

**Распределение оптических и гидрологических  
характеристик в проливе Антарктика  
по данным измерений в январе 2022 года  
в 87-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш»**

**А. А. Латушкин <sup>1, ✉</sup>, В. И. Пономарев <sup>2</sup>, П. А. Салюк <sup>2</sup>,  
Д. И. Фрей <sup>1, 3</sup>, Н. А. Липинская <sup>1</sup>, С. П. Шкорба <sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

<sup>2</sup> *Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,  
Владивосток, Россия*

<sup>3</sup> *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия*  
✉ *sevsalat@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена после рецензирования 25.10.2022;  
принята к публикации 08.11.2022.

*Аннотация*

*Цель.* Цель работы – исследование разномасштабных особенностей распределения гидрооптических и гидрологических характеристик в проливе Антарктика по данным контактных и спутниковых измерений в январе 2022 г. в 87-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш».

*Методы и результаты.* Использовались данные комплексных натуральных измерений, выполненных на дрейфовых станциях в проливе Антарктика 27–28 января 2022 г. в рамках 87-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». Дополнительно использовались спутниковые данные. С применением комплекса зондирующей гидрофизической аппаратуры получены вертикальные профили температуры, солёности, растворенного кислорода, концентрации хлорофилла *a*, интенсивности флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества, показателя ослабления направленного света на длине волны 660 нм и фотосинтетически активной радиации. На основе полученных данных определены основные особенности мезомасштабной циркуляции в пределах циклонического круговорота над глубокой впадиной южной части пролива. Совместный анализ полученных в антарктической экспедиции гидрооптических, гидрологических характеристик и спутниковых измерений в проливе Антарктика показал наличие системы чередующихся антициклонических и циклонических вихрей. Также показано, что в области дрейфа льда, загрязненного грунтом суши или донными осадками шельфа, образуется зона повышенной мутности, связанная с поступлением в воду терригенной взвеси при таянии загрязненного льда.

*Выводы.* Система разномасштабных вихрей и течений в проливе Антарктика способствует обмену между водами верхнего и глубинного слоев пролива, а также между водами моря Уэдделла, распространяющимися на северо-северо-запад вдоль склона котловины пролива, прилегающего к кромке шельфа Антарктического п-ова, и водами пролива Браснфилда, распространяющимися вдоль склона шельфа островов – северо-восточной границы пролива.

**Ключевые слова:** пролив Антарктика, мезомасштабные вихри, гидрооптика, гидрология, показатель ослабления направленного света, концентрация хлорофилла *a*, флуоресценция, растворенное органическое вещество, дистанционное зондирование

**Благодарности:** исследования мезомасштабных вихрей по натурным и дистанционным данным выполнены в рамках государственных заданий ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2022-0001, FNNN-2021-0003 и ТОИ ДВО РАН № 122110700009-1, № 121021500054-3. Обработка и анализ гидрофизических данных поддержаны грантом РФФ 22-77-10004.

**Для цитирования:** Распределение оптических и гидрологических характеристик в проливе Антарктика по данным измерений в январе 2022 года в 87-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» / А. А. Латушкин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 1. С. 52–66. EDN OSQIWW. doi:10.29039/0233-7584-2023-1-52-66

## Distribution of Optical and Hydrological Characteristics in the Antarctic Sound Based on the Measurements in January, 2022 in the 87<sup>th</sup> cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”

A. A. Latushkin <sup>1</sup>, ✉, V. I. Ponomarev <sup>2</sup>, P. A. Salyuk <sup>2</sup>, D. I. Frey <sup>1, 3</sup>,  
N. A. Lipinskaya <sup>1</sup>, S. P. Shkorba <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

<sup>3</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ sevsalat@gmail.com

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the work is to study the different-scale features of distribution of the hydrooptical and hydrological characteristics in the Antarctic Sound Strait based on the contact and satellite measurements carried out in January, 2022 in the 87<sup>th</sup> cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”.

**Methods and Results.** The data of complex natural measurements performed at the oceanographic stations in the Antarctic Sound on January 27–28, 2022 in the 87<sup>th</sup> cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” were used. Additionally, the satellite data were analyzed. Complex hydrophysical equipment permitted to obtain the vertical profiles of temperature, salinity, dissolved oxygen, chlorophyll *a* concentration, fluorescence intensity of colored dissolved organic matter, intensity of the beam attenuation coefficient at 660 nm and photosynthetically active radiation. Based on these data, the main features of mesoscale circulation within the cyclonic gyre over the deep-sea part in the southern Antarctic Sound Strait were determined. The joint analysis of hydrooptical and hydrological characteristics, and satellite measurements in the Antarctic Sound obtained in course of the Antarctic expedition showed presence of a system of the alternating anticyclonic and cyclonic eddies in the area under study. It is also shown that in the ice drift area polluted by land soils or shelf bottom sediments, a zone of the increased turbidity arises that is related to the terrigenous suspension entering into the water during ice melting.

**Conclusions.** The system of the different-scales eddies and currents in the Antarctic Sound contributes to the water exchange between the upper and deep layers of the strait, as well as between the Weddell Sea waters spreading to the north-northwest along the slope of the strait basin adjacent to the shelf edge of the Antarctic Peninsula and the Bransfield Straight waters spreading along the slope of the islands' shelf which is the northeastern boundary of the strait.

