

УДК 551.465

ОТОБРАЖЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПРИДОННЫХ ВОДАХ СУБАРКТИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ *IN SITU* (ПО ДАННЫМ ГОДОВЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ *IN SITU* 2016–2017)

© 2022 г. А. К. Амбросимов^{1,*}, А. А. Клювиткин¹

Представил академик РАН Л.И. Лобковский 24.01.2022 г.

Поступило 24.01.2022 г.

После доработки 09.02.2022 г.

Принято к публикации 10.02.2022 г.

В работе представлены результаты непрерывных годовых наблюдений *in situ* за циркуляцией течений и температурой в придонных арктических областях энергоактивной зоны Исландского бассейна. Данные получены на притопленных буйковых станциях по разрезу 59.5° с.ш. на глубинах около 50 м от дна в течение 2016–2017 гг. Исследована внутrigодовая изменчивость придонных течений и температуры. Показано, что в течение всего срока наблюдалось монотонное стационарное движение вод на всех станциях, а также рост температуры как входящих в бассейн придонных вод, так и выходящих. При этом годовые темпы роста температуры выходящего потока в 1.5 раза превышали рост температуры входящего.

Ключевые слова: Северная Атлантика, придонные течения, температура, пространственно-временная изменчивость, климатические изменения

DOI: 10.31857/S2686739722050048

В субарктическом районе Атлантики располагается энергоактивная зона – крупномасштабный океанский круговорот, где взаимодействие океана с атмосферой определяет влияние на глобальные климатические процессы [1–6]. Меридиональная термохалинная циркуляция вод арктической Атлантики формирует отдачу аккумулируемого океаном тепла в атмосферу, в результате чего происходят колебания климата. В научной литературе меридиональный перенос вод в субарктической части Северной Атлантики рассматривается в рамках концепции “глобального конвейера” [7, 8]. Согласно этой концепции, океанский перенос и перераспределение тепла в океане происходят благодаря функционированию глобальной системы двухслойной циркуляции вод. Эту крупномасштабную циркуляцию в арктическом регионе можно представить в виде океанского “конвейера”, который переносит на юг холодные придонные арктические воды. Эти воды формируются в арктическом регионе Атлантики в результате глубокой зимней конвекции [9, 10]. В качестве компенсационного

возвратного потока в верхних слоях океана выступает ветвь Северо-Атлантического течения, которая переносит на север теплые поверхностные воды. Передача тепла из океана в атмосферу в субарктической Атлантике представляет особый интерес в связи с его определяющим влиянием на глобальные климатические изменения, особенно в Европе. Важность климатических изменений определяет развитие масштабных мировых исследовательских проектов по изучению взаимодействия океана и атмосферы [11]. Главными вопросами на пути исследователей к пониманию климатических изменений на севере Атлантики являются: какие физические процессы являются определяющими в поддержании данной динамической системы в стабильном состоянии, и какими для этого должны быть пространственно-временные масштабы изменений термохалинной циркуляции в системе меридионального переноса.

Интенсивность переноса глубинных вод Северной Атлантики в низкие широты не является постоянной, оценки переноса глубинных вод в южном направлении выявили максимальный перенос в первой половине 1980-х годов и минимальные переносы во второй половине 1950-х годов и в первой половине 1990-х годов [2, 4].

Изучение динамики верхнего и промежуточного слоев океана проводится давно и довольно

¹Институт океанологии им. П.П. Ширихова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: ambrosimov@ocean.ru

Таблица 1. Помесячные статистические характеристики течения (см/с) и температуры (°С) на придонных горизонтах трансатлантического разреза по 59.5° с.ш. по данным наблюдений на трех ПБС в период с июня 2016 по июль 2017 г.

