

## Пространственная структура и внутригодовая изменчивость фронта моря Уэдделла по данным реанализа NOAA OISST

Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева\*, Н. В. Никольский

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*e-mail: sea-ant@yandex.ru*

Поступила 15.07.2020; принята к публикации 11.11.2020; опубликована 25.12.2020

По данным реанализа NOAA OISST проанализирована пространственная структура фронта моря Уэдделла в климатическом поле температуры поверхности океана и оценены особенности климатического внутригодового хода характеристик фронта. Пространственное положение фронтальной зоны в море Уэдделла анализировалось по распределениям полного горизонтального градиента температуры. Характеристики фронта (положение экстремумов градиентов, соответствующих фронту, их величина и температура на оси фронта) определялись для каждого месяца на профилях меридиональных и зональных градиентов температуры вдоль меридианов и параллелей с дискретностью  $2.5^\circ$  по долготе и  $0.25^\circ$  по широте. Показано, что взаимодействие холодных вод моря Уэдделла, переносимых течениями в северном направлении вдоль берегов Антарктического п-ова, с более теплыми водами восточного шельфа Антарктического п-ова и поверхностной водной массой пролива Брансфилд приводит к формированию двух ветвей фронта моря Уэдделла. Эти ветви огибают с юга и севера обширный шельф у оконечности Антарктического п-ова и архипелага Жуэвиль и прослеживаются далее на восток вдоль границ поднятия дна, располагающегося примерно между  $62.5^\circ$  и  $64.5^\circ$  ю. ш. Южнее шельфа Южных Оркнейских о-вов две ветви сливаются в один фронт, который далее следует на восток. Он располагается вдоль свала глубин относительного мелководья между Южными Оркнейскими и Южными Сандвичевыми о-вами. В сезонном цикле интенсивности фронта моря Уэдделла выявлено временное запаздывание периода обострения в направлении с запада на восток. В проливе Брансфилд фронт наиболее интенсивен в феврале, между оконечностью Антарктического п-ова и Южными Оркнейскими о-вами – в марте, к востоку от Южных Оркнейских о-вов – в апреле. Ветвь фронта моря Уэдделла у северо-восточных берегов Антарктического п-ова усиливается в ноябре – январе, в западной части акватории к востоку от о-вов Джеймса Росса и Сноу-Хилл – в январе – феврале.

**Ключевые слова:** Юго-Западная Антарктика, море Уэдделла, температура поверхности океана, внутригодовая изменчивость, горизонтальные градиенты температуры, фронт моря Уэдделла.

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2019-0003 «Экспериментальные исследования изменчивости гидрофизических, гидрохимических и биооптических полей на разных пространственно-временных масштабах для выявления особенностей климатических изменений океанографических условий в атлантической части Антарктики».

**Для цитирования:** Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В. Пространственная структура и внутригодовая изменчивость фронта моря Уэдделла по данным реанализа NOAA OISST // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 4. С. 89–103. doi: 10.22449/2413-5577-2020-4-89-102

## **Spatial Structure and Intra-Annual Variability of Weddell Sea Front based on the Data of NOAA OISST Reanalysis**

**Yu. V. Artamonov, E. A. Skripaleva, N. V. Nikolsky**

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

\*e-mail: sea-ant@yandex.ru

Submitted 15.07.2020; revised 11.11.2020; published 25.12.2020

Based on the NOAA OISST reanalysis data, the spatial structure of the Weddell Sea Front in the climatic field of the sea surface temperature was analyzed and the seasonal variability of front's characteristics was estimated. The spatial position of the frontal zone in the Weddell Sea was analyzed using distributions of the total horizontal temperature gradient. The characteristics of the front (the position of the gradients' extrema corresponding to the front, their magnitude and temperature on the front axis) were determined for each month on the profiles of meridional and zonal temperature gradients along meridians and parallels with a discreteness of  $2.5^\circ$  of longitude and  $0.25^\circ$  of latitude. It is shown that the interaction of Weddell Sea cold waters, which are transported by currents northward along the Antarctic Peninsula coasts, with the warmer waters of the eastern shelf of the Antarctic Peninsula and the Bransfield Strait surface water causes formation of two branches of the Weddell Sea Front. These branches round from a vast shelf at the Antarctic Peninsula tip and the Joinville archipelago the south and north and are traced further east along the boundaries of the bottom rise located approximately between 62.5S and 64.5S. To the south of the South Orkney Islands shelf, the two branches merge into one front, which follows to the east along the depth dump of the relative shallow between the South Orkney and South Sandwich Islands. In the seasonal cycle of the Weddell Sea Front intensity, a time lag was revealed of the front intensification period in the direction from west to east. In Bransfield Strait the front is most intense in February, between the Antarctic Peninsula tip and the South Orkney Islands – in March, east of the South Orkney Islands – in April. The branch of the Weddell Sea Front off the northeastern of the Antarctic Peninsula coasts intensifies in November – January, in the western part of the water area east of the James Ross and Snow Hill Islands – in January – February.

**Keywords:** Southwest Antarctica, Weddell Sea, sea surface temperature, intra-annual variability, horizontal temperature gradients, Weddell Sea Front.

**Acknowledgements:** the work is performed under State Order no. 0555-2019-0003 «Experimental studies of the variability of hydrophysical, hydrochemical and bio-optical fields at different spatio-temporal scales to identify the features of climatic changes in oceanographic conditions in the Atlantic part of Antarctica».

**For citation:** Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A. and Nikolsky, N.V., 2020. Spatial Structure and Intra-Annual Variability of Weddell Sea Front based on the Data of NOAA OISST Reanalysis. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 89–102. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-89-102 (in Russian).