**Keywords:** Antarctic Sound, mesoscale eddies, hydrooptics, hydrology, beam attenuation coefficient, chlorophyll *a* concentration, fluorescence, dissolved organic matter, remote sensing

**Acknowledgments:** Study of mesoscale eddies based on natural and remote measurements was supported within the framework of state assignments MHI FNNN-2022-0001, FNNN-2021-0003, and POI No. 122110700009-1 and No. 121021500054-3. Processing and analysis of hydrophysical data were supported by the RSF grant 22-77-10004.

**For citation:** Latushkin, A.A., Ponomarev, V.I., Salyuk, P.A., Frey, D.I., Lipinskaya, N.A. and Shkorba, S.P., 2023. Distribution of Optical and Hydrological Characteristics in the Antarctic Sound Based on the Measurements in January, 2022 in the 87<sup>th</sup> cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”. *Physical Oceanography*, 30(1), pp. 47-61. doi:10.29039/1573-160X-2023-1-47-61

## Введение

Пролив Антарктика, соединяющий море Уэдделла с проливом Брансфила, расположен между северо-восточной оконечностью Антарктического п-ова и архипелагом островов, самым крупным из которых является о. Жуэнвиль. Протяженность пролива составляет ~ 50 км, максимальная ширина достигает 19 км.

Наибольшая глубина северного шельфа пролива Антарктика на границе с проливом Брансфила составляет 100 м, глубина желоба пролива на границе с морем Уэдделла ~ 800–1000 м. В центральной части пролива Антарктика расположена подводная гора, вершина которой находится на глубине 300 м. У южного подножья этой горы глубина пролива достигает абсолютного максимума ~ 1000 м во впадине, которая продолжается на юг в море Уэдделла. С других сторон глубина каньонов у подножья горы не превышает 500 м. Отмеченные особенности пересеченного рельефа дна, в частности подводная гора, должны оказывать значительное влияние на мезомасштабную циркуляцию в проливе. Причем устойчивые мезомасштабные вихри могут образовываться не только над подводными горами, но и непосредственно над желобом пролива. Например, над желобом Татарского пролива Японского моря вдоль оси пролива и склонов желоба образуются цепочки мезомасштабных вихрей противоположных знаков [1]. В проливе Дрейка также происходит формирование мезомасштабных вихрей [2], как и во многих других проливах.

Богатая биогенными элементами и фитопланктоном вода моря Уэдделла распространяется в проливе Антарктика вдоль континентального склона Антарктического п-ова [3], а вода пролива Брансфила – преимущественно в верхнем слое в южном направлении вдоль склона рельефа дна у восточной границы пролива – гряды островов, в том числе самого крупного о. Жуэнвиль [4].

В феврале 2020 г. в антарктической экспедиции на НИС «Мстислав Келдыш» (79-й рейс) были выполнены непрерывные измерения скорости течения судовым *ADCP* по маршруту судна и СТД-зондирования на продольном и поперечном разрезах в проливе Антарктика [3]. Поперечный разрез располагался в центральной части пролива. На основе анализа данных *ADCP* выявлена характерная циклоническая циркуляция в проливе (по часовой стрелке в Южном полушарии), ограниченная с севера, востока и запада кромкой шельфа, с юга – сужением впадины и уменьшением ширины пролива. Из *T, S*-диаграмм следует, что в пределах этого циклонического круговорота происходит смешение вод моря Уэдделла с водами пролива Брансфила [3].

Считается, что основной поток холодных вод моря Уэдделла поступает в пролив Брансфила не через пролив Антарктика, а вдоль склонов дна севернее о-вов Урвиль и Жуэнвиль (*D'Urville and Joinville Islands*) [4–6]. Поступление холодных вод моря Уэдделла через пролив Антарктика в пролив Брансфила затруднено за счет особенностей донной топографии, но эпизодически происходит при благоприятных условиях [7, 8].

Согласно данным наблюдений [9–13] и результатам численного гидродинамического моделирования [1], в большинстве проливов с неоднородным рельефом дна формируются мезомасштабные [1, 9–12] и субмезомасштабные

[13] вихри. Вдоль оси пролива часто наблюдаются чередующиеся дорожки мезомасштабных вихрей противоположных знаков [1]. Система мезомасштабных вихрей также наблюдалась в южной части пролива Дрейка [14], в проливе Брансфилда и в море Уэдделла [14, 15]. Показано, что мезомасштабные вихри существенно влияют на перенос вод различного происхождения, водообмен между шельфом и глубоким морем [14, 16–18] и, соответственно, на пространственное распределение гидрооптических и гидрохимических характеристик, а также биологических сообществ.