№№ ПБС	3540				3562				3580						
координаты	59°30.045' с.ш. 17°59.980' з.д.				59°29.791' с.ш. 26°39.821' з.д.				59°30.018' с.ш. 32°49.647' з.д.						
Период наблюдений	00 ²¹ 18.06.2016 г. – 22 ⁰⁰ 05.07.2017 г.				00 ⁰⁰ 22.06.2016 г. – 12 ⁰⁰ 08.07.2017 г.				00 ⁰⁰ 25.06.2016 г. – 19 ²⁷ 09.07.2017 г.						
глубина, м	2229				2237				2203						
горизонт, м	2175				2183				2134		446				
прибор	Aquadopp				Aquadopp				DVS		DVS				
характеристика	U*	V**	V	T(°C)	U	V	V	T(°C)	U	V	V	U	V	V	T(°C)
Июль 2016 г.	0.5	1.7	6.4	2.32	-11.8	-0.2	14.9	2.91	-0.2	-6.1	7.2	16.5	26.8	16.5	3.92
Август	4.0	3.1	7.1	3.28	-8.0	-13.1	16.0	2.85	-0.8	-3.9	5.2	9.0	22.1	9.0	3.76
Сентябрь	3.1	2.3	7.7	3.36	-9.9	-12.9	16.9	2.87	-0.2	-4.2	5.5	12.4	25.9	12.4	3.81
Октябрь	1.3	1.5	6.3	3.39	-11.4	-16.1	20.3	2.82	-0.8	-4.7	6.1	8.0	20.3	8.0	3.79
Ноябрь	4.1	2.4	7.1	3.37	-7.4	-9.3	13.1	2.81	-0.8	-3.8	6.0	10.2	32.0	10.1	4.26
Декабрь	1.0	1.7	6.9	3.37	-8.9	-11.3	15.1	2.86	-1.7	-4.4	6.0	9.0	26.2	9.0	4.36
Январь 2017 г.	2.1	1.8	7.1	3.34	-8.2	-12.8	15.9	2.92	-1.1	-2.5	4.5	5.8	25.6	5.8	4.16
Февраль	1.9	1.1	6.2	3.36	-8.8	-15.1	18.0	2.88	-0.2	-9.9	10.4	4.8	26.7	4.8	3.71
Март	1.7	1.6	6.0	3.36	-9.3	-14.0	17.3	2.89	-1.0	-6.7	7.6	8.5	34.3	8.5	3.62
Апрель	0.7	1.6	7.0	3.42	-8.3	-11.8	15.0	3.00	-0.6	-4.3	5.8	9.4	26.5	9.4	3.98
Май	0.0	0.7	6.9	3.46	-7.2	-11.6	14.3	3.02	0.1	-5.3	6.8	9.9	28.9	9.9	3.67
Июнь	5.0	1.6	8.5	3.38	-9.0	-12.5	15.8	2.97	-1.3	-4.4	6.5	13.0	25.6	13.0	3.88
Ср. за год	2.1	1.8	6.9	3.36	-8.7	-12.7	16.0	2.90	-0.7	-5.0	6.4	0.3	-3.0	9.7	3.91
Макс.	21.9	21.4	27.3	3.59	7.4	7.9	35.1	3.21	12.1	8.0	24.2	26.9	31.3	34.3	5.0
Мин.	-18.2	-17.8	1.4	3.14	-30.5	-34.7	2.3	2.64	-11.7	-2.4	2.7	-24.7	-32.8	0	3.22

Примечание. U* – зональная составляющая скорости течения в см/с, V** – меридиональная составляющая скорости течения в см/с, |V| – модуль скорости в см/с, T – температура потока в °С.

