ключові слова: витрати, Гольфстрім, сезонна і міжрічна мінливість витрат

Multiscale variability of Gulf Stream transport.

Dzhiganshin G., Polonsky A.

Using recent oceanographic database, monthly and annual geostrophic Gulf Stream transports for 1950 – 2004 have been calculated and analysed. Positive linear trend (significant at 90-95% confidence level) of average monthly charges of Gulf Stream is received. It is manifested in trend of annual transport too (increasing of annual transport is 13 Sv for indicated period). The statistical forecast of Gulf Stream transport for 2005-2015 has been done. It is predicted that the Gulf Stream transport will decrease between 2005 and- 2015 by $\sim 7 \text{ Sv}$.

Keywords: Gulf Stream transport, seasonal and interannual variability of the transports.