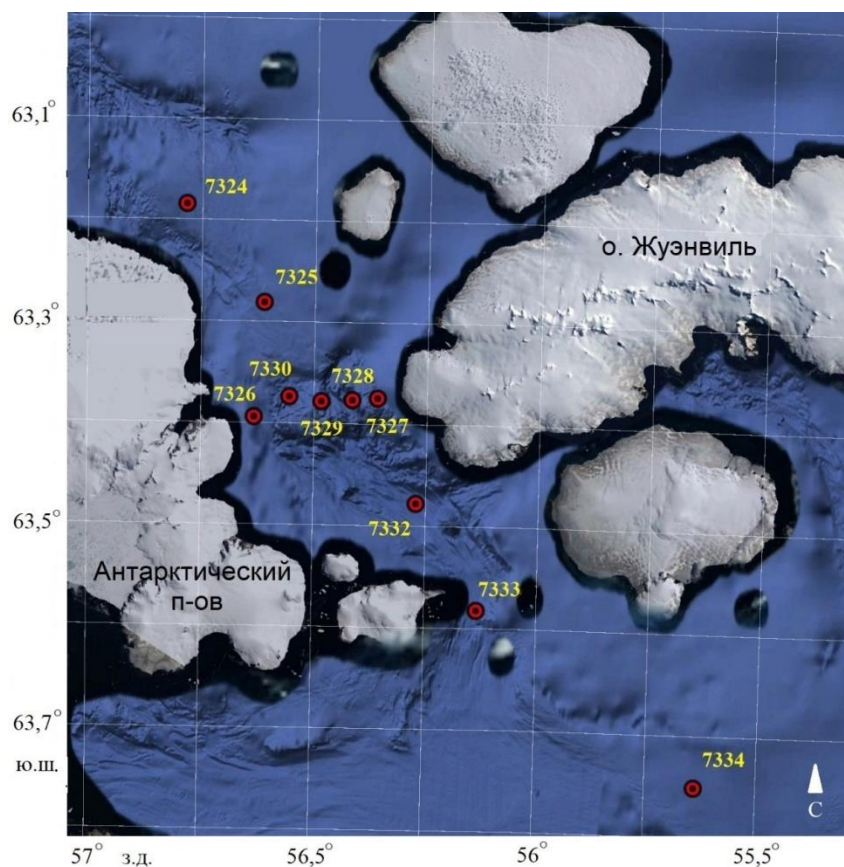
Цель работы – исследование разномасштабных особенностей распределения оптических и гидрологических характеристик в проливе Антарктика по данным контактных и спутниковых измерений в январе 2022 г. в 87-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш».

### Материалы и методы

В рамках программы экспедиционных исследований 87-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» 27–28 января 2022 г. выполнены комплексные натурные измерения гидрооптических и гидрологических параметров на двух разрезах в проливе Антарктика (рис. 1). Первый – продольный разрез, расположенный примерно вдоль оси пролива, включает 6 океанографических станций измерений вертикальных профилей различных океанографических характеристик, выполненных зондирующей аппаратурой. Пять станций находились непосредственно в проливе Антарктика, а шестая была расположена в море Уэдделла, за пределами южной границы пролива. Второй разрез, включающий 5 станций, выполнен поперек пролива между о. Жуэнвилль и Антарктическим п-овом на траверзе аргентинской антарктической научной станции Эсперанза. Аналогичные разрезы в проливе Антарктика были сделаны в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в январе 2020 г. [3], поэтому их можно считать началом регулярной серии измерений.

Совместный анализ результатов измерений гидрооптических и гидрологических характеристик на этих пересекающихся разрезах позволяет выделить зоны восходящих и нисходящих вертикальных движений, характерных для мезомасштабной циркуляции и системы течений более крупного масштаба в период измерений.

Натурные измерения выполнялись с использованием комплекса зондирующей гидрологической и гидрооптической аппаратуры, включающего зондирующие измерители *Idronaut*, *Turner C6P* и «Кондор». Зондом *Idronaut* измерялись температура ( $T$ ), соленость ( $S$ ), содержание растворенного кислорода ( $O_2$ ) и интенсивность флуоресценции хлорофилла  $a$  ( $Chl-a$ ) до дна. Прибором *Turner C6P* проводились измерения интенсивности флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества ( $CDOM$ ). Зондом «Кондор» определялись показатель ослабления направленного света на длине волны 660 нм ( $BAC_{660}$ ) и фотосинтетически активная радиация ( $PAR$ ). В красном участке спектра показатель ослабления направленного света определяется поглощающими и рассеивающими свойствами общего взвешенного вещества ( $TSM$ ) и не зависит от поглощения  $CDOM$  [19]. Измерения зондами *Turner C6P* и «Кондор» выполнялись только на продольном разрезе и до глубин не более 250 м.



**Р и с. 1.** Расположение океанографических станций и рельеф дна в проливе Антарктика (измерения выполнены 27–28 января 2022 г.)

**Fig. 1.** Scheme of location of oceanographic stations and bottom topography in the Antarctic Sound (measurements were carried out on January 27–28, 2022)

Интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* пересчитаны в его массовые концентрации ( $C_{\text{Chl-a}}$ , мкг/л) по зависимости, предоставленной заводом-изготовителем зонда *Idronaut*. Данная зависимость была проверена путем сравнения со стандартными определениями  $C_{\text{Chl-a}}$ , выполненными экстрактивным методом в районе исследований. Получены удовлетворительные результаты: коэффициент детерминации  $R^2 = 0,71$ , а коэффициент наклона  $k$  в прямой  $y = kx$  значимо не отличался от единицы при доверительной вероятности 0,95.

Значения интенсивности флуоресценции  $CDOM$  ( $F_{\text{CDOM}}$ ) откалиброваны в единицы *Quinine Sulfate Units* (*QSU*) в лабораторных условиях непосредственно перед экспедицией. Калибровка  $BAC_{660}$  осуществлялась в лабораторных условиях перед экспедицией по результатам измерений в растворах суспензии формазина с заданной концентрацией в единицах *Formazin Turbidity Units* (*FTU*).

В качестве дополнительной информации использовались данные спутниковых измерений, а именно:

– *RGB*-изображение морской поверхности, полученное из данных радиометра *OLI* (размер пикселя ~ 30 м), установленного на спутнике *Landsat-8*, за 17 января 2022 г. для юго-восточной части пролива Антарктика и прилегающей западной части моря Уэдделла. Пространственное разрешение снимка составляет ~ 30 м. Номера использовавшихся каналов радиометра *OLI* и длина волны максимума чувствительности следующие: красный (*R*) – № 4 (654,5 нм), зеленый (*G*) – № 3 (561,5 нм), синий (*B*) – № 2 (482 нм);

– фрагмент изображения высокого разрешения (5–40 м) радиолокатора спутника *Sentinel-1*, полученного 19 февраля 2022 г. при слабом ветре в районе предшествующих гидролого-гидрооптических контактных измерений на поперечном разрезе и соответствующей части продольного разреза в проливе Антарктика, выполненных 27–28 января 2022 г.

Эти спутниковые измерения выбраны из множества других по критериям качества, соответствующим ясной погоде для оптического зондирования и слабому ветру до 5 м/с для радиолокационного зондирования, а также с точки зрения наименьшей удаленности по времени от даты судовых измерений. Используются оптические и радиолокационные спутниковые данные высокого пространственного разрешения, поскольку они позволяют наиболее детально проанализировать вихревые структуры с масштабом менее 10 км [20–22].

Спутниковое *RGB*-изображение содержит информацию о наличии фрагментов льда и айсбергов, а также других плавающих объектов. На радиолокационном изображении кроме льда выделяются области «выглаживания» морской поверхности. Такие данные помогают выделить особенности разномасштабной циркуляции в проливе Антарктика, в том числе мезомасштабные вихри и течения, правильно интерпретировать результаты СТД- и гидрооптических измерений на поперечном и продольном разрезах в проливе.

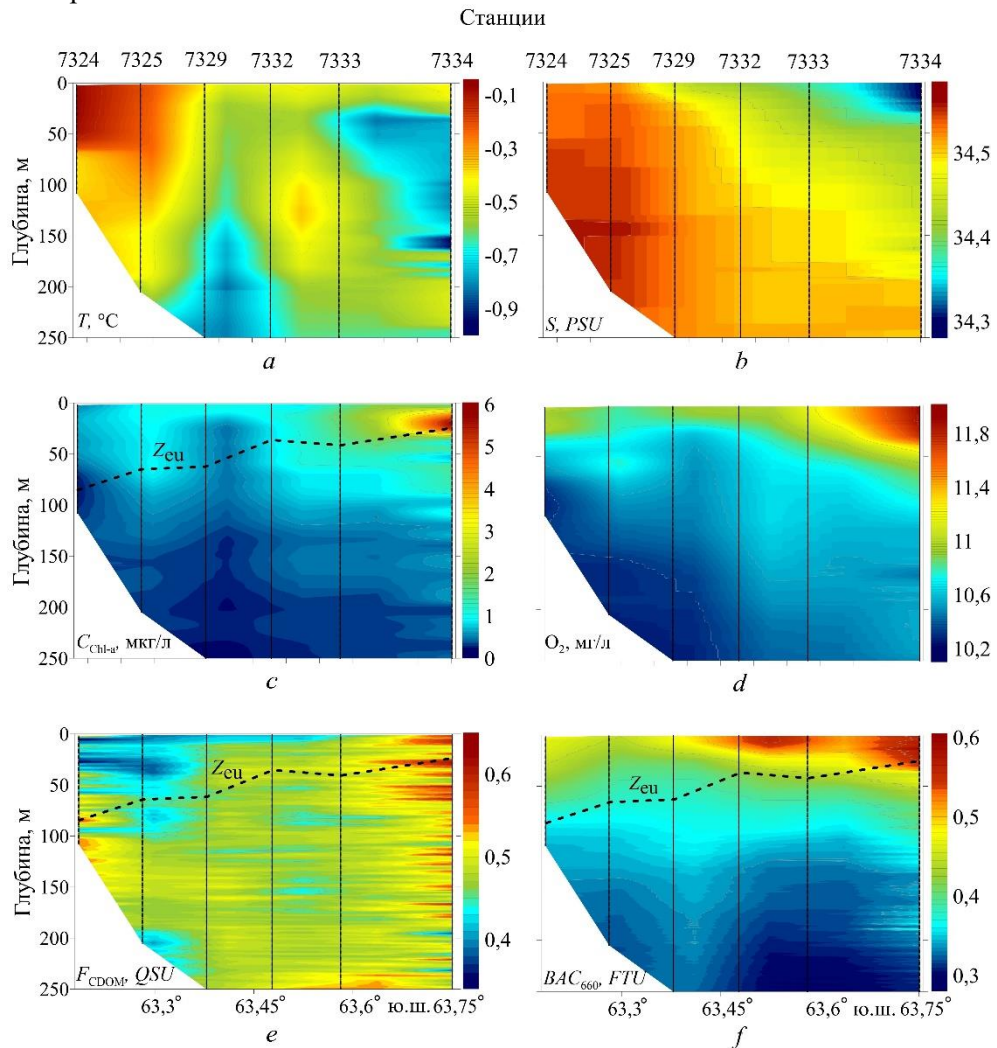
Ниже в работе приводится фотография загрязненного дрейфующего льда в районе ст. 7332, сделанная первым автором статьи 28 января 2022 г., помогающая правильно интерпретировать пространственную неоднородность данных гидрооптического зондирования верхнего слоя моря до 250 м.

### Результаты исследования

**Продольный разрез.** Он включает 6 гидролого-гидрооптических станций, расположенных примерно вдоль оси пролива Антарктика (ст. 7324, 7325, 7329, 7332, 7333, 7334), их местоположение показано на рис. 1. Анализ данных продольного разреза (рис. 2) показал существенное различие водных масс в северной и южной частях пролива. Вода, поступающая в северную шельфовую часть пролива Антарктика из пролива Брансфилда (ст. 7324, 7325), отличается более высокой температурой с наибольшими значениями ~  $-0,1^{\circ}\text{C}$  в верхнем 60-метровом слое (рис. 2, *a*). Эта вода имеет повышенную соленость (рис. 2, *b*), но в отличие от температуры ее максимум, ~ 34,55 *PSU*, расположен глубже – на горизонте 150 м.

Гидрооптические характеристики на ст. 7324 и 7325 имеют низкие значения:  $C_{\text{Chl-a}}$  (рис. 2, *c*) не превышает 1 мкг/л,  $BA C_{660}$  (рис. 2, *f*) – 0,35 *FTU*. Значения  $C_{\text{Chl-a}}$  и  $BA C_{660}$  уменьшаются с глубиной. Минимальные значения  $F_{\text{CDOM}}$  (рис. 2, *e*) в этом районе наблюдаются в верхнем перемешанном слое 50 м, как

и в проливе Брансфилда. Глубина фотического слоя ( $Z_{eu}$ ) на этих северных станциях разреза достигает максимальной величины 85 м для всего пролива Антарктика.



**Р и с. 2.** Продольный вертикальный разрез температуры (a), солёности (b), концентрации хлорофилла a (c) и растворенного кислорода (d), интенсивности флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества (e) и показателя ослабления направленного света на длине волны 660 нм (f). Штриховыми линиями отмечена глубина фотической зоны

**Fig. 2.** Longitudinal vertical section of temperature (a), salinity (b), chlorophyll a concentration (c) and dissolved oxygen (d), fluorescence intensity of colored dissolved organic matter (e) and beam attenuation coefficient on the wavelength 660 nm (f). Dashed lines indicate the photic zone depth

На этих же станциях зафиксировано низкое содержание O<sub>2</sub> (рис. 2, d): в приповерхностном слое его концентрация составляет ~ 11 мг/л, в придонном слое ~ 10 мг/л.

На разрезах T, C<sub>chl-a</sub>, O<sub>2</sub> и F<sub>CDOM</sub> на ст. 7325 наблюдается существенное заглубление изолиний этих характеристик, что обычно происходит при даунвеллинге в центральной части антициклонического мезомасштабного вихря.

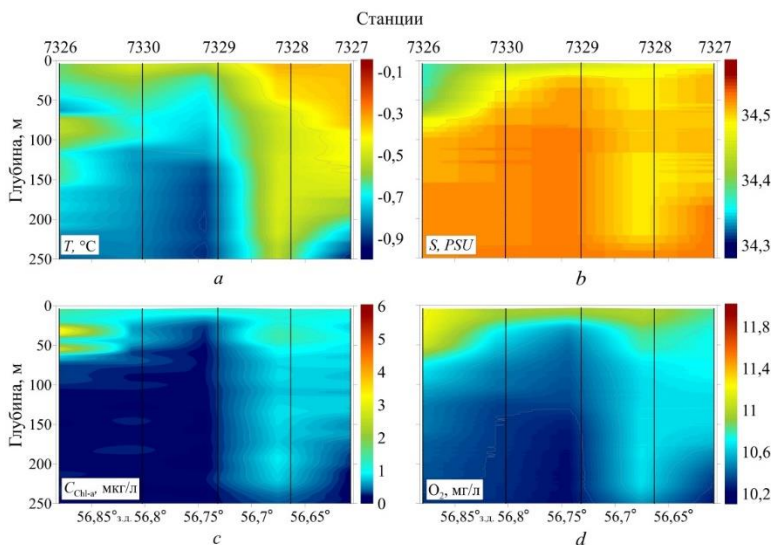
На ст. 7332 и 7333 на вертикальном разрезе температуры в промежуточном слое 100–200 м наблюдается ядро относительно теплой воды с повышенным содержанием  $O_2$  (рис. 2, *d*) и низкими значениями  $F_{CDOM}$  (рис. 2, *e*). Такие особенности вертикального распределения отмеченных величин часто прослеживаются в центральной части антициклонических вихрей [23].

На ст. 7332 в приповерхностном 20-метровом слое выявлено пятно с высокими значениями  $BAC_{660}$  и, соответственно, слабым проникновением в водную толщу  $PAR$ . При этом остальные гидрооптические характеристики остаются такими же, как в окружающих водах, что может свидетельствовать о поступлении взвешенных частиц, не связанных с фитопланктоном.

Наиболее холодные и распресненные воды верхнего перемешанного слоя с наибольшим содержанием  $O_2$  (11,2 мг/л) наблюдаются на южной границе пролива Антарктика (ст. 7333, слой 0–20 м), где  $T = -0,7^\circ C$ ,  $S = 34,35 PSU$ . В прилегающем районе шельфа моря Уэдделла (ст. 7334) температура примерно такая же, соленость ниже на 0,05  $PSU$ , содержание растворенного кислорода выше на 0,8 мг/л.

На указанных станциях наблюдалось увеличение значений всех гидрооптических характеристик с максимальными величинами на последней южной станции (7334) продольного разреза. На вертикальном профиле максимум  $C_{Chl-a}$  (6 мкг/л) находится на глубине 20 м. Наибольшие значения  $BAC_{660}$  в диапазоне 0,55–0,6  $FTU$  отмечались в слое 0–50 м. Высокие значения  $C_{Chl-a}$  и  $BAC_{660}$  обусловлены развитием фитопланктона в этом слое. Максимум  $F_{CDOM}$  (0,6  $QSU$ ) получен в слое 0–70 м. Глубина фотического слоя на ст. 7334 была минимальной и составляла 24 м.

**Поперечный разрез.** На поперечном разрезе в средней части пролива Антарктика определены различия гидрофизических характеристик в западном и восточном районах пролива (рис. 3).



**Р и с. 3.** Поперечный вертикальный разрез температуры (*a*), солености (*b*), концентрации хлорофилла *a* (*c*) и растворенного кислорода (*d*)

**F i g. 3.** Cross-sectional vertical section of temperature (*a*), salinity (*b*), chlorophyll *a* (*c*) and dissolved oxygen (*d*) concentrations

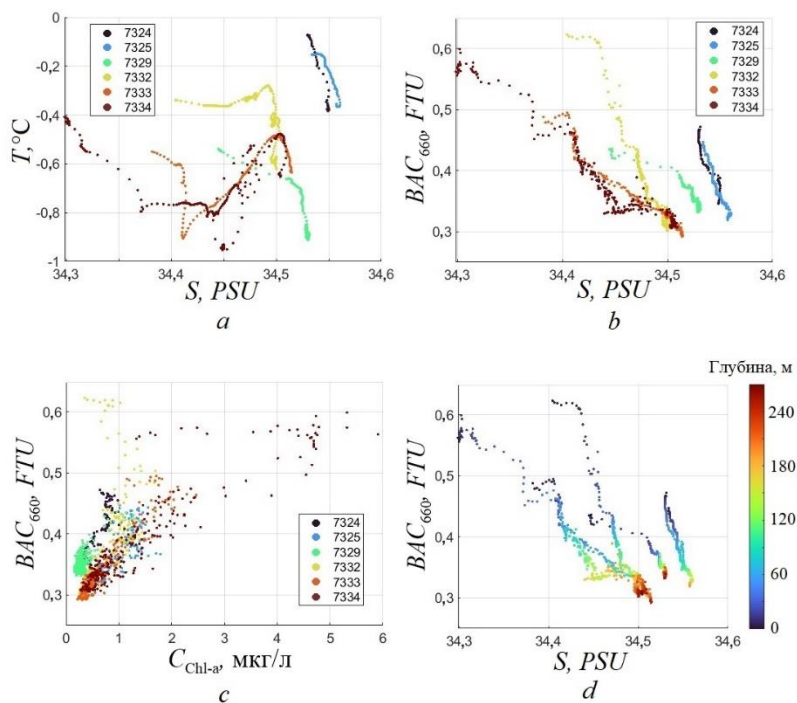


В западной части пролива на ст. 7326 зафиксированы наиболее холодные (рис. 3, *a*) воды во всем слое, максимальное содержание  $C_{\text{Chl-a}}$  (3,5 мкг/л) (рис. 3, *c*) и  $O_2$  (11,2 мг/л) (рис. 3, *d*) – в верхнем 70-метровом слое. На разрезе в окрестности ст. 7330 и 7329 хорошо выражен апвеллинг – подъем холодных глубинных соленых вод (рис. 3, *b*) с низким содержанием  $C_{\text{Chl-a}}$  и  $O_2$ .

В восточной части пролива, в районе ст. 7327 и 7328, хорошо выражен даунвеллинг, в результате которого более теплая и менее соленая вода верхнего слоя с повышенным содержанием  $O_2$  и  $C_{\text{Chl-a}}$  опускается в нижние слои до 320 м.

**Диаграммы рассеяния.** Характерные особенности распределения водных масс в проливе Антарктика выделяются на диаграммах рассеяния гидрооптических и гидрологических характеристик (рис. 4).

На диаграммах  $T, S$  (рис. 4, *a*) и  $BAC_{660}, S$  (рис. 4, *b*) для шельфовых северных ст. 7324 и 7325 (в верхней правой части рис. 4, *a*) выделяются наиболее теплые и соленые воды пролива Брансфилда. Соленость этих вод по сравнению с температурой и показателем ослабления направленного света на 660 нм изменяется с глубиной незначительно, в диапазоне 34,54–34,56 PSU.



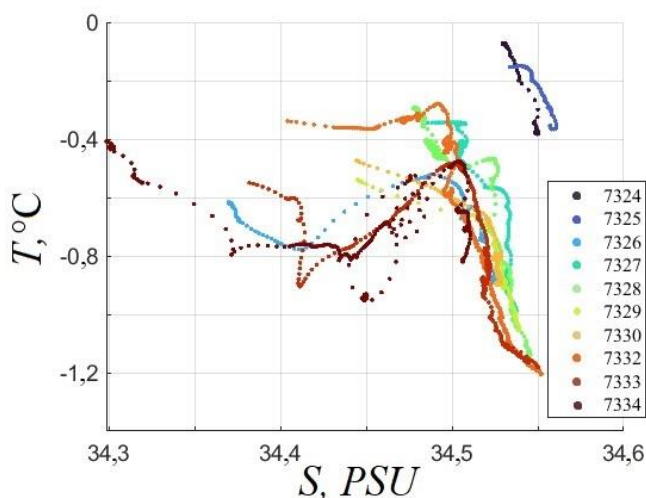
**Р и с. 4.** Диаграмма рассеяния температуры и солености (*a*), показателя ослабления направленного света и солености (*b*), показателя ослабления направленного света и концентрации хлорофилла *a* (*c*), показателя ослабления направленного света и солености (*d*) по всему массиву данных осевого разреза. На фрагментах *a* – *c* цветом выделены номера станций, на фрагменте *d* – глубина

**F i g. 4.** Scatterplot of temperature and salinity (*a*), beam attenuation coefficient and salinity (*b*), beam attenuation coefficient and chlorophyll *a* concentration (*c*), beam attenuation coefficient and salinity (*d*) over the entire axial section dataset. The station numbers on graphs *a* – *c* and the depth on graph *d* are highlighted in color

Диаграммы  $T, S$  и  $BAC_{660}, S$  для южных ст. 7333 и 7334 отличаются от диаграмм для северных станций более низкой температурой и соленостью. В верхнем слое 0–200 м соленость изменяется в значительно большем диапазоне по сравнению с водами нижнего слоя на этих же станциях и с водами пролива Брансфилда на северных станциях. Это может быть связано с таянием льда в море Уэдделла в летний период.

Промежуточное положение на диаграммах занимает ст. 7329, которая расположена над вершиной подводной горы в средней части пролива на пересечении продольного и поперечного разрезов. Диаграммы  $T, S$  и  $BAC_{660}, S$  для этой станции характеризуются относительно низкой температурой, промежуточной соленостью по сравнению с северными (7324, 7325) и южными (7333, 7334) станциями, а также повышенными значениями  $BAC_{660}$  на глубинах более 100 м. Указанная станция под влиянием апвеллинга в верхнем слое содержит воду нижележащих слоев, окружающих подводную гору. Подъем воды и понижение температуры верхнего слоя здесь обусловлены мезомасштабным циклоническим вихрем над горой, что проявляется в большинстве гидрофизических характеристик на продольном и поперечном разрезах (рис. 2, 3), а также на  $T, S$ - и  $BAC_{660}, S$ -диаграммах.

На  $T, S$ -,  $BAC_{660}, S$ - и  $BAC_{660}, C_{Chl-a}$ -диаграммах для ст. 7332 в верхнем слое до 60 м значения  $T$  и  $BAC_{660}$  выше, чем для соседней ст. 7333:  $T > -0,4^{\circ}\text{C}$  и  $BAC_{660} > 0,6 \text{ FTU}$  на ст. 7332;  $T < -0,5^{\circ}\text{C}$  и  $BAC_{660} < 0,5 \text{ FTU}$  на ст. 7333. При этом значения  $C_{Chl-a}$  ниже и составляют 0,1–1 мкг/л на ст. 7332 и 1–2 мкг/л на ст. 7333. Соответственно, подтверждается предположение (рис. 2, *c, e, f*) о том, что увеличение здесь  $BAC_{660}$  обусловлено таянием загрязненного льда и не зависит от фитопланктона. С увеличением глубины характеристики вод на ст. 7332 приближаются к характеристикам вод моря Уэдделла на южных станциях продольного разреза.

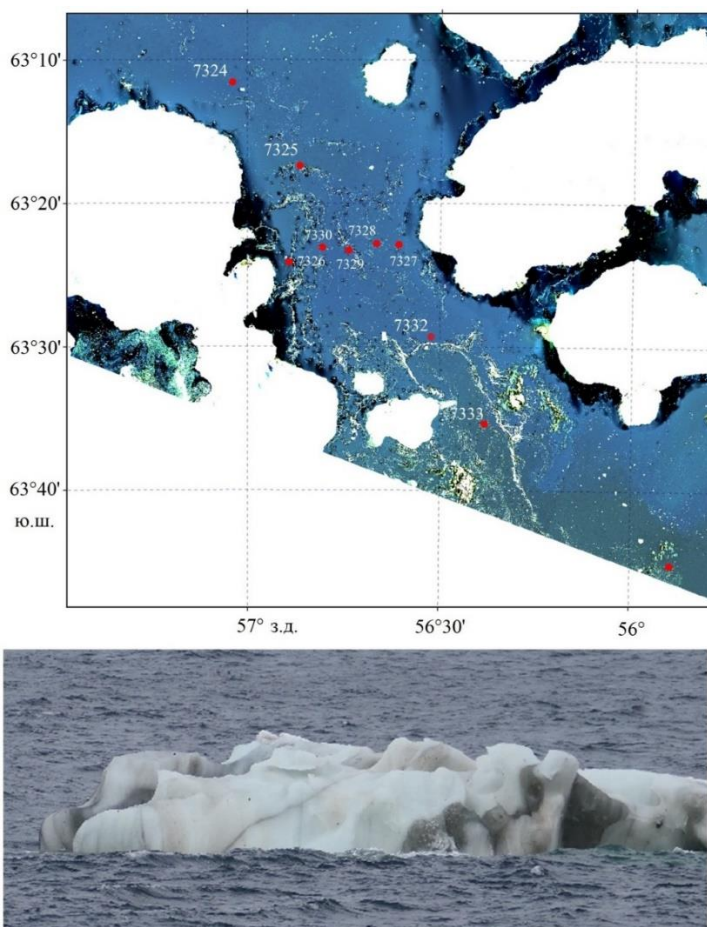


**Р и с. 5.**  $T, S$ -диаграмма для всего массива данных

**F i g. 5.**  $T-S$  diagram for the entire dataset

На  $T, S$ -диаграмме для всех выполненных в проливе станций (рис. 5) видно, что в западной части поперечного разреза воды моря Уэдделла распространяются во всем слое до дна. В восточной части разреза в верхнем слое до 200 м формируются трансформированные воды, имеющие промежуточные характеристики между водами моря Уэдделла и пролива Брансфилда. Трансформация этих вод может быть связана с влиянием системы мезомасштабных вихрей, отмеченных ранее на разрезах (рис. 2, 3) и обнаруженных на спутниковых изображениях.

**Анализ спутниковых изображений.** На рис. 6 и 7 показаны спутниковые изображения оптического и радиолокационного зондирования высокого пространственного разрешения.



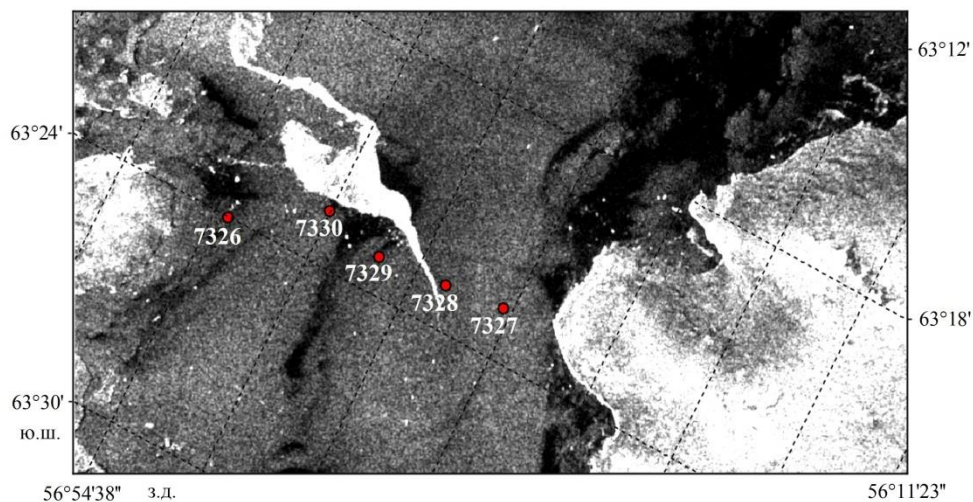
**Рис. 6.** Спутниковое  $RGB$ -изображение морской поверхности (*Landsat-8*) от 17 января 2022 г. в юго-восточной части пролива Антарктика и прилегающей западной части моря Уэдделла (вверху), а также фотография (от 28.01.2022 г.) загрязненного дрейфующего льда в районе ст. 7332 (внизу)

**Fig. 6.** Satellite  $RGB$ -image of the sea surface (*Landsat-8*) on January 17, 2022 in the southeastern part of the Antarctic Sound and the adjacent area of the western Weddell Sea (above), as well as a photo of the polluted drifting ice in the area of station 7332 (January 28, 2022) (below)

На рис. 6 на спутниковом *RGB*-изображении видно наличие выраженного мезомасштабного антициклонического вихря в южной части пролива Антарктика в районе ст. 7332 и 7333. Вихрь проявляется в виде светлой кривой, отображающей поступление фрагментов льда и привносимых им оптически активных веществ из моря Уэдделла в юго-восточную часть котловины пролива Антарктика, где лед вовлечен в циклоническую циркуляцию. Диаметр вихря составляет  $\sim 8$  км.

На рис. 6 (внизу) показан ледовый фрагмент, который является составляющей рассматриваемой светлой полосы. Данный лед загрязнен грунтом суши или донными осадками мелководного шельфа. Его таяние приводит к увеличению  $BAC_{660}$  за счет поступления в воду взвешенных частиц, не связанных с фитопланктонными сообществами, что согласуется с результатами, представленными на рис. 2, *c, e, f* и 4, *b*.

На рис. 7 показано радиолокационное изображение поля шероховатости морской поверхности высокого разрешения (5–40 м) в районе центральной части пролива Антарктика.



**Р и с. 7.** Фрагмент радиолокационного изображения со спутника *Sentinel-1* от 19.02.2022 г.  
**Fig. 7.** Fragment of the *Sentinel-1*-derived high-resolution image (February 19, 2022)

Области апвеллинга и даунвеллинга вод на всех разрезах хорошо прослеживаются по данным судовых измерений (рис. 2, 3). На спутниковом