### **Введение**

Исследование фронтальной структуры Южного океана и ее изменчивости на различных временных масштабах – одна из важнейших задач современной океанографии. Гидрологические фронты являются важнейшими абиотическими факторами, определяющими уровень биопродуктивности вод, они оказывают большое влияние на распределение загрязняющих веществ в океане и на состояние океанических экосистем [1–5].

К одним из наиболее биопродуктивных районов Южного океана относятся моря Скоша и Уэдделла. По северной периферии круговорота моря Уэдделла (КМУ) происходит массовый перенос скоплений антарктического криля в восточном направлении [1, 6, 7]. В термохалинных полях северная граница КМУ проявляется в виде фронта моря Уэдделла (ФМУ). Несмотря на повышенный интерес к ФМУ в связи с его промысловым значением, он относится к числу наименее изученных фронтов Западной Антарктики вследствие суровых погодных условий. Анализ литературных источников [8–15], относящихся к исследованиям фронтальной структуры моря Уэдделла, показал, что информация о ФМУ крайне ограничена, а сведения о внутригодовой изменчивости его характеристик практически отсутствуют. Работы [8–11] базируются на эпизодических гидрологических измерениях, проводимых в разное время и в разных районах моря Уэдделла, работы [12, 13] основаны на устаревших архивных массивах гидрологических данных, в работах [14, 15] используются относительно короткие временные ряды спутниковых измерений температуры поверхности океана (ТПО). Пространственно-временная неоднородность данных контактных наблюдений и ограниченное их количество в холодный сезон, короткие временные ряды спутниковых измерений ТПО, использование разными авторами различных критериев выделения фронтов привели к заметным противоречиям и отсутствию единого представления о ФМУ. Так, в работе [8] утверждается, что ФМУ проявляется только в поверхностном слое резким понижением солёности по направлению к центральной части моря Уэдделла, тогда как в работе [13] выявлено, что в среднемноголетних термохалинных полях ФМУ на поверхности почти не прослеживается, а наблюдается в подповерхностном слое. В работах [14, 15] также отмечается, что в поле температуры поверхности океана ФМУ проявляется слабо. В [9] показано, что ФМУ прослеживается вдоль северо-восточных берегов Антарктического п-ова и далее на восток примерно до  $40^\circ$  з. д., она отделяет воды восточного шельфа Антарктического п-ова от вод северо-западной части моря Уэдделла. По данным гидрологических съемок, проведенных с ноября 1986 г. по март 1987 г. [10] и в марте 2002 г. [11], ФМУ хорошо прослеживался в полях температуры и солёности в западной части пролива Брансфилд, куда проникали более холодные и солёные воды моря Уэдделла. Заток вод моря Уэдделла в пролив Брансфилд наблюдался также по данным съемок в феврале – марте 2004 г. [16] и по среднемноголетним гидрологическим данным для февраля [12]. При этом в работе

[12] было показано, что в климатических термохалинных полях в феврале ФМУ проявляется на глубине подповерхностного минимума температуры, характерного для антарктической зимней водной массы.

Уточнить пространственное положение ФМУ на всей акватории моря Уэдделла и исследовать временную изменчивость его характеристик позволяют современные реанализы с высоким пространственно-временным разрешением, интерполирующие все имеющиеся данные контактных и спутниковых измерений в регулярные сетки. Для этой цели в данной работе используется наиболее полный современный массив реанализа *NOAA OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)*.

#### **Материалы и методика**

В работе использовались среднесуточные значения ТПО в узлах регулярной сетки с шагом  $0.25^\circ$  за 1982–2017 гг. из массива данных реанализа *NOAA OISST* (URL: [https://psl.noaa.gov/cgi-bin/db\\_search/DBListFiles.pl?did=132&tid=89459&vid=2423](https://psl.noaa.gov/cgi-bin/db_search/DBListFiles.pl?did=132&tid=89459&vid=2423)). Метод оптимальной интерполяции спутниковых и контактных измерений температуры учитывал сплоченность льда [17]. Среднесуточные значения температуры приводились к климатическому виду путем их осреднения для каждого месяца за соответствующие периоды. В результате помесечного осреднения значений ТПО за 36 лет ее синоптическая и межгодовая изменчивость сглаживалась. Далее рассчитывались значения горизонтальных градиентов температуры – меридиональных (МГТ), зональных (ЗГТ) и полных (ПГТ) в  $^\circ\text{C}/\text{км}$ . Пространственное положение фронтальной зоны в море Уэдделла анализировалось по распределениям ПГТ для каждого месяца. Отметим, что полный градиент ТПО не всегда позволяет выделить фронт, когда интенсивность фронта понижается, или разделить близко расположенные фронтальные разделы внутри одной области повышенных значений ПГТ (фронтальной зоны). Поэтому для более точного определения характеристик ФМУ положение экстремумов градиентов, соответствующих фронту, их величина и температура на оси фронта (вычисляемая как среднее между двумя значениями температуры, по которым рассчитан градиент) определялись для каждого месяца на меридиональных профилях МГТ с дискретностью  $2.5^\circ$  по долготе и зональных профилях ЗГТ с дискретностью  $0.25^\circ$  по широте. Отрицательное значение МГТ (ЗГТ) показывает понижение температуры в направлении с севера на юг (с запада на восток). Подобная методика, т. е. анализ распределений меридиональных (зональных) градиентов температуры или зональных (меридиональных) составляющих полного вектора скорости течений вдоль меридианов (параллелей) для исследования изменчивости характеристик течений и фронтов, имеющих квазизональную (квазимеридиональную) направленность, успешно применяется в океанографических исследованиях [13–15, 18–21].

В работе анализировались среднемесячные распределения ТПО и ее градиентов на акваториях, где сплоченность льда была ниже 80–90 %. При интерпретации особенностей пространственного положения ФМУ анализировалась схема донной топографии по данным *GEBCO* (URL: <http://www.gebco.net>).