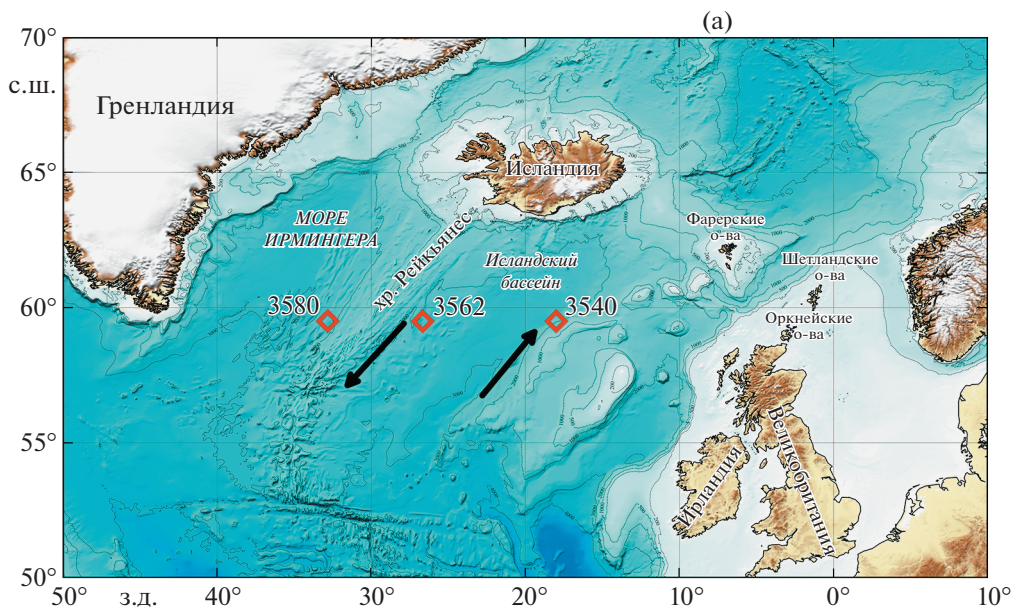
интенсивно, а продолжительных наблюдений придонных течений *in situ* в придонной области практически нет. При анализе пространственных вариаций необходимы оценки временной изменчивости гидрофизических параметров в широкой полосе частот – от годовых (сезонных) до высокочастотных колебаний внутренних волн и турбулентности, которые можно выполнить только с привязкой к одной точке на притопленных буйковых станциях (ПБС) при измерениях *in situ*. Поэтому целями данного исследования были определение структуры придонных потоков и оценка пределов изменчивости скоростей течений и температуры в придонной области арктической части Атлантического океана *in situ*.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В июне 2016 г. в 51-м рейсе НИС “Академик Иоффе” на трансатлантическом разрезе по 59°30' с.ш. на трех притопленных буйковых стан-

циях (ПБС) были установлены акустические доплеровские измерители течений Teledyne RD Instruments DVS и Nortek Aquadopp, которые были подняты через год в июле 2017 г. в 68-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” [12–14]. Положение ПБС на разрезе показано на рис. 1, а характеристики и координаты – в табл. 1. Измерения проводились непрерывно в течение 380 сут, интервал измерений составил 1 ч, а интервал осреднения – 3 мин.

Измерения течений на придонных горизонтах показали, что в восточной части Исландского бассейна (ПБС-3540), между поднятием Роколл и хребтом Рейкьянес (рис. 1) на горизонте 2175 м (глубина 2229 м) в течение всего года с июня 2016 по июль 2017 г. наблюдалось придонное течение северо-восточного направления со среднегодовой скоростью 6.9 см/с (табл. 1). На прогрессивно-векторной диаграмме течения (рис. 2а), построенной по этим данным, заметно слабое воздействие внутренних волн, не нарушающее



Станция 3540
 18.06.2016 г. 16:08 UTC (б)
 59°30.045'N 17°59.980'W
 H = 2229 м

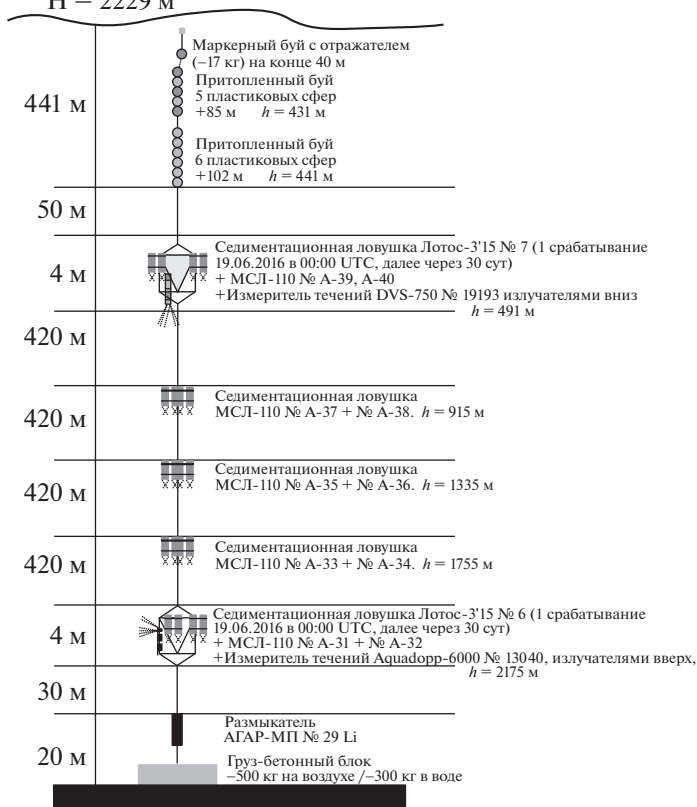


Рис. 1. Карта-схема постановки буйковых станций (а) в арктическом бассейне Атлантического океана и принципиальная схема комплектации станций (б).

общую картину движения вод на северо-восток. Перенос водных масс в северо-восточном направлении за год составил 2246 км.

На ПБС-3562, установленной в западной части Исландского бассейна (рис. 1) на горизонте 2183 м (глубина 2237 м), наблюдалось равномер-

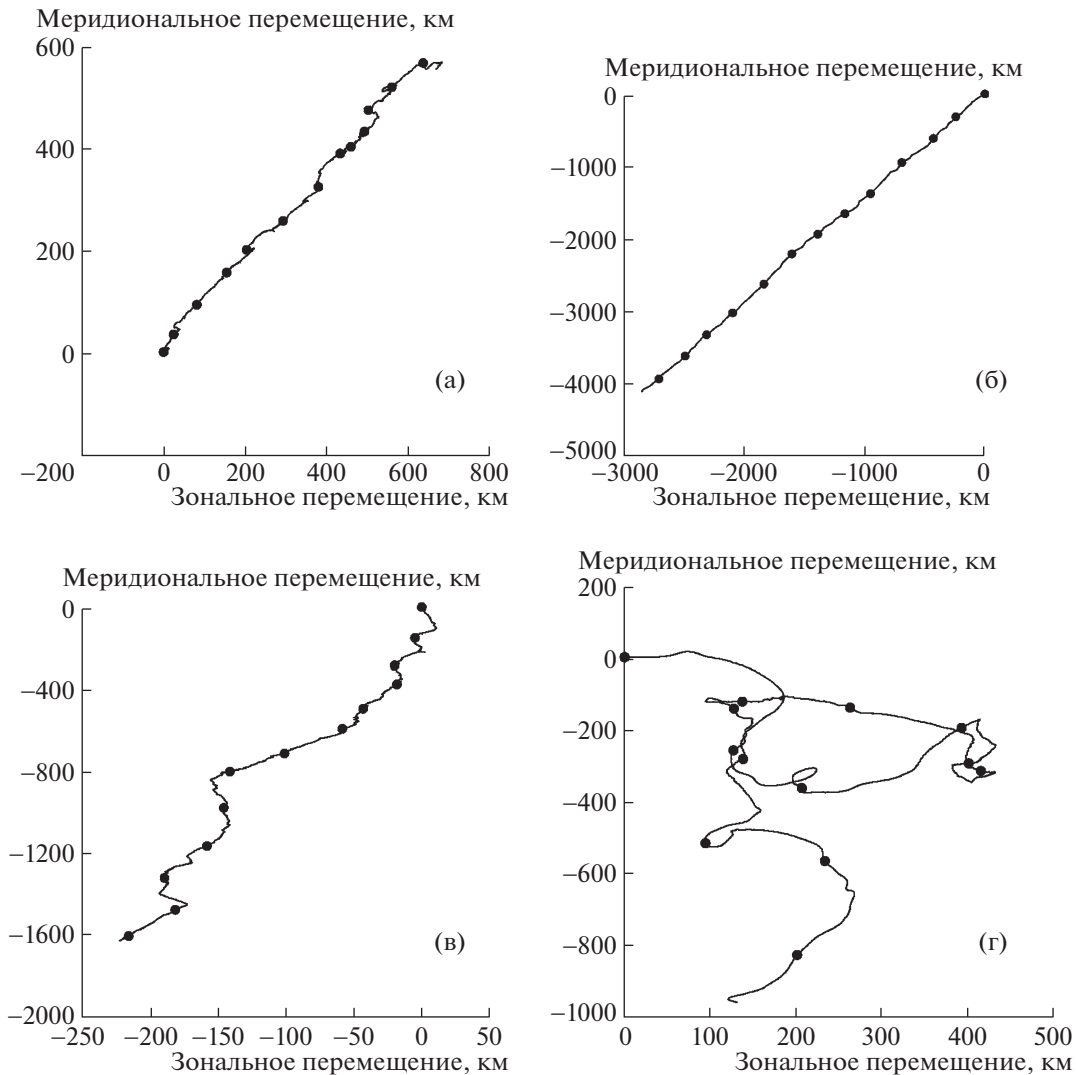


Рис. 2. Прогрессивно-векторные диаграммы течения по данным наблюдений на станциях Атлантического океана по разрезу 59.5° с.ш.: (а) ПБС-3540; (б) ПБС-3562; (в) ПБС-3580; (г) ПБС-3580.

ное движение вод в течение всего года в юго-западном направлении со средней скоростью ~16 см/с. Общий перенос вод в юго-западном направлении за год наблюдений составил 5239 км (рис. 2б), что в 2.5 раза больше по длине, чем привнесение вод в восточную бассейна. Очевидно, что баланс достигается как за счет опускания в придонную область охлажденных поверхностных вод, так и за счет поступления придонных вод при горизонтальной циркуляции. Температура выходящего из Исландского бассейна придонного потока воды (ПБС-3562) в течение года изменялась в пределах от 2.64°C до 3.21°C, при средней 2.90°C. В восточной части моря Ирмингера у западного подножия хребта Рейкьянес была поставлена третья станция – ПБС-3580 (рис. 1), на которой было установлено два измерителя тече-

ний – один у дна на горизонте 2134 м (глубина 2203 м) и второй на горизонте 446 м.

Верхний горизонт наблюдений 446 м ПБС-3580 (рис. 2г) находился под воздействием крупномасштабного циклонического вихря диаметром более 300 км, который существовал с июня 2016 г. по март 2017 г. Его прогрессивно-векторная диаграмма течения искажена мезомасштабными возмущениями. Общий перенос по трассе составил 3185 км, а в южном направлении около 1000 км. Среднегодовая скорость течения на этом горизонте в среднем была в 1.5 раза выше, чем на придонном, и составила 9.7 см/с.

Прогрессивно-векторная диаграмма ПБС-3580 протяженностью 2109 км (рис. 2в), полученная по данным наблюдений на придонном горизонте 2134 м, показала, что течение здесь было направлено, практически, в южном направлении в тече-

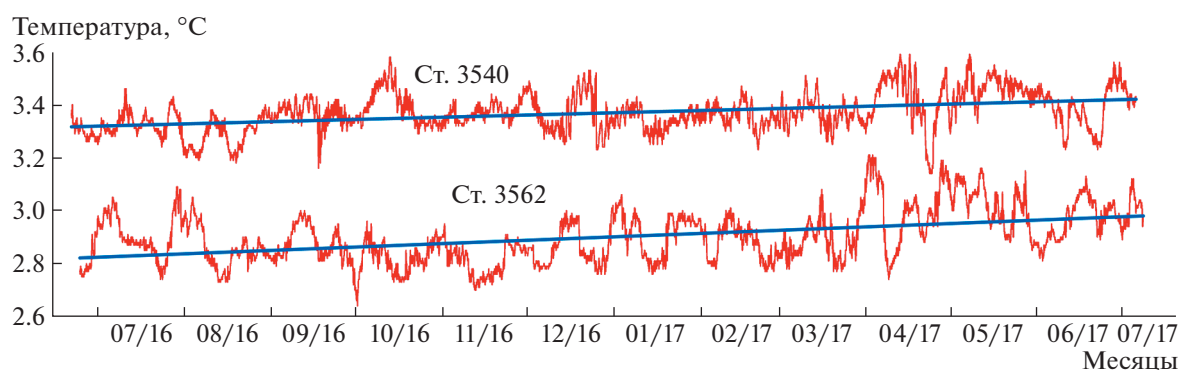


Рис. 3. Увеличение температуры воды, входящей (ПБС-3540) и выходящей (ПБС-3562) из Исландского бассейна, в течение года.

ние всего года наблюдений. На него заметное влияние оказывает динамика вихревой структуры, образованной в верхнем слое океана.

Анализ данных температуры показал, что в течение всего года измерений наблюдалось монотонное повышение температуры как входящих атлантических вод в придонную область восточной части Исландского бассейна (рис. 3), так и выходящих вод из западной части бассейна. Температура входящего в Исландский бассейн потока воды в течение года медленно росла, линейная интерполяция этого роста имеет вид:

$$T_{\text{вх}} = 3.32 + 2.74 \times 10^{-4}t,$$

где T — температура в $^{\circ}\text{C}$, t — количество дней наблюдений.

Линейная интерполяция изменения температуры придонной воды, выходящей из арктического бассейна $T_{\text{вых}}$ от времени наблюдений, рассчитанная по данным более чем годовых наблюдений, представлена в виде:

$$T_{\text{вых}} = 2.82 + 4.19 \times 10^{-4}t,$$

где T — температура в $^{\circ}\text{C}$, t — количество дней наблюдений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Анализ динамики придонных течений на всех трех ПБС показал, что среднемесячные скорости и направления течений (табл. 1) в течение всего года носят довольно стабильный характер. В восточной части разреза в бассейн осуществлялся приток придонной воды в северо-восточном направлении с температурой на $\sim 0.5^{\circ}$ выше, чем температура входящего из Арктики потока в южном направлении практически на таком же горизонте. Этот факт, очевидно, свидетельствует о том, что здесь отдача тепла в придонную морскую среду юго-восточной части Исландского бассей-

на является более сложным элементом глобальной системы циркуляции вод, который требует дополнительного исследования.

Записи скорости и направления течений на ПБС-3580 в море Ирмингера на горизонтах 446 и 2134 м показали, что существует связь между изменчивостью течений на этих горизонтах, которая очевидно связана с баротропными синоптическими колебаниями над океаном [15]. Сравнение хронограмм баротропных компонент приповерхностных геострофических течений, вычисленных по данным спутниковых измерений уровня моря, указывает на связь с данными измерения течения *in situ* на глубине 446 м. А изменчивость течений на хронограммах горизонта 446 м коррелирует с изменчивостью на горизонте 2134 м. Углубленное развитие этих связей открывает новые возможности для изучения океана из космоса с помощью привязки спутниковых данных к измерениям на ПБС *in situ*.

Тот факт, что придонное течение, втекающее в восточную часть Исландского бассейна в течение более года, движется в северо-восточном направлении, а на станциях 3562 и 3580 вытекает в юго-западном и южном направлении, указывает на его межгодовую стабильность. А это значит, что если измерять придонные течения и температуру в этих точках регулярно, то по их динамике можно контролировать климатические изменения. С другой стороны, двухслойная модель не предполагает втекания придонных атлантических вод в бассейн.

Данные спектрального анализа отмечают приливные и инерционные колебания с амплитудами до 20 см/с и периодами 13.9 и 12.4 ч соответственно, а также синоптические возмущения с периодами 4.5 и 17 сут (рис. 4) [12].

Сравнение роста температуры входящего и выходящего из Исландского бассейна придонных потоков показало, что общее потепление входящего потока за год составило 0.1° , при средней

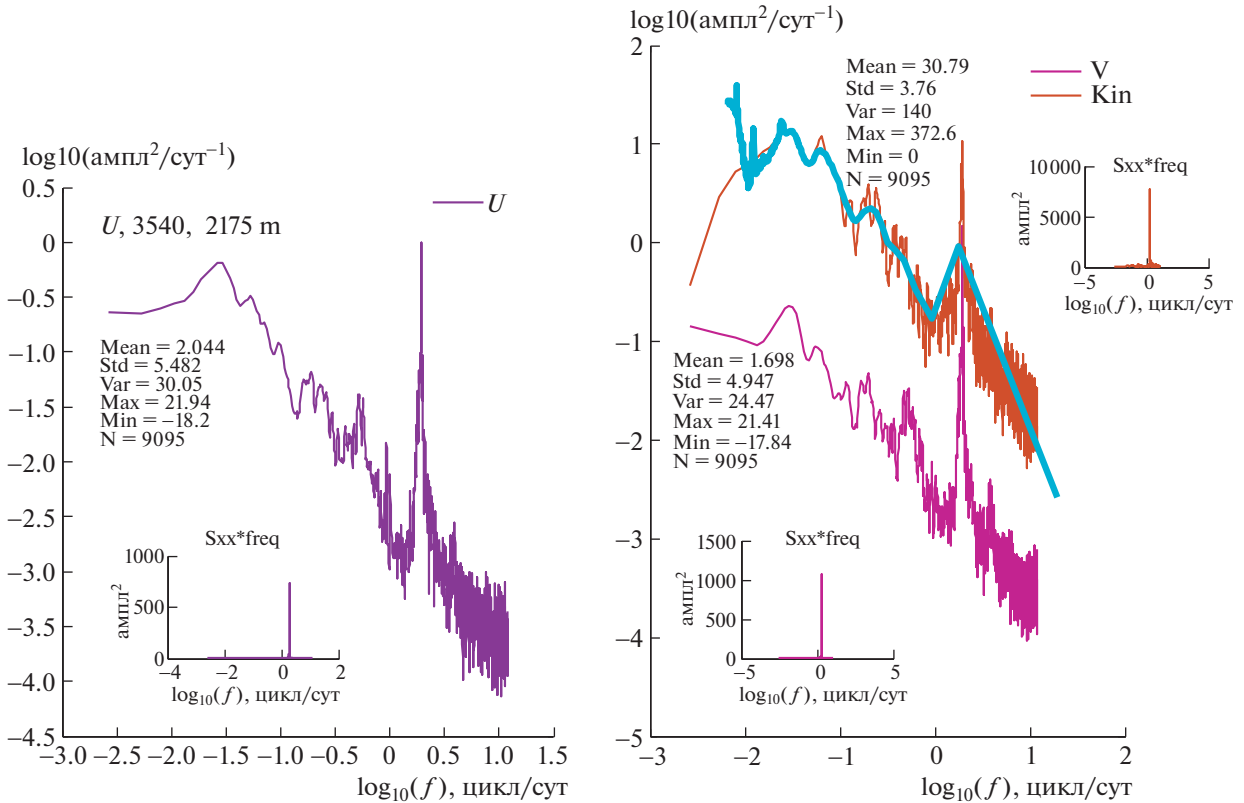


Рис. 4. Спектры компонент скорости течений и плотности кинетической энергии на ст. 3540, горизонт измерений 2175 м.

температуре 3.37°C , а выходящего — 0.15° , при средней 2.90°C . Эти данные показывают, что в придонной области моря реально наблюдаются климатические изменения.

Возможно, что баланс между поступлением вод из Атлантики и выходом вод из придонной области Исландского бассейна достигается как за счет опускания в придонную область охлажденных поверхностных вод, так и за счет охлаждения и горизонтального переноса придонных вод.

ВЫВОДЫ

1. В придонной области юго-восточной части Исландского бассейна наблюдалось втекание пришедших с юга придонных атлантических вод, а в западной части — вытекание из бассейна.

2. Движение воды во входящем и выходящем из бассейна потоках носит стабильный стационарный характер.

3. Скорость выхода придонных вод из Исландского бассейна в 2.5 раза превышает скорость поступления придонных вод в бассейн.

4. Экспериментальные данные показывают, что циркуляция вод в придонной юго-восточной области Исландского бассейна проходит несколько отлично от глобальной системы двух-

слойной циркуляции вод, что требует дополнительных исследований.

5. Непрерывные наблюдения в придонной области Исландского бассейна *in situ* показали, что во входящем и выходящем потоках происходит монотонное повышение температуры в течение года. В выходящих из бассейна водах повышение температуры происходит в 1.5 раза быстрее, чем во входящих в бассейн. А это предполагает, что мы наблюдаем процесс климатических изменений.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспедиции проведены при поддержке РФФИ (проект № 14-50-00095). Обработка данных частично выполнена в рамках Госзадания (тема № FMWE-2021-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисян А.С. // Вестник АН СССР. 1983. № 10. С. 83–89.
2. Добролюбов С.А., Соков А.В. Роль глубинных вод Северной Атлантики в изменчивости теплообмена океана и атмосферы // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2002. № 6. С. 42–48.
3. Гладышев С.В., Гладышев В.С., Соков А.В. и др. // ДАН. 2017. Т. 473. № 1. С. 93–97.

4. Koltermann K.P., Sokov A.V., Tereschenkov V.P., Dobroliubov S.A., Lorbacher K., Sy A. Decadal Changes in the Thermohaline Circulation of the North Atlantic // Deep-Sea Research II. 1999. V. 46. P. 109–138.
5. Сарафанов А.А., Фалина А.С., Соков А.В. Многолетние изменения характеристик и циркуляции глубинных вод на севере Атлантического: Роль региональных и внешних факторов // ДАН. 2013. Т. 450. № 4. С. 470–473.
6. Daniault N., Mercier H., Lherminier P., et al. The Northern North Atlantic Ocean Mean Circulation in the Early 21st Century // Progress in Oceanography. 2016. V. 146. P. 142–158.
7. Ланно С.С. К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы. М.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 125–129.
8. Broecker W.S. The Great Ocean Conveyor // Oceanography. 1991. V. 4 (2). P. 79–89.
9. Dickson R.R., Brown J. The Production of North Atlantic Deep Water: Sources, Rates, and Pathways // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1994. V. 99. № C6. P. 12319–12341.
10. Dickson R., Lazier J., Meincke J., Rhines P., Swift J. Long-term Coordinated Changes in the Convective Activity of the North Atlantic // Progress in Oceanography. 1996. V. 38. № 3. P. 241–295.
11. Lozier M.S., Bacon S., Bower A.S., et al. Overturning in the Subpolar North Atlantic Program: A New International Ocean Observing System // Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS). 2017. V. 98. № 4. P. 737–752.
12. Амбросимов А.К., Клювиткин А.А., Мельников В.А. Новые данные о сезонной изменчивости придонных течений и температуры в субарктической части Атлантического океана // Экологические системы и приборы. 2019. № 1. С. 38–44.
13. Клювиткин А.А., Политова Н.В., Новигатский А.Н. и др. // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 514–516.
14. Клювиткин А.А., Гладышев С.В., Кравчишина М.Д. и др. // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 170–172.
15. Шапрон Б., Кудрявцев В.Н., Коллард Ф. и др. Исследования субмезомасштабной изменчивости верхнего слоя океана по данным спутниковых наблюдений // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 6. С. 676–690.

MAPPING OF CLIMATIC CHANGES IN THE BOTTOM WATERS OF THE SUBARCTIC ATLANTIC DURING IN SITU OBSERVATIONS (ACCORDING TO ANNUAL CONTINUOUS IN SITU OBSERVATIONS 2016–2017)

A. K. Ambrosimov^{a,#} and A. A. Klyuvitkin^a

^a*P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: ambrosimov@ocean.ru*

Presented by Academician of the RAS L.I. Lobkovsky January 24, 2022

The work presents the results of continuous annual observations in situ of the circulation of currents and temperatures in the bottom Arctic regions of the energy-active zone of the Icelandic basin. Data were obtained at mooring buoy stations at a section of 59.5° N at depths of about 50 m from the bottom during 2016–2017. Intra-annual variability of bottom currents and temperature was investigated. It was shown that during the entire period there was a monotonous stationary movement of water at all stations, as well as an increase in temperature as bottom waters entering the basin, as well as leaving. At the same time, the annual temperature growth rate of the outlet stream was 1.5 times higher than the temperature increase of the inlet stream.

Keywords: North Atlantic, bottom currents, temperature, spatial and temporal variability, climatic changes