

УДК 551.465

## ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТАРКТИЧЕСКОЙ ДОННОЙ ВОДНОЙ МАССЫ В СУБТРОПИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

© 2021 г. С. Б. Крашенинникова<sup>1, \*</sup>, А. Н. Демидов<sup>2</sup>, А. А. Иванов<sup>2</sup><sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение Федеральный исследовательский центр Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, (ФИЦ ИнБЮМ), Москва, Россия<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, (МГУ), Географический факультет, Москва, Россия

\*e-mail: svetlanabk@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 04.08.2020 г.

Принята к публикации 20.11.2020 г.

В работе выполнена оценка изменчивости переноса и потенциальной температуры Антарктической донной водной массы (ААДВ) на внутригодовом и межгодовом масштабах на основе восьми реанализов 26° с.ш. в субтропической части Атлантики. Лучшее соответствие показали реанализы GLORYS2v4, GLORYS12v1, дающие самые близкие результаты оценок переносов ААДВ, рассчитанных ниже 5000 м, и их изменчивости с RAPID. Выявлено, что сезонный цикл переноса ААДВ за 2004–2015 гг. описывается суперпозицией годовой и полугодовой гармоник на ~80% с амплитудой ~0.4 Св, с максимумами в апреле и октябре, минимумами – в феврале и июле. Внутригодовой цикл хода температуры описывается годовой гармоникой, вклад которой в изменчивость составляет более 70%, с максимумом весной, минимумом осенью и амплитудой ~0.003°C. Выделены характерные периоды изменчивости переноса и потенциальной температуры ААДВ 12 и 6 лет с максимумами в 2009 и 2014 гг. и минимумами в 2006 и 2011 гг. по реанализам ORAS5, GLORYS2v4 и оценкам RAPID. Амплитуда межгодовых колебаний этих параметров в слое ААДВ по реанализам ORAS5, GLORYS2v4, GLORYS12v1 составила ~0.6 Св и ~0.01°C соответственно. Анализ долговременных тенденций среднегодовых переносов ААДВ показал их увеличение на 0.2 Св по реанализам, разрезам и данным RAPID при незначительном уменьшении температуры на –0.04°C за 2004–2015 гг.

**Ключевые слова:** перенос, внутригодовая изменчивость, межгодовая изменчивость, долговременные тенденции, океанические реанализы, RAPID, разрезы, водная масса, Антарктическая донная водная масса

DOI: 10.31857/S003015742102009X

### ВВЕДЕНИЕ

Антарктическая донная водная масса (ААДВ) формируется, главным образом, в морях Уэдделла и Росса в результате смешения Антарктических шельфовых вод и Нижних циркумполярных глубинных вод. Механизмы ее формирования и распространения подробно описаны в обзорах [4, 21]. ААДВ распространяется на север в абиссальной зоне западной части Атлантического океана до района Ньюфаундлендской банки [20, 21]. В Североамериканскую котловину эти воды проникают через Экваториальный канал. При этом наиболее плотная часть антарктических вод с потенциальной температурой ( $\theta$ ) менее 1°C через Экваториальный канал проникать не может [27]. В районе разлома Вима (на 11° с.ш) поток разделяется: часть антарктических вод идет через этот разлом, а часть – на север Гвианской котловины. По оценке [10, 23], из 1.4 Св, проходящих через

Экваториальный канал, 0.9–1.1 Св идут через разлом Вима в восточную часть Атлантики, тогда как далее в западной ее части остается лишь 0.3 Св. В некоторых работах получены оценки переносов ААДВ на восток через разломы тропической и экваториальной Атлантики с использованием данных доплеровского профилографа (LADCP) 1.6–2.7 Св [8, 21] и результатов численного моделирования 1.0–1.1 Св [11, 19].

Исследованию внутригодовой изменчивости переносов и температуры ААДВ в Экваториальной Атлантике по данным прямых измерителей течений посвящено незначительное количество работ [14, 26]. Эти работы свидетельствуют о сильной сезонной изменчивости переноса от 0.2 Св в феврале–марте до 3.1 Св в сентябре–октябре.

Имеются работы, в которых также анализировалась межгодовая изменчивость переносов и температуры ААДВ и их долговременные тенден-

**Таблица 1.** Характеристика используемых океанических реанализов для расчета меридиональных переносов ААДВ и температуры в Субтропической Атлантике

| Реанализ   | Рассматриваемый период, гг. | Использованные параметры | Дискретность шир. × дол.       | Переменные/ модели/атмосфера   | Горизонты ниже 5000 м        |
|------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| ECCO2      | 1992–2001                   | $V$                      | $1^\circ \times 1^\circ$       | 3D/MIT/NCEP                    | 5039, 5461, 5906             |
| SODA2.2.4  | 1992–2008                   | $V, \theta$              | $0.5^\circ \times 0.5^\circ$   | 3D/POP/ERA40                   | 5125, 5375                   |
| GECCO2     | 1992–2015                   | $V$                      | $1^\circ \times 1^\circ$       | 4D/MIT/NCEP                    | 5039, 5461, 5906             |
| ORAS3      | 1992–2011                   | $V$                      | $1^\circ \times 1^\circ$       | 3D/HOPE/ERA40                  | 5050, 5250                   |
| ORAS4      | 1992–2015                   | $V, \theta$              | $1^\circ \times 1^\circ$       | 3D/NEMO/ERAInterim             | 5050, 5250                   |
| ORAS5      | 1992–2015                   | $V, \theta$              | $1^\circ \times 1^\circ$       | 3D/NEMO/ERA40                  | 5089, 5291, 5494, 5698, 5902 |
| GLORYS12v1 | 2004–2015                   | $V, \theta$              | $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ | 3D/NEMO/ERAInterim             | 5274, 5500                   |
| GLORYS2v4  | 2004–2015                   | $V, \theta$              | $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ | 3D/NEMO/ERAInterim             | 5089, 5291, 5494, 5698       |
| EN4.2      | 1992–2017                   | $\theta$                 | $1^\circ \times 1^\circ$       | Объект. интерп./ без атмосферы | 5050, 5350                   |

ции [1, 5, 16, 26]. В работе [14] показано увеличение температуры в Экваториальном канале за 1992–1994 гг., а в [17] за 1999–2003 гг. обнаружено ее уменьшение на  $-0.002^\circ\text{C}/\text{год}$ . Таким образом, до сих пор существуют разные мнения об оценках изменчивости характеристик переноса и потенциальной температуры ААДВ на разных временных масштабах. Использование океанических реанализов, регулярных по пространству и времени, охватывающих наблюдениями слой океана от поверхности почти до дна, и использование специальной методики восстановления глубоководных данных позволят оценить межгодовую изменчивость среднегодовых оценок и сезонного цикла и долговременные тенденции изменений переноса и потенциальной температуры ААДВ на  $26^\circ$  с.ш.