### Основные результаты

Анализ пространственных распределений среднемесячных климатических полей температуры на поверхности моря Уэдделла показал их значительную пространственно-временную неоднородность. В летний период Южного полушария хорошо прослеживаются зоны сгущения изотерм и, как следствие, области повышенных значений ПГТ, которые располагаются вдоль всей северной границы моря до 30° з. д. Особенно ярко эти области выражены в западной части моря Уэдделла и в проливе Брансфилд (рис. 1, *a, c*). Зимой почти всю акваторию моря занимают льды выше 80%-ной сплоченности (рис. 1, *b*).

Судя по конфигурации изотерм у восточных берегов Антарктического п-ова и архипелага Жуэнвиль, имеющих характерный прогиб на север, можно констатировать, что холодные воды моря Уэдделла переносятся течениями на западной периферии КМУ в северном направлении вдоль берегов Антарктического п-ова, при этом часть этих вод проникает в пролив Брансфилд. Это согласуется с данными гидрологических съемок, выполненных в различные годы [1, 10, 11, 16]. Холодные поверхностные воды моря Уэдделла, взаимодействуя с более теплыми водами восточного шельфа Антарктического п-ова и поверхностной водной массой пролива Брансфилд, формируют зоны высоких ПГТ, соответствующие двум ветвям фронта моря Уэдделла (ФМУ-1 и ФМУ-2) (рис. 1, *c, d*). Совместный анализ распределений

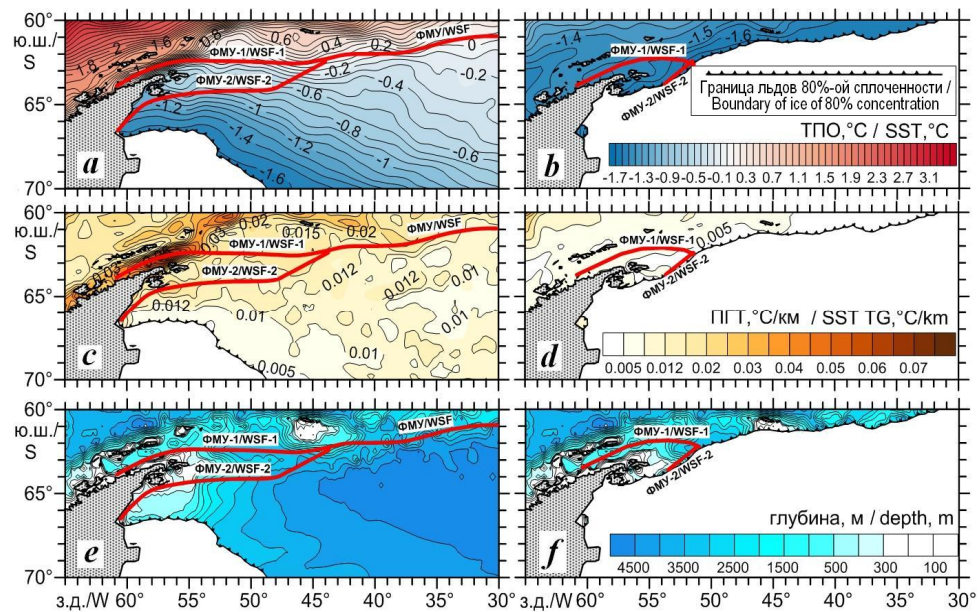


Рис. 1. Схематическое положение ветвей ФМУ (красные линии) на фоне пространственных распределений ТПО (°C) (*a, b*), ПГТ (°C/км) (*c, d*) и донной топографии (*e, f*) в море Уэдделла в феврале (*a, c, e*) и августе (*b, d, f*)

Fig. 1. Schematic position of the Weddell Sea Front (WSF) branches (red lines) against the background of spatial distributions of sea surface temperature (SST) (°C) (*a, b*), SST total gradient (SST TG) (°C/km) (*c, d*) and bottom topography (*e, f*) in the Weddell Sea in February (*a, c, e*) and August (*b, d, f*)

ПГТ (рис. 1, *c, d*) и донной топографии (рис. 1, *e, f*) показал, что ветви ФМУ огибают с юга и севера обширный шельф у оконечности Антарктического п-ова и архипелага Жуэнвиль и проходят далее на восток вдоль северной и южной границ прослеживающегося примерно между  $62.5^\circ$  и  $64.5^\circ$  ю. ш. поднятия дна. Южнее шельфа Южных Оркнейских о-вов ФМУ-1 и ФМУ-2 сливаются в один фронт (ФМУ). Далее ФМУ следует на восток вдоль свала глубин относительного мелководья между Южными Оркнейскими и Южными Сандвичевыми о-вами.

Согласно среднемесячным распределениям ПГТ, фронтальная зона моря Уэдделла (ФЗМУ) характеризуется заметными изменениями интенсивности в зависимости от долготы и сезона. В течение всего года она наиболее обострена в проливе Брансфилд (летом значения ПГТ составляют  $0.03\text{--}0.06$  °C/км) и западной части моря (ПГТ  $\sim 0.01\text{--}0.015$  °C/км). Зимой значения ПГТ в этих районах уменьшаются до  $0.005$  °C/км. В восточной части моря значения ПГТ в летний период не превышают  $0.01$  °C/км, зимой ФЗМУ не выявляется вследствие смещения границы льдов на север.

Более детально проанализировать структуру ФМУ, имеющего преобладающую зональную ориентацию, и внутригодовую изменчивость его характеристик позволяют распределения меридиональных градиентов ТПО, примеры которых представлены на рис. 2. В западной части акватории хорошо прослеживаются два экстремума отрицательных значений МГТ, соответствующие ветвям ФМУ в проливе Брансфилд (ФМУ-1) и у северо-восточных берегов Антарктического п-ова (ФМУ-2) (рис. 2, *a*). Две ветви ФМУ прослеживаются дальше на восток почти до  $45^\circ$  з. д. (долгота Южных Оркнейских о-вов) (рис. 2, *b, c*). Восточнее наиболее четко прослеживается одна ветвь ФМУ (рис. 2, *d-f*).

Анализ сезонного цикла характеристик ветвей ФМУ (рис. 3) показал, что в западной части акватории ФМУ-1 прослеживается в течение всего года. В проливе Брансфилд ФМУ-1 наиболее интенсивен в феврале, значения МГТ достигают  $-0.05 \dots -0.06$  °C/км. Восточнее фронт ослабевает, а максимум его интенсивности ( $-0.015 \dots -0.02$  °C/км) в сезонном цикле отмечается в марте. К востоку от Южных Оркнейских о-вов максимум интенсивности ФМУ в сезонном цикле смещается на апрель (МГТ  $\sim -0.01 \dots -0.02$  °C/км). Таким образом, выявлено временное запаздывание периода интенсификации ФМУ-1 и ФМУ в сезонном цикле на два месяца в направлении с запада на восток. Летняя интенсификация ФМУ-1 и ФМУ обусловлена усилением контрастов температуры между холодными водами, располагающимися к югу от фронта и образующимися в результате ледотаяния, и более теплыми водами к северу от фронта, формирующимися в результате максимального летнего прогрева и переносимыми на восток вдоль южной периферии Антарктического циркумполярного течения (АЦТ). В зимние месяцы Южного полушария (июль – сентябрь), в период интенсивного ледообразования и смещения границы льдов 80%-ной сплоченности на север, а также максимального выхолаживания поверхностных вод южной периферии АЦТ ФМУ резко ослабевает, а в августе почти исчезает (рис. 2, *d-f*; 3).



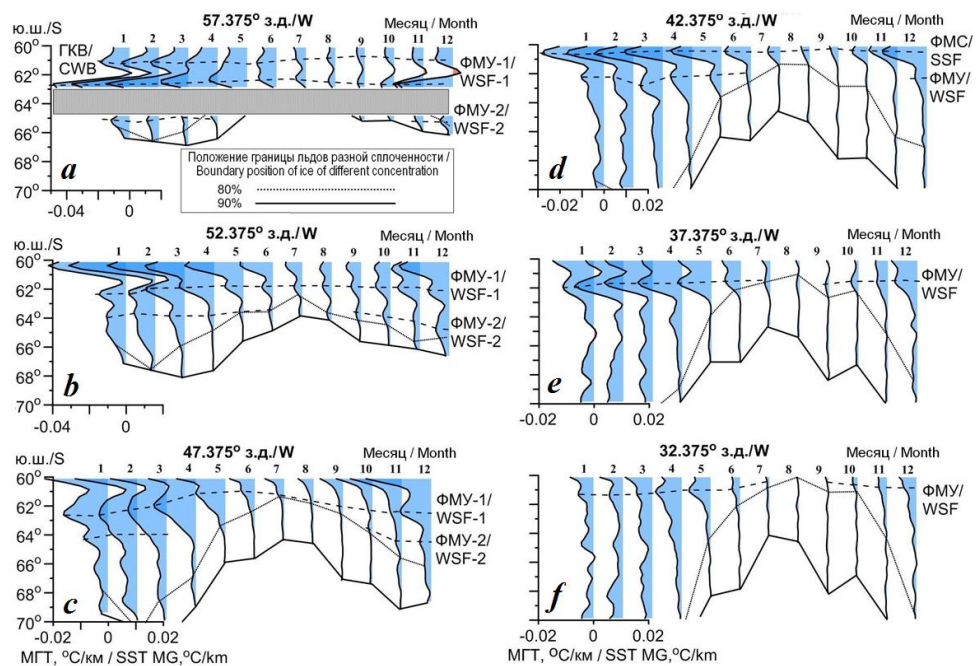


Рис. 2. Среднемесячные распределения МГТ, положение границы льдов и положение ФМУ-1 и ФМУ-2 (штриховые линии) для каждого месяца вдоль разных меридианов

Fig. 2. Monthly average distributions of the SST meridional gradient (SST MG), ice boundary position and WSF-1 and WSF-2 position (dashed lines) for each month along various meridians

Сезонные смещения широтного положения ФМУ-1 максимальны в центральной части акватории юго-западнее границы шельфа Южных Оркнейских о-вов, где фронт проходит над глубоководным участком моря, и на  $47.375^\circ$  з. д. достигают почти  $1.75^\circ$ . В конце осени – начале зимы Южного полушария (май – июнь) ФМУ-1 смещается на север к  $61^\circ$  ю. ш., летом (декабрь – январь) – на юг к  $62.75^\circ$  ю. ш. Широтные смещения ФМУ-1 в проливе Брансфилд и в западной части акватории и ФМУ в восточной части моря не превышают  $0.5^\circ$  (рис. 3).

ФМУ-2 у северо-восточных берегов Антарктического п-ова характеризуется квазимеридиональной ориентацией и более четко прослеживается в поле зональных градиентов ТПО в виде экстремумов их отрицательных значений (рис. 4, а). Здесь ФМУ-2, также как и ФМУ-1 и ФМУ, обостряется летом Южного полушария (рис. 4, б), что связано с увеличением контрастов температуры вследствие интенсивного прогрева вод над мелководьем Антарктического шельфа, взаимодействующих с более холодными водами моря Уэдделла, переносимыми на западной периферии КМУ в северном направлении. Почти на всей протяженности в сезонном цикле ФМУ-2 усиливается в январе, при этом его интенсивность постепенно уменьшается в северном направлении. Так, на южном участке фронта ( $66.875^\circ$  ю. ш.) значение ЗГТ в январе достигает  $-0.03^\circ\text{C}/\text{км}$ , на  $65.875^\circ$  ю. ш.  $-0.025^\circ\text{C}/\text{км}$ . На параллели  $65.375^\circ$  ю. ш. ФМУ-2 в сезонном цикле усиливается в ноябре –

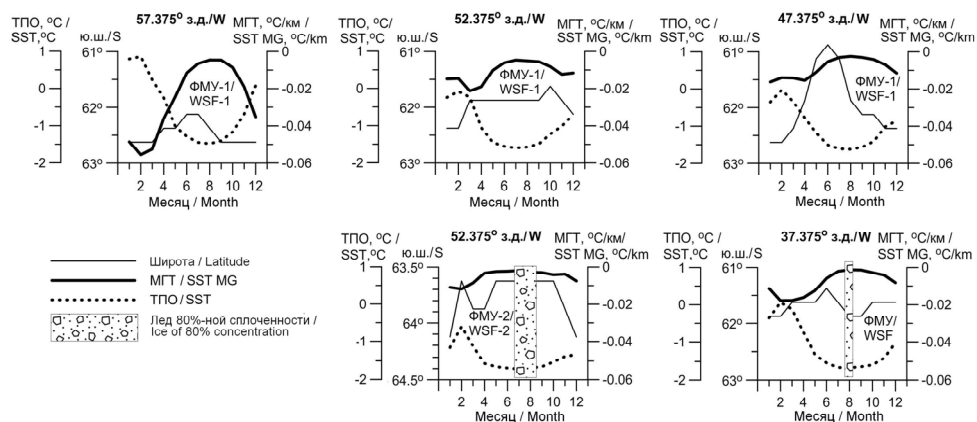


Рис. 3. Внутригодовой цикл характеристик ветвей ФМУ на отдельных меридианах  
 Fig. 3. Intra-annual cycle of WSF branches' characteristics at individual meridians

декабре, значения ЗГТ составляют  $-0.02$  °C/км (рис. 4, *b*). Квазизональный участок ФМУ-2 проявляется в поле МГТ в западной части акватории восточнее о-вов Джеймса Росса и Сноу-Хилл примерно до  $45^\circ$  з. д. (рис. 2, *a – c*). Здесь интенсификация ФМУ-2 наблюдается в феврале (МГТ  $\sim -0.01$  °C/км) (рис. 3). Зимой Южного полушария ФМУ-2 почти размывается.

Сезонные смещения пространственного положения ФМУ-2 в целом невелики. Они не превышают  $0.75^\circ$  долготы у берегов Антарктического п-ова, и  $0.5^\circ$  широты в западной части акватории. Так, на  $65.375^\circ$  ю. ш. ФМУ-2

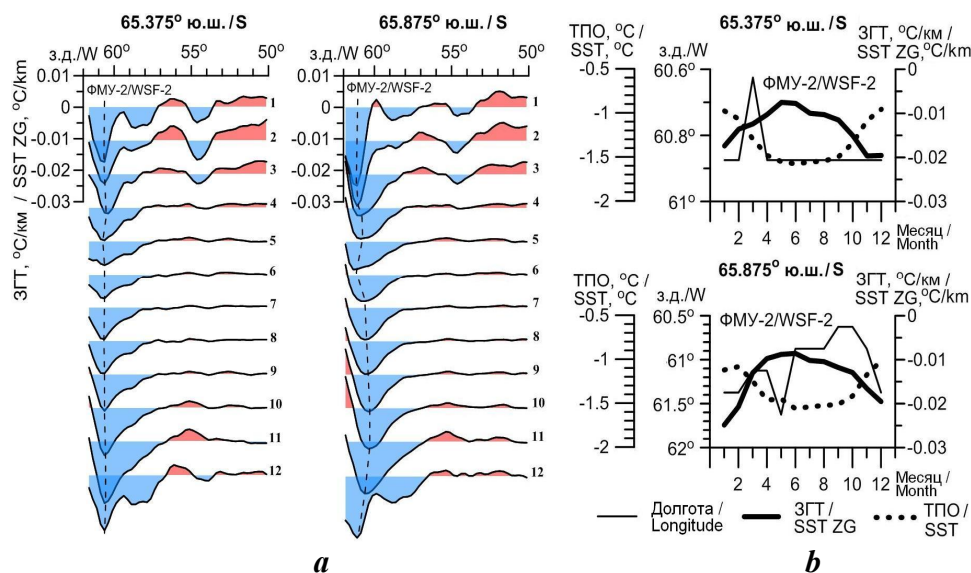


Рис. 4. Среднемесячные распределения ЗГТ и положение ФМУ-2 (штриховые линии) для каждого месяца (*a*) и внутригодовой цикл характеристик ФМУ вдоль параллелей  $65.375^\circ$  и  $65.875^\circ$  ю. ш. (*b*)

Fig. 4. Monthly average distributions of the SST zonal gradient (SST ZG) and WSF-2 position (dashed lines) for each month (*a*) and intra-annual cycle characteristics of WSF along  $65.375^\circ$  and  $65.875^\circ$ S parallels (*b*)



располагается в течение года между  $60.375^\circ$  и  $60.875^\circ$  з. д., на  $65.875^\circ$  ю. ш. – между  $60.625^\circ$  и  $61.375^\circ$  з. д. (рис. 4, *b*), на  $52.375^\circ$  з. д. – между  $63.625^\circ$  и  $64.125^\circ$  ю. ш. (рис. 3).

Температура на оси ветвей ФМУ в сезонном цикле изменяется с годовым периодом. Ее максимум для ФМУ-1 и ФМУ на всей акватории и для ФМУ-2 в западной части моря отмечается в феврале, минимум – в июле – августе. Температурный диапазон ФМУ-1 в проливе Брансфилд составляет  $1^\circ\text{C}$  летом и  $-1.5^\circ\text{C}$  зимой, к востоку он понижается до  $-0.5 \dots 0^\circ\text{C}$  летом и  $-1.8 \dots -1.6^\circ\text{C}$  зимой. В восточной части моря ФМУ формируется в диапазоне температуры от  $0^\circ\text{C}$  летом до  $-1.8^\circ\text{C}$  зимой (рис. 3). Температурный диапазон ФМУ-2 у северо-восточных берегов Антарктического п-ова характеризуется смещением максимума на декабрь ( $-1^\circ\text{C}$ ), минимума – на июнь ( $-1.5^\circ\text{C}$ ) (рис. 4, *b*).

### Выводы

На основе данных реанализа *NOAA OISST* исследована пространственная структура фронта моря Уэдделла и сезонная изменчивость его характеристик. Показано, что холодные воды моря Уэдделла, переносимые течениями на западной периферии КМУ в северном направлении вдоль берегов Антарктического п-ова, проникают в пролив Брансфилд. Взаимодействие этих вод с более теплыми водами восточного шельфа Антарктического п-ова и поверхностной водной массой пролива Брансфилд приводит к формированию двух ветвей фронта моря Уэдделла (ФМУ-1 и ФМУ-2). Ветви ФМУ огибают с юга и севера обширный шельф у оконечности Антарктического п-ова и архипелага Жуэнвиль и прослеживаются далее на восток вдоль границ располагающегося примерно между  $62.5^\circ$  и  $64.5^\circ$  ю. ш. поднятия дна. Южнее шельфа Южных Оркнейских о-вов ФМУ-1 и ФМУ-2 сливаются в один фронт (ФМУ), который следует на восток вдоль свала глубин относительно мелководья между Южными Оркнейскими и Южными Сандвичевыми о-вами.

В сезонном цикле интенсивности ФМУ-1 и ФМУ выявлено временное запаздывание периода их обострения в направлении с запада на восток. В проливе Брансфилд фронт наиболее интенсивен в феврале, между оконечностью Антарктического п-ова и Южными Оркнейскими о-вами – в марте, к востоку от Южных Оркнейских о-вов – в апреле. ФМУ-2 у северо-восточных берегов Антарктического п-ова усиливается в ноябре – январе, в западной части акватории к востоку от о-вов Джеймса Росса и Сноу-Хилл – в январе – феврале. Летняя интенсификация ФМУ-1 и ФМУ обусловлена усилением контрастов температуры между холодными водами, располагающимися к югу от фронта и образующимися в результате ледотаяния, и более теплыми водами к северу от фронта, формирующимися в результате летнего прогрева и переносимыми на восток вдоль южной периферии АЦТ. В зимние месяцы Южного полушария (июль – сентябрь), в период интенсивного ледообразования и выхолаживания поверхностных вод южной периферии АЦТ, ФМУ резко ослабевает, а в августе почти исчезает. Для ФМУ-2 у северо-восточных берегов Антарктического п-ова летнее обострение интенсивности связано с увеличением контрастов температуры

вследствие интенсивного прогрева вод над мелководьем Антарктического шельфа, взаимодействующих с более холодными водами моря Уэдделла, переносимыми в северном направлении.

Показано, что сезонные смещения широтного положения ФМУ-1 максимальны в центральной части акватории юго-западнее границы шельфа Южных Оркнейских о-вов, где фронт проходит над глубоководным участком моря. Сезонные смещения пространственного положения ФМУ-2 в целом невелики.

Температура на оси ветвей ФМУ в сезонном цикле изменяется с годовым периодом. Ее максимум для ФМУ-1 и ФМУ на всей акватории и для ФМУ-2 в западной части моря отмечается в феврале, минимум – в июле – августе. Температурный диапазон ФМУ-2 у северо-восточных берегов Антарктического п-ова характеризуется смещением максимума на декабрь, минимума – на июнь.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Масленников В. В.* Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. М. : Изд-во ВНИРО, 2003. 295 с. URL: [https://atlantniro.ru/images/stories/foto\\_sobitij/sys\\_inspectirovania\\_antkom/systema\\_nau4nogo\\_nablydenija/ruk\\_i\\_spravo4naj\\_literatura/knigi/Klimati4eskie\\_kolebania.pdf](https://atlantniro.ru/images/stories/foto_sobitij/sys_inspectirovania_antkom/systema_nau4nogo_nablydenija/ruk_i_spravo4naj_literatura/knigi/Klimati4eskie_kolebania.pdf) (дата обращения: 20.11.2020).
2. *Sokolov S., Rintoul S. R.* On the relationship between fronts of the Antarctic Circumpolar Current and surface chlorophyll concentrations in the Southern Ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007. Vol. 112, iss. C7. C07030. doi:10.1029/2006JC004072
3. Fronts and habitat zones in the Scotia Sea / H. Venables [et al.] // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2012. Vol. 59–60. P. 14–24. doi:10.1016/j.dsr2.2011.08.012
4. *Lohmann R., Belkin I. M.* Organic pollutants and ocean fronts across the Atlantic Ocean: A review // *Progress in Oceanography*. 2014. Vol. 128. P. 172–184. doi:10.1016/j.pocean.2014.08.013
5. Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate / C. C. Chapman [et al.] // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10, iss. 3. P. 209–219. doi:10.1038/s41558-020-0705-4
6. *Шульговский К. Е.* Крупномасштабная изменчивость океанологических условий в западной части Атлантического сектора Антарктики и ее влияние на распределение криля. Калининград : АтлантНИРО, 2005. 148 с.
7. *Аржанова Н. В., Артамонова К. В.* Гидрохимическая структура вод в районах промысла антарктического криля *Euphausia superba Dana* // Труды ВНИРО. Москва : Изд-во ВНИРО, 2014. Т. 152. С. 118–132.
8. *Gordon A. L., Georgi D. T., Taylor H. W.* Antarctic Polar Front Zone in Western Scotia Sea – Summer 1975 // *Journal of Physical Oceanography*. 1977. Vol. 7, iss. 3. P. 309–328. doi:10.1175/1520-0485(1977)007<0309:APFZIT>2.0.CO;2
9. *Peterson R. G., Stramma L.* Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean // *Progress in Oceanography*. 1991. Vol. 26, iss. 1. P. 1–73. doi:10.1016/0079-6611(91)90006-8

10. *Niller P. P., Amos A., Hu J.-H.* Water masses and 200 m relative geostrophic circulation in the western Bransfield Strait region // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers.* 1991. Vol. 38, iss. 8–9. P. 943–959. doi:10.1016/0198-0149(91)90091-S
11. Результаты океанографических исследований в западной части пролива Брансфилда в марте 2002 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Український антарктичний журнал.* 2003. № 1. С. 7–16.
12. *Артамонов Ю. В.* Особенности гидрологической структуры зоны слияния вод морей Уэдделла и Скотия летом южного полушария // *Системы контроля окружающей среды.* Севастополь : МГИ НАН, 2002. Вып. 4. С. 371–380.
13. Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Юго-Западной Атлантики и прилегающих акваторий Антарктики по гидрологическим и спутниковым данным / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Океанология.* 2005. Т. 45, № 5. P. 656–669.
14. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А.* Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // *Исследование Земли из космоса.* 2005. № 4. С. 62–75.
15. *Артамонов Ю. В., Ломакин П. Д., Скрипалева Е. А.* Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик Фронта моря Скотия по спутниковым измерениям температуры поверхности океана // *Морской гидрофизический журнал.* 2008. № 1. P. 66–76.
16. Dynamics of the current system in the southern Drake Passage / M. Zhou [et al.] // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 2010. Vol. 57, iss. 9. P. 1039–1048. doi:10.1016/j.dsr.2010.05.012
17. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature / R. W. Reynolds [et al.] // *Journal of Climate.* 2007. Vol. 20, iss. 22. P. 5473–5496. doi:10.1175/2007JCLI1824.1
18. *Richardson P. L., McKee T. K.* Average seasonal variation of the Atlantic equatorial currents from historical ship drifts // *Journal of Physical Oceanography.* 1984. Vol. 14, iss. 7. P. 1226–1238. doi:10.1175/1520-0485(1984)014<1226:ASVOTA>2.0.CO;2
19. *Rintoul S. R., Donguy J. R., Roemmich D. H.* Seasonal evolution of upper ocean thermal structure between Tasmania and Antarctica // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 1997. Vol. 44, iss. 7. P. 1185–1202. doi:10.1016/S0967-0637(96)00125-2
20. *Morrow R., Brut A., Chaigneau A.* Seasonal and interannual variations of the upper ocean energetics between Tasmania and Antarctica // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 2003. Vol. 50, iss. 3. P. 339–356. doi:10.1016/S0967-0637(03)00015-3
21. *Казьмин А. С.* Устойчивые термические фронты в Черном море: существование, изменчивость и связь с атмосферным воздействием // *Океанология.* 2016. Т. 56, № 3. С. 364–369. doi:10.7868/S0030157416030114

*Об авторах:*

**Артамонов Юрий Владимирович**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ResearcherID:** AAC-6651-2020, [artam-ant@yandex.ru](mailto:artam-ant@yandex.ru)

**Скрипалева Елена Александровна**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ResearcherID:** AAC-6648-2020, [sea-ant@yandex.ru](mailto:sea-ant@yandex.ru)

**Никольский Николай Викторович**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: AAC-7723-2020**, *nikolsky.geo@gmail.com*

*Заявленный вклад авторов:*

**Артамонов Юрий Владимирович** – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, разработка методик, качественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы, формулирование выводов

**Скрипалева Елена Александровна** – обзор литературы по проблеме исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация, обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, подготовка текста статьи, доработка текста

**Никольский Николай Викторович** – разработка и отладка компьютерных программ для обработки данных, компьютерная реализация алгоритмов, построение графиков и схем, участие в обсуждении материалов статьи

#### REFERENCES

1. Maslennikov, V.V., 2003. *Climatic Variability and Marine Ecosystem of the Antarctic*. Moscow: VNIRO Publishing, 295 p. (in Russian).
2. Sokolov, S. and Rintoul, S.R., 2007. On the Relationship between Fronts of the Antarctic Circumpolar Current and Surface Chlorophyll Concentrations in the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C7), C07030. doi:10.1029/2006JC004072
3. Venables, H., Meredith, M.P., Atkinson, A. and Ward, P., 2012. Fronts and Habitat Zones in the Scotia Sea. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 59–60, pp. 14–24. doi:10.1016/j.dsr2.2011.08.012
4. Lohmann, R. and Belkin, I.M., 2014. Organic Pollutants and Ocean Fronts across the Atlantic Ocean: A Review. *Progress in Oceanography*, 128, pp. 172–184. doi:10.1016/j.pocean.2014.08.013
5. Chapman, C.C., Lea, M.-A., Meyer, A., Sallée, J.-B. and Hindell, M., 2020. Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate. *Nature Climate Change*, 10(3), pp. 209–219. doi:10.1038/s41558-020-0705-4
6. Shulgovskiy, K.E., 2005. [*Large-Scale Variability of Oceanological Conditions in the Western Part of the Atlantic Sector of the Antarctic and its Influence on the Distribution of Krill*]. Kaliningrad: AtlantNIRO, 160 p. (in Russian).
7. Arzhanova, N.V. and Artamonova, K.V., 2014. Hydrochemical Structure of Water Masses in Areas of the Antarctic Krill (*Euphausia Superba* Dana) Fisheries. In: VNIRO, 2014. *Trudy VNIRO*. Moscow: VNIRO Publishing House. Vol. 152, pp. 118–132 (in Russian).
8. Gordon, A.L., Georgi, D.T. and Taylor, H.W., 1977. Antarctic Polar Front Zone in Western Scotia Sea – Summer 1975. *Journal of Physical Oceanography*, 7(3), pp. 309–328. doi:10.1175/1520-0485(1977)007<0309:APFZIT>2.0.CO;2
9. Peterson, R.G. and Stramma, L., 1991. Upper-level Circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 26(1), pp. 1–73. doi:10.1016/0079-6611(91)90006-8
10. Niller, P.P., Amos, A. and Hu, J.-H., 1991. Water Masses and 200 m Relative Geostrophic Circulation in the Western Bransfield Strait Region. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 38(8–9), pp. 943–959. doi:10.1016/0198-0149(91)90091-S

11. Artamonov, Yu., Romanov, A., Vnukov, Yu., Perov, A. and Stepura, I., 2003. Results of the Oceanographical Research at the Western Bransfield Strait during March 2002. *Ukrainian Antarctic Journal*, (1), pp. 7–16 (in Russian).
12. Artamonov, Yu.V., 2002. Features of the Hydrological Structure of the Confluence Zone of the Weddell and Scotia Seas in the Summer of the Southern Hemisphere. In: MHI, 2002. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: MHI. Iss. 4, pp. 371–380 (in Russian).
13. Artamonov, Yu.V., Bulgakov, N.P., Lomakin, P.D., Skripaleva, E.A., Artamonov, A.Yu. and Stanichnii, S.V., 2005. Structure and Seasonal Variability of Large-Scale Fronts in the Southwestern Atlantic and Adjacent Basins of the Antarctica Based on Hydrological and Satellite Data. *Oceanology*, 45(5), pp. 617–630.
14. Artamonov, Yu.V. and Skripaleva, E.A., 2005. The Structure and Seasonal Variability of the Large-Scale Fronts in the Atlantic Ocean on the Basis of Satellite Data. *Issledovaniye Zemli iz Kosmosa*, (4), pp. 62–75 (in Russian).
15. Artamonov, Yu.V., Lomakin, P.D. and Skripaleva, E.A., 2008. Seasonal and Interannual Variability of the Characteristics of Scotia-Sea Front Based on the Satellite Measurements of Sea-Surface Temperature. *Physical Oceanography*, 18(1), pp. 52–62. doi:10.1007/s11110-008-9009-3
16. Zhou, M., Zhu, Yi., Dorland, R.D. and Measures, C.I., 2010. Dynamics of the Current System in the Southern Drake Passage. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(9), pp. 1039–1048. doi:10.1016/j.dsr.2010.05.012
17. Reynolds, R.W., Smith, T.M., Liu, C., Chelton, D.B., Casey, K.S. and Schlax, M.G., 2007. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 20(22), pp. 5473–5496. doi:10.1175/2007JCLI1824.1
18. Richardson, P.L. and McKee, T.K., 1984. Average Seasonal Variation of the Atlantic Equatorial Currents from Historical Ship Drifts. *Journal of Physical Oceanography*, 14(7), pp. 1226–1238. doi:10.1175/1520-0485(1984)014<1226:ASVOTA>2.0.CO;2
19. Rintoul, S.R., Donguy, J.R. and Roemmich, D.H., 1997. Seasonal Evolution of Upper Ocean Thermal Structure between Tasmania and Antarctica. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 44(7), pp. 1185–1202. doi:10.1016/S0967-0637(96)00125-2
20. Morrow, R., Brut, A. and Chaigneau, A., 2003. Seasonal and Interannual Variations of the Upper Ocean Energetics between Tasmania and Antarctica. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 50(3), pp. 339–356. doi:10.1016/S0967-0637(03)00015-3
21. Kazmin, A.S., 2016. Persistent Thermal Fronts in the Black Sea: Existence, Variability, and Response to Atmospheric Forcing. *Oceanology*, 56(3), pp. 336–341. doi:10.1134/S0001437016030115

*About the authors:*

**Yuri V. Artamonov**, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), **ResearcherID: AAC-6651-2020**, [artam-ant@yandex.ru](mailto:artam-ant@yandex.ru)

**Elena A. Skripaleva**, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ResearcherID: AAC-6648-2020**, [sea-ant@yandex.ru](mailto:sea-ant@yandex.ru)

**Nikolay V. Nikolsky**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ResearcherID: AAC-7723-2020**, *nikolsky.geo@gmail.com*

*Contribution of the authors:*

**Yuri V. Artamonov** – general scientific supervision of the research, setting of study aims and objectives, development of methods, qualitative analysis of the results and interpretation thereof, discussion of the study results, drawing conclusions

**Elena A. Skripaleva** – review of literature on the research topic, qualitative analysis of the results and interpretation thereof, processing and description of the study results, discussion of the study results, drawing conclusions, article text preparation and refinement

**Nikolay V. Nikolsky** – development and debugging of software for data secondary processing, computer implementation of algorithms, chart and diagram construction, participation in discussion of the article

*All the authors have read and approved the final manuscript.*