Цель работы – проанализировать внутригодовую и межгодовую изменчивость переносов и потенциальной температуры Антарктической донной водной массы на  $26^\circ$  с.ш. северной части Атлантики.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Глобальные океанические реанализы позволяют дать оценку изменения состояния океана, в частности Северной Атлантики, с разрешением в пространстве (до  $1/12^\circ$ ) и времени (1 мес и выше) [11, 15, 22]. Характеристика используемых в настоящей работе реанализов представлена в табл. 1.

В настоящей работе по данным о меридиональной компоненте скорости течений ( $V$ ) реанализов на  $\sim 26^\circ$  с.ш. Субтропической Атлантики рассчитывались меридиональные переносы ААДВ ( $Q$ ) [2]. За верхнюю границу слоя ААДВ принималась изобата 5000 м аналогично RAPID [24]. Часто под Антарктической донной водной массой

понимается слой вод с потенциальной температурой ниже  $2^\circ\text{C}$  [21], и такая граница используется лишь для нижней части ААДВ. В дальнейшем проводилось сравнение среднемесячных, а также среднегодовых оценок  $Q$ , полученных по океаническим реанализам и модельным расчетам с использованием данных буев RAPID за 2004–2015 гг. [24] (в статье они будут именоваться “данные RAPID”), а также оценкам, полученным на основании расчетов геострофических скоростей течений с использованием гидрологических разрезов [9, 16] (будут именоваться “оценки по разрезам”). Затем выбирались реанализы из всех вышеперечисленных в табл. 2, которые лучше всего воспроизводят среднегодовые оценки и сезонный цикл переноса и потенциальной температуры ( $\theta$ ) ААДВ. Принимаем со всеми оговорками и свойственными погрешностями данные RAPID за основу при сравнении с другими оценками переносов ААДВ. Из реанализов в табл. 1 для оценки изменчивости характеристик  $Q$ ,  $\theta$  использовались, главным образом, ORAS5, GLORYS2v4, GLORYS12v1, EN4.2. Для анализа изменчивости температуры дополнительно привлекались реанализы SODA2.2.4, ORAS4.

В работе проводился корреляционный анализ межгодовых характеристик переноса и температуры ААДВ с оценкой значимости полученных результатов по  $t$ -критерию Стьюдента. Для выявления типичных периодов внутригодовой и межгодовой изменчивости  $Q$  и  $\theta$  на  $26^\circ$  с.ш. Субтропической Атлантики проводился спектральный и дисперсионный анализы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Сравнение средних оценок характеристик ААДВ и их внутригодовой изменчивости.** Среднемесячные и среднемноголетние оценки интегральных

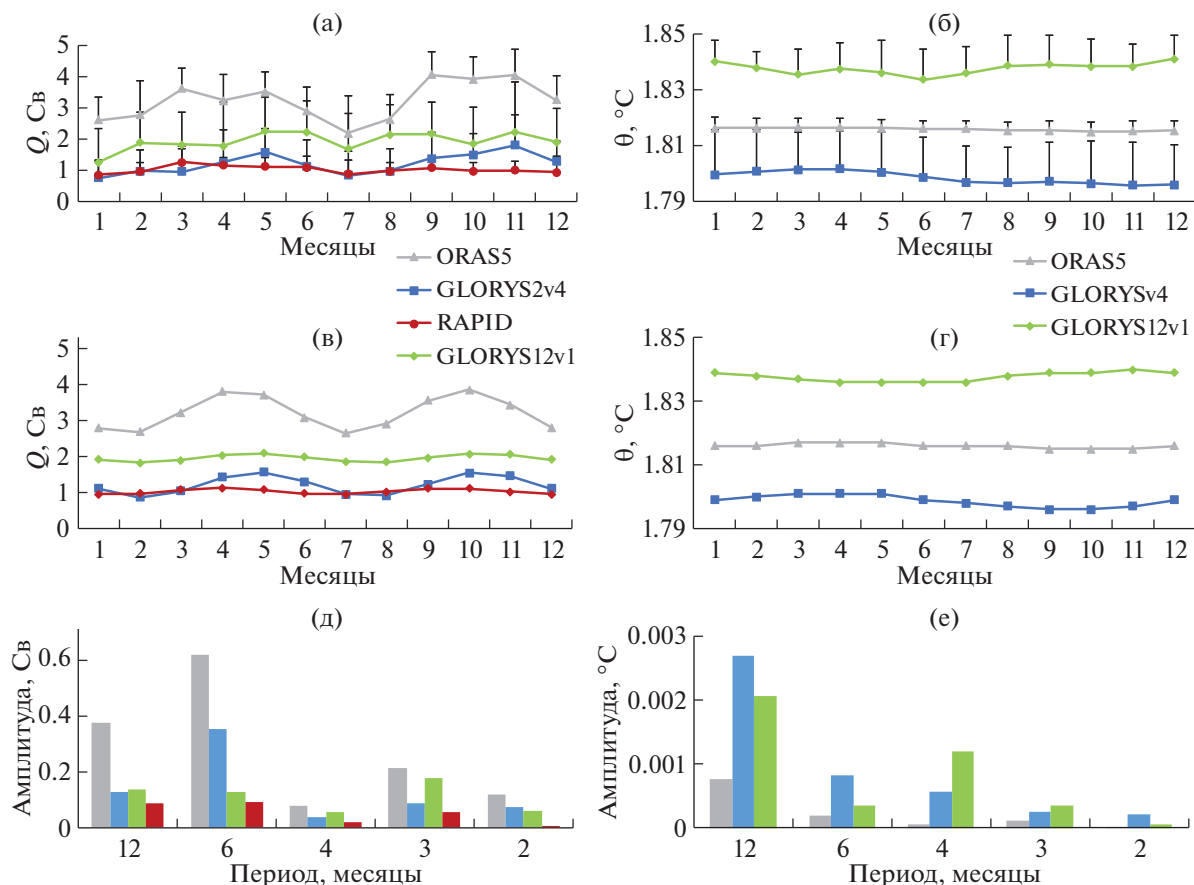
**Таблица 2.** Оценки среднемесячных ( $Q_{\text{мес}}$ , Св) и среднемноголетних ( $Q$ , Св) переносов и потенциальной температуры ( $\theta$ , °С) ААДВ через  $\sim 26^\circ$  с.ш. северной части Атлантики, рассчитанных в слое ААДВ (м), среднеквадратическое отклонение (СКО в Св и в °С), вклад колебаний годовой и полугодовой гармоник (в %), в изменчивость внутригодового цикла, изменение на  $\Delta Q$  (в Св) и  $\Delta\theta$  (в °С) за 2004–2015 гг.

|                         |                       | $Q$ , Св                  | $\theta$ , °С             | $Q_{\text{мес}}$ , Св |               |            |            | Слой ААДВ, м |
|-------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------|------------|------------|--------------|
|                         |                       | исх. ряд<br>2004–2015 гг. | исх. ряд<br>2004–2015 гг. | 07/1992 г.            | 01–02/1998 г. | 04/2004 г. | 01/2010 г. |              |
| RAPID                   | Среднее               | <b>1.0</b>                | –                         | –                     | –             | 1.1        | 2.2        | >5000        |
|                         | СКО                   | 0.1                       | –                         | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | Годовая гармоника     | 37%                       | –                         | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | Полугодовой гармоника | <b>43%</b>                | –                         | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | $\Delta$              | 0.2                       | –                         | –                     | –             | –          | –          |              |
| ORAS5                   | Среднее               | 3.3                       | 1.82                      | –                     | –             | 4.6        | 4.5        | 5089...5902  |
|                         | СКО                   | 0.5                       | 0.003                     | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | Годовая гармоника     | 23%                       | <b>92%</b>                | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | Полугодовой гармоника | <b>64%</b>                | 0                         | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | $\Delta$              | 1.5                       | 0.02                      | –                     | –             | –          | –          |              |
| GLORYS2v4               | Среднее               | <b>1.2</b>                | 1.79                      | –                     | –             | 5.4        | 1.3        | 5089...5698  |
|                         | СКО                   | 0.3                       | 0.013                     | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | Годовая гармоника     | 10                        | <b>78%</b>                | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | Полугодовой гармоника | <b>77%</b>                | 6                         | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | $\Delta$              | 0.2                       | –0.04                     | –                     | –             | –          | –          |              |
| GLORYS12v1              | Среднее               | 2.0                       | 1.84                      | –                     | –             | 4.6        | 2.0        | 5274...5500  |
|                         | СКО                   | 0.2                       | 0.007                     | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | Годовая гармоника     | 22%                       | <b>68%</b>                | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | Полугодовой гармоника | 19%                       | 8%                        | –                     | –             | –          | –          |              |
|                         | $\Delta$              | 0.3                       | 0.003                     | –                     | –             | –          | –          |              |
| ECCO2                   | Среднее               | –                         | –                         | –1.0                  | 2.5           | –          | –          | 5039...5450  |
| GECCO2                  | Среднее               | –                         | –                         | 0.4                   | 2.0           | 3.2        | –          | 5039...5900  |
| SODA2.2.4               | Среднее               | –                         | –0.02                     | 2.6                   | 2.8           | 5.8        | –          | 5125...5375  |
| ORAS3                   | Среднее               | –                         | –                         | 3.8                   | 2.0           | –0.8       | 2.6        | 5050...5250  |
| ORAS4                   | Среднее               | –                         | –0.02                     | 2.2                   | 0.2           | 0.4        | –          | 5050...5250  |
| Оценки разрезов [9, 15] | Среднее               | –                         | –                         | 1.2                   | 2.2           | 2.5        | –          | 5000...5500  |

переносов и потенциальной температуры ААДВ через  $26^\circ$  с.ш. Субтропической Атлантики, полученные в настоящей работе по реанализам, а также данным RAPID [24] и гидрологических разрезов [9, 16], представлены в табл. 2 и на рис. 1а, б. В табл. 2 представлены реальные горизонты реанализов ниже 5000 м. В настоящей работе проводилась интерполяция данных скорости в слое ниже 5000 м с шагом 100 м, а затем интегрирование по слою, соответствующему RAPID. Таким образом, использовалась единая граница ААДВ (5000 м) для всех рассмотренных реанализов.

Среднемноголетние величины переноса ААДВ за 2004–2015 гг., рассчитанные в настоящей работе по среднемесячным переносам RAPID, взятых из [24] ( $1.1 \pm 0.1$  Св), сравнимы с оценкой GLORYS2v4 ( $1.2 \pm 0.3$  Св) и в 2–3 раза меньше оценок, полученных по реанализам GLORYS12v1 и ORAS5.

Внутригодовой цикл переноса ААДВ описывается главным образом суперпозицией годовой и полугодовой гармоник (рис. 1д). На их изменчивость, по данным RAPID и реанализов ORAS5, GLORYS2v4, приходится более 80%, причем 2/3



**Рис. 1.** Внутригодовая изменчивость переноса (а) и потенциальной температуры (б) ААДВ, полугодовой гармонике переноса (в) и годовой гармонике температуры (г) по реанализам ORAS5, GLORYS2v4, GLORYS12v2 и данных RAPID за 2004–2015 гг. Амплитуды внутригодового цикла переносов (д) и потенциальной температуры (е) ААДВ для различных периодов. Вертикальные тонкие линии – СКО, характеризующие изменчивость за рассматриваемые годы.

вклада обусловлены именно колебаниями полугодовой гармонике (табл. 2), имеющей амплитуду 0.4–0.6 Св (рис. 1д), а по реанализу GLORYS12v1 – в 2 раза меньшую величину. В сезонном цикле важны гармоники более высокого порядка, характеризующие синоптический масштаб изменчивости.

По реанализам ORAS5, GLORYS2v4, GLORYS12v1 внутригодовой цикл переноса ААДВ имеет максимумы в апреле и октябре, минимумы – в феврале и июле за 2004–2015 гг. (рис. 1в). Аналогичные результаты получаются из анализа среднемесячных оценок только за месяцы проведения гидрологических разрезов в табл. 2.

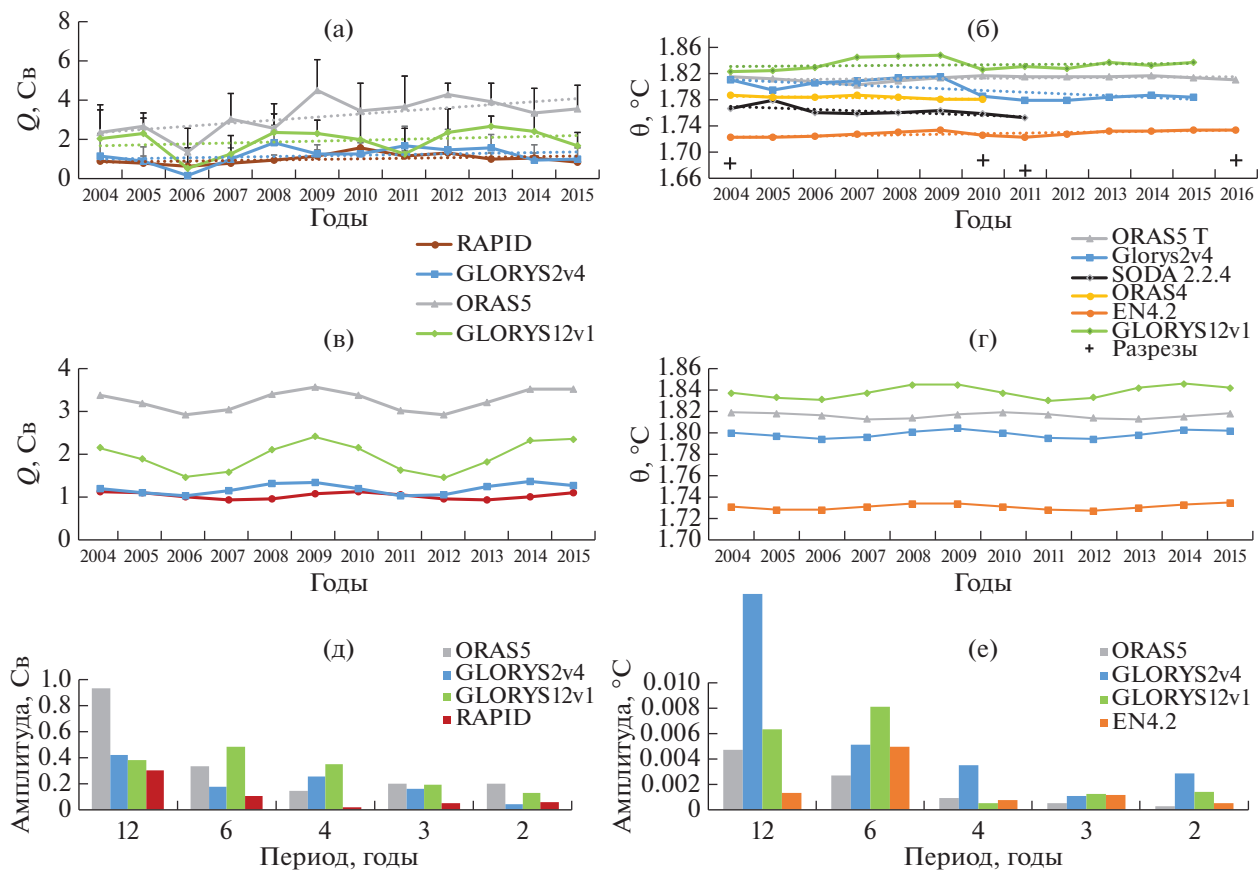
Внутригодовой цикл температуры ААДВ, по данным RAPID и реанализам ORAS5 и GLORYS2v4, GLORYS12v1, за тот же период на 70% описывается годовой гармоникой (табл. 2) с величиной амплитуды 0.003°C (рис. 1е), имеющей максимум весной и минимум осенью (рис. 1г).

Таким образом, на основе сравнения средних оценок переноса и температуры ААДВ и их внут-

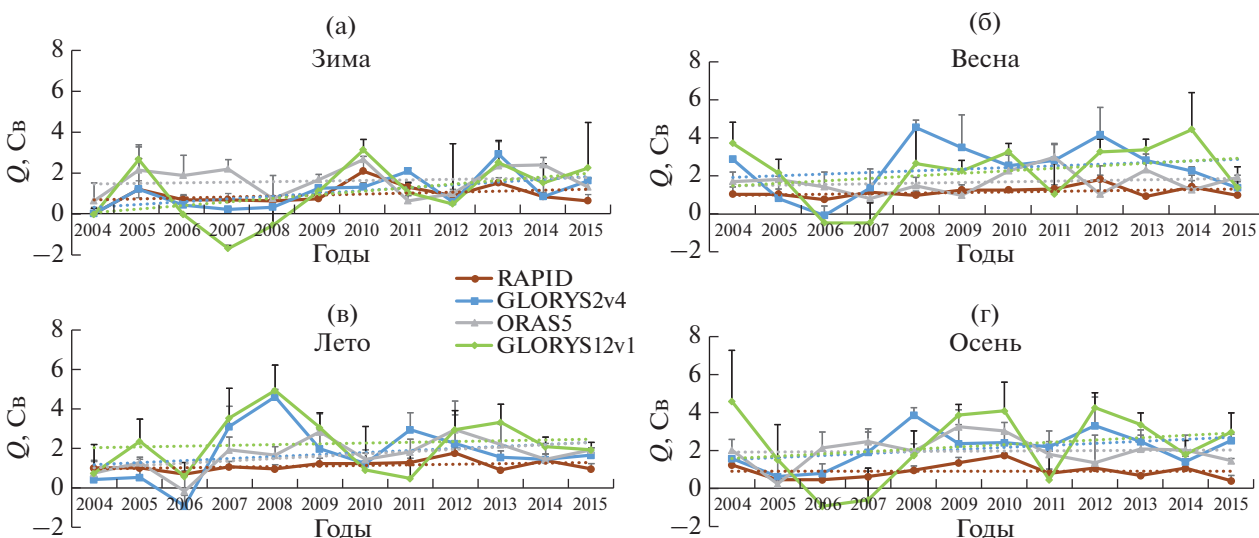
ригодовой изменчивости по разным типам данных получено, что по сравнению с RAPID реанализы GLORYS2v4 и GLORYS12v1 показывают лучшее соответствие, чем ORAS5.

**Межгодовая изменчивость характеристик ААДВ.** Межгодовая изменчивость переносов ААДВ на 26° с.ш. Субтропической Атлантики, полученных по трем океаническим реанализам и данным RAPID, представлена на рис. 2а и 3 соответственно. Между характеристиками ААДВ, полученными по разным типам данных, проводился корреляционный анализ, результаты которого показаны в табл. 3 и 4. В таблицах выделены наибольшие коэффициенты корреляции, значимые на 0.05 доверительном уровне. В скобках приведены величины корреляций для выделенной 6-летней гармонике.

Самые высокие значения коэффициента корреляции ( $r = 0.7$ ) получены между характеристиками среднегодовых, а также средневесенних оценок переносов ААДВ RAPID и ORAS5. Наивысшая корреляция ( $r = 0.7$ ) рядов температуры ААДВ достигается по EN4.2 и реанализа



**Рис. 2.** Межгодовая изменчивость переноса (а) и потенциальной температуры (б) ААДВ на 26° с.ш. Субтропической Атлантики по реанализам ORAS5, GLORYS2v4, GLORYS12v1, данным RAPID и объективному анализу EN4.2. Изменчивость 6-летней гармоник характеристик показана на (в, г). Крестами на (б) обозначены оценки, полученные по данным разрезов [1]. Вертикальные тонкие линии – СКО, характеризующие внутригодовую изменчивость. Линейные тренды обозначены пунктирами. Величины амплитуд межгодовой изменчивости переносов (д) и потенциальной температуры (е) ААДВ для различных периодов.



**Рис. 3.** Межгодовая изменчивость переносов ААДВ зимой (а), весной (б), летом (в), осенью (г) на 26° с.ш. северной части Атлантики по реанализам ORAS5, GLORYS2v4, GLORYS12v1 и оценкам RAPID. Вертикальные тонкие линии – СКО величины переноса. Пунктиром обозначены линейные тренды.

**Таблица 3.** Коэффициенты взаимных корреляций ( $r$ ) межгодовых характеристик переносов ААДВ, представленных на рис. 2а, 3

| Данные     | Периоды       | RAPID              | GLORYS2v4        | ORAS5             | GLORYS12v1         |
|------------|---------------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| RAPID      | Зима          | –                  | <b>0.7</b>       | 0.4               | <b>0.6</b>         |
|            | Весна         | –                  | 0.3              | <b>0.7</b>        | 0.5                |
|            | Лето          | –                  | <b>0.6</b>       | <b>0.5</b>        | 0                  |
|            | Осень         | –                  | 0.4              | <b>0.6</b>        | <b>0.6</b>         |
|            | Среднегодовые | –                  | <b>0.5 (0.1)</b> | <b>0.7 (0.4)</b>  | 0.4 ( <b>0.5</b> ) |
| GLORYS2v4  | Зима          | <b>0.7</b>         | –                | 0.4               | <b>0.7</b>         |
|            | Весна         | 0.3                | –                | 0.2               | <b>0.8</b>         |
|            | Лето          | <b>0.6</b>         | –                | 0.4               | 0.3                |
|            | Осень         | 0.4                | –                | 0.3               | 0.3                |
|            | Среднегодовые | <b>0.5 (0.1)</b>   | –                | <b>0.6 (0.9)</b>  | <b>0.6 (0.9)</b>   |
| ORAS5      | Зима          | 0.4                | 0.4              | –                 | 0.2                |
|            | Весна         | <b>0.7</b>         | 0.2              | –                 | 0.4                |
|            | Лето          | <b>0.5</b>         | 0.4              | –                 | 0.1                |
|            | Осень         | <b>0.6</b>         | 0.3              | –                 | 0.2                |
|            | Среднегодовые | <b>0.7 (0.4)</b>   | <b>0.6 (0.9)</b> | –                 | <b>0.5 (0.99)</b>  |
| GLORYS12v1 | Зима          | <b>0.6</b>         | <b>0.7</b>       | 0.2               | –                  |
|            | Весна         | 0.5                | <b>0.8</b>       | 0.4               | –                  |
|            | Лето          | 0                  | 0.3              | 0.1               | –                  |
|            | Осень         | <b>0.6</b>         | 0.3              | 0.2               | –                  |
|            | Среднегодовые | 0.4 ( <b>0.5</b> ) | <b>0.6 (0.9)</b> | <b>0.5 (0.99)</b> | –                  |

**Таблица 4.** Коэффициенты взаимных корреляций ( $r$ ) межгодовых характеристик температуры ААДВ, представленных на рис. 2б

| Данные     | EN4.2               | GLORYS2v4           | ORAS5              | GLORYS12v1       |
|------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| EN4.2      | –                   | –0.1 ( <b>0.9</b> ) | 0.1(0.1)           | <b>0.7 (0.9)</b> |
| GLORYS2v4  | –0.1 ( <b>0.9</b> ) | –                   | – <b>0.6 (0.3)</b> | <b>0.5 (0.9)</b> |
| ORAS5      | 0.1 (0.1)           | – <b>0.6 (0.3)</b>  | –                  | –0.4 (–0.2)      |
| GLORYS12v1 | <b>0.7 (0.9)</b>    | 0.5 ( <b>0.9</b> )  | –0.4               | –                |

GLORYS12v1 (табл. 4). Значения температуры по EN4.2 ближе всего к оценкам единичных гидрологических разрезов, взятых из работы [1] (рис. 2б).

Гармонический анализ показал, что в межгодовой изменчивости переносов и потенциальной температуры ААДВ, оцененных по данным RAPID и реанализам, выделяются характерные периоды 12 и 6 лет. Отметим, что при преобразовании Фурье использовались среднегодовые ряды переносов и температуры, что, вероятно, привело к округлению цикла 11.6 лет, связанного с солнечной активностью [3, 6]. По реанализам GLORYS2v4, GLORYS12v1 также значимым оказался период 4 года. Причем 12-летние и 6-летние гармоники выделяются в изменчивости потенциальной температуры ААДВ, оцененной по более длительному ряду (1992–2017 гг.) данных EN4.2.

Амплитуда 12-летних колебаний переносов ААДВ варьируется от 0.4 до 0.9 Св (рис. 2д), а температуры – от 0.001 до 0.016°C (рис. 2е), а у 6-летних колебаний составляют 0.2–0.4 Св (рис. 2в) и

0.002–0.008°C (рис. 2г) соответственно. Межгодовые амплитуды температуры ААДВ по разным реанализам превышают в 2–5 раз внутригодовые значения. Полученные экстремумы внутригодового цикла лежат в пределах среднеквадратического отклонения (рис. 1б), что свидетельствует о значительной межгодовой изменчивости значений  $\theta$ .

Корреляционный анализ рядов переносов ААДВ для 6-летней гармоники показал уменьшение корреляций оценок реанализов ORAS5 и GLORYS2v4 с данными RAPID (до  $r = 0.1$ ), за исключением GLORYS12v1 (до  $r = 0.5$ ). При этом увеличились прямые связи между характеристиками трех реанализов ( $r = 0.9$ ), и отмечен сдвиг на 1 год при опережении оценок переносов RAPID относительно реанализов.

Наличие 6-летнего цикла в оценках переносов и потенциальной температуры ААДВ реанализов характеризуется максимумами в 2009 и 2014 гг. и минимумами в 2006 и 2011 гг.

**Таблица 5.** Коэффициенты взаимных корреляций ( $r$ ) характеристик переносов и температуры ААДВ, представленных на рис. 2а–г

| Данные     |        | ORAS5      | GLORYS2v4  | GLORYS12v1  | EN4.2     |
|------------|--------|------------|------------|-------------|-----------|
|            |        | $\theta$   |            |             |           |
| RAPID      | $\rho$ | 0.6 (1.0)  | –0.4 (0.4) | –0.1 (–0.1) | 0.1 (0.2) |
| GLORYS2v4  |        | 0.5 (0.3)  | –0.4 (1.0) | 0.3 (1.0)   | 0.5 (0.9) |
| ORAS5      |        | 0.2 (–0.1) | –0.2 (0.9) | –0.1 (1.0)  | 0.4 (0.8) |
| GLORYS12v1 |        | 0.5 (0.4)  | –0.3 (1.0) | –0.2 (0.8)  | 0.5 (0.8) |

Для анализа межгодовой изменчивости переносов ААДВ лучше всего подходят GLORYS2v4, GLORYS12v1, а ORAS5, несмотря на высокую корреляцию, значительно завышает переносы по сравнению с RAPID.

Сравнение долгосрочных тенденций изменений переносов ААДВ за 2004–2015 гг. по разным типам данных на рис. 2а, 3 и табл. 2 показало, что все они положительные и могут вносить максимальный вклад до 40% (по ORAS5) в суммарную дисперсию исходного ряда. Оценка этого вклада по данным RAPID составляет лишь 10%, что совпадает с оценками реанализов GLORYS2v4, GLORYS12v1. Величина изменения переноса составила  $\Delta Q = +0.2$  Св за рассматриваемый период, по реанализу ORAS5 значение  $\Delta Q$  за рассматриваемый период – на порядок выше.

Кроме того, получена отрицательная тенденция изменения температуры ААДВ со вкладом в суммарную дисперсию менее 50% по реанализам GLORYS2v4 ( $\Delta\theta = -0.04^\circ\text{C}$ ) за 2004–2015 гг. и SODA2.2.4, ORAS4 ( $\Delta\theta = -0.02^\circ\text{C}$ ) (рис. 2б, табл. 2), данным гидрологических разрезов ( $\Delta\theta = -0.002^\circ\text{C}$ ) за период 2004–2011 гг. [1], что также подтверждает усиление переноса ААДВ на  $26^\circ$  с.ш. Субтропической Атлантики на рассматриваемых периодах наблюдения. Реанализы ORAS5, GLORYS12v1 и объективный анализ EN4.2 показывают небольшое увеличение потенциальной температуры ( $\Delta\theta < 0.02^\circ\text{C}$ ) за период 2004–2015 гг.

В табл. 5 представлены коэффициенты корреляций переносов и температуры ААДВ по разным данным. В скобках приведены величины корреляций для выделенной 6-летней гармоник. Изменения температуры и переноса должны находиться в противофазе, но отрицательные корреляции ( $r = -0.4$ ) получились лишь по реанализам GLORYS2v4, GLORYS12v1.

Таким образом, анализ долгосрочных тенденций показал увеличение переносов ААДВ на  $\Delta\theta = +0.2$  Св в северном направлении на  $26^\circ$  с.ш. Субтропической Атлантики по реанализам GLORYS2v4, GLORYS12v1 и данным RAPID за 2004–2015 гг. За этот период значения температуры по GLORYS2v4 уменьшились на  $0.04^\circ\text{C}$ , по GLORYS12v1 незначительно увеличились на  $0.002^\circ\text{C}$ , что статистически незначимо. Все это

свидетельствует о возможности использования этих двух реанализов для оценки долговременных тенденций изменений переносов и потенциальной температуры ААДВ, так как они дают отрицательную корреляцию.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе получено, что внутригодовой цикл переносов и температуры ААДВ описывается суперпозицией годовой и полугодовой гармоник, что соответствует аналогичным результатам для разломов Романш и Чейн Срединно-Атлантического хребта [26].

В настоящей работе выделены тенденции роста среднегодовых и среднесезонных переносов ААДВ по всем типам данных. Возникает вопрос: не являются ли выделенные положительные тенденции фиктивными, связанными с отсутствием натуральных данных в глубоководных слоях океана? Авторы работы [25] отмечают, что усиление меридиональной термохалинной циркуляции особенно проявляется в периоды с недостаточным объемом данных наблюдений, что связано с уточнением крупномасштабного смещения и используемыми данными об атмосфере. Имеются работы, в которых говорится о возможности использования реанализа GLORYS2v4 для анализа межгодовой динамики термохалинных характеристик и переносов массы в Северной Атлантике [9, 22]. В пользу наличия тенденции увеличения переноса ААДВ на 0.2 Св, выделенной в настоящей работе, свидетельствуют оценки, полученные в работах [4, 18]. В работе [17] за 1999–2003 гг. также обнаружено уменьшение температуры на  $-0.002^\circ\text{C}/\text{год}$ , которое косвенно подтверждает рост переноса ААДВ в северном направлении.

Имеются работы, в которых по разным океаническим характеристикам выделяются периоды изменчивости 4 [4, 26], 6 [4, 7, 13, 28], ~12 лет [3, 6], и описываются их возможные причины. В настоящей работе используется достаточно короткий ряд наблюдений, позволяющий оценить только короткопериодные колебания.

Таким образом, на выделенные долгосрочные тенденции переносов и температуры ААДВ накладываются колебания 4, 6 и 12 лет, механиз-

мы образования которых необходимо дополнительно исследовать.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе произведена оценка изменений среднемесячных, среднесезонных, среднегодовых величин переноса и потенциальной температуры Антарктической донной водной массы (ААДВ) по восьми океаническим реанализам, объективному анализу EN4.2 и данным RAPID на 26° с.ш. северной части Атлантики.

Реанализы GLORYS2v4, GLORYS12v1 дают самые близкие результаты средних переносов ААДВ и их изменчивости на внутригодовом и межгодовом масштабах в сравнении с данными RAPID. При этом по ним получена значимая отрицательная корреляция переносов с температурой ( $r = -0.4$ ).

Выявлено, что внутригодовая изменчивость переноса ААДВ, оцененная по данным RAPID, разрезов и реанализов, описывается суперпозицией годовой и полугодовой гармоник (80%). Основной вклад (около 65%) вносит полугодовая гармоника, которая имеет максимумы в апреле и октябре, минимумы в феврале и июле за период 2004–2015 гг., амплитуду в среднем ~0.4 Св. Внутригодовой цикл потенциальной температуры описывается годовой гармоникой с максимумом весной и минимумом осенью, с амплитудой ~0.003°C, вклад которой составляет более 70%.

Выделены характерные периоды изменчивости переносов и температуры ААДВ 12 и 6 лет с максимумами значений в 2009 и в 2014 гг. и минимумами в 2006 и в 2011 гг. по вышеупомянутым реанализам. Амплитуда межгодовых колебаний переносов ААДВ в среднем равна 0.6 Св, а потенциальной температуры – 0.01°C.

Получено, что увеличение переноса ААДВ составило 0.2 Св по реанализам GLORYS2v4, GLORYS12v1 и данным RAPID, а также оценок разрезов за 2004–2015 гг., при незначительном уменьшении потенциальной температуры (–0.002°C).

**Благодарности.** Коллектив авторов выражает благодарность А.Р. Горбушкину за помощь в подготовке реанализов.

**Источник финансирования.** Работа выполнена по темам государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения Федерального исследовательского центра Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН “Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом” (АААА-А18-118021490093-4) и Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова “Изменение динамики и структуры вод морей и океанов” (АААА-А16-116032810091-8), а также при поддержке грантов

Российского научного фонда (проекты № 19-17-00110, обработка и интерпретация реанализов; № 21-17-00123, интерпретация данных RAPID).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбушкин А.Р., Демидов А.Н. Изменчивость термохалинных характеристик на ~26.5° с.ш. по данным трансатлантических океанологических разрезов и реанализов // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 64–77.
2. Демидов А.Н. О выделении промежуточных и глубинных водных масс в Южной Атлантике // Океанология. 2003. Т. 43. № 2. С. 165–175.
3. Крашенинникова М.А., Крашенинникова С.Б. Изменчивость ледово-термических характеристик Баренцева моря и ее связь с солнечной активностью и Североатлантическим колебанием. Международный научный институт “Educatio”, 2015. Ч. III. Т. 10. С. 96–99.
4. Крашенинникова С.Б. Водные массы и переносы тепла в Северной Атлантике. Симферополь: ИТ “Ариал”, 2019. 124 с. <https://doi.org/10.21072/978-5-907162-84-6>
5. Краюшкин Е.В., Демидов А.Н. Многолетняя изменчивость термохалинных характеристик промежуточных, глубинных и донных водных масс в Южной Атлантике // Вестн. МГУ. Серия 5. География. 2014. № 2. С. 32–39.
6. Максимов И.В. Вековой цикл солнечной деятельности и Северо-Атлантическое течение // Океанология. 1961. Т. 1. № 2. С. 206–212.
7. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада лтд, 2013. 144 с.
8. Тараканов Р.Ю., Морозов Е.Г., Макаренко Н.И., Фрей Д.И., Демидова Т.А. Измерения придонных течений в разломах южной части Североатлантического хребта в 39-м, 40-м и 41-м рейсах научно-исследовательского судна “Академик Сергей Вавилов” // Океанология. 2017. Т. 57. № 5. С. 832–834.
9. Bryden H.L., Johns W.E., Saunders P.M. Deep Western Boundary Current East of Abaco: Mean structure and transport // J. Mar. Res. 2005. V. 63. № 1. P. 35–57.
10. Demidov A.N., Ivanov A.A., Gippius F.N., Dobroliubov S.A. Transport of deep and bottom waters through the mid-atlantic ridge in the Vema fracture zone // Dokl. Earth Sci. 2020. V. 494. № 1. P. 76–81.
11. Frey D.I., Morozov E.G., Fomin V.V. et al. Regional Modeling of Antarctic Bottom Water Flows in the Key Passages of the Atlantic // J. Geophys. Res.: Oceans. 2019. V. 124. № 11. P. 8414–8428. <https://doi.org/10.1029/2019JC015315>
12. Garric G., Parent L., Greiner E. et al. Performance and Quality Assessment of the Global Ocean Eddy-Permitting Physical Reanalysis GLORYS2V4. 2016.
13. Gary S.F., Lozier M.S., Böning C.W., Biastoch A. Deciphering the pathways for the deep limb of the Meridional Overturning Circulation // Deep Sea Res., Part II. 2011. V. 58. Iss. 17–18. P. 1781–1797.
14. Hall M., McCartney M.S., Whitehead J.A. Antarctic bottom water flux in the Equatorial Western Atlantic // J. Phys. Oceanogr. 1997. V. 27. № 9. P. 1903–1926.



15. *Häkkinen S., Rhines P.B., Worthen D.L.* Heat content variability in the North Atlantic Ocean in ocean reanalyses // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 2901–2909. <https://doi.org/10.1002/2015GL063299>
16. *Koltermann K.P., Sokov A.V., Tereschenkov V.P. et al.* Decadal changes in the thermohaline circulation of the North Atlantic // *Deep Sea Res., Part II.* 1999. V. 46. № 1–2. P. 109–138. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)00115-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(98)00115-5)
17. *Limeburner R., Whitehead J.A., Cenedese C.* Variability of Antarctic bottom water flow into the North Atlantic // *Deep Sea Res., Part II.* 2005. V. 52. № 3–4. P. 495–512.
18. *Longworth H.R., Bryden H.L., Baringer M.O.* Historical variability in Atlantic meridional baroclinic transport at 26.5° N from boundary dynamic height observations // *Deep Sea Res., Part II.* 2011. V. 58. Iss. 17–18. P. 1754–1767.
19. *Marsh R., de Cuevas B.A., Coward A.C., Bryden H.L.* Thermohaline circulation at three key sections in the North Atlantic over 1985–2002 // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. № 10. P. L10604. <https://doi.org/10.1029/2004GL022281>
20. *Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Yu.* Transport of Antarctic waters in the deep channels of the Atlantic ocean // *Dokl. Earth Sci.* 2008. V. 423, № 1. P. 1286–1289.
21. *Morozov E., Demidov A., Tarakanov R., Zenk W.* Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows. Springer, 2010. 266 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9358-5>.
22. Operations (2012). Global Ocean Physics Reanalysis. <https://sextant.ifremer.fr/record/c0635fc4-07d3-4309-9d55-cfd3e6aa788b>.
23. *Rhein M., Stramma L., Krahnemann G.* The spreading of Antarctic Bottom Water in the tropical Atlantic // *Deep Sea Res., Part I.* 1998. V. 45. P. 507–527.
24. *Smeed D., McCarthy G., Rayner D. et al.* Atlantic meridional overturning circulation observed by the RAPID-MOCHA-WBTS (RAPID-Meridional overturning circulation and heat flux array-Western boundary time series) array at 26° N from 2004 to 2014. 2015. <https://doi.org/10.5285/35784047-9b82-2160-e053-6c86abc0c91b>
25. *Storto A., Masina S.* C-GLORSv5: an improved multi-purpose global ocean eddy-permitting physical reanalysis // *Earth Syst. Sci. Data.* 2016. V. 8. P. 679–696, <https://doi.org/10.5194/essd-8-679-2016>
26. *Thierry V., Mercier H., Treguier A.-M.* Seasonal fluctuations in the deep central equatorial Atlantic Ocean: A data-model comparison // *Ocean Dynamics.* 2006. V. 56. P. 5–6.
27. *Whitehead J.A.* Surges of Antarctic bottom water into the North Atlantic // *J. Phys. Oceanogr.* 1989. V. 19. № 6. P. 853–861.
28. *Yang X.-Y., He Z.* Decadal change of Antarctic Intermediate Water in the region of Brazil and Malvinas confluence // *Deep Sea Res., Part I.* 2014. V. 88. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.02.007>

## Variability of the Antarctic Bottom Waters Characteristics in the Subtropical Part of the North Atlantic

S. B. Krasheninnikova<sup>a, #</sup>, A. N. Demidov<sup>b</sup>, A. A. Ivanov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (IBSS), Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Lomonosov Moscow State University (MSU), Faculty of Geography, Moscow, Russia*

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

In this work we estimated the transport and potential temperature of the Antarctic Bottom Waters (AABW) and their variability on an intraannual, interannual, and decadal scales based on eight reanalyses and direct measurements at 26° N of subtropical part of the Atlantic. The reanalyses GLORYS2v4 and GLORYS12v1 were selected, which give the closest results of estimates of the average AABW transport, calculated below 5000 m, and their variability with RAPID. It was revealed that the seasonal cycle of AABW transport for 2004–2015 is described by a superposition of annual and semi-annual harmonics of ~80% with an amplitude of ~0.4 Sv, with maxima in April and October, and minima in February and July. The intra-annual temperature cycle is described by the annual harmonic, whose contribution is more than 70% in total variability, with a maximum in spring and a minimum in autumn, and an amplitude of ~0.003°C. The characteristic periods of transport and potential temperature AABW variability of 12 and 6 years with maximums of 2009 and 2014 and minimums of 2006 and 2011 according to the reanalyses of ORAS5, GLORYS2v4 and estimates of RAPID are highlighted. The amplitude of interannual fluctuations in the transport and potential temperature of the AABW according to the reanalyses of ORAS5, GLORYS2v4, GLORYS12v1 is ~0.6 Sv and ~0.01°C, respectively. An analysis of the long-term tendencies in the average annual AABW transport showed an increase of 0.2 Sv according to reanalyses and RAPID data with a slight decrease in temperature (–0.04°C) for 2004–2015.

**Keywords:** transport, intra-annual variability, interannual variability, long-term trends, oceanic reanalyses, RAPID, sections, water mass, Antarctic Bottom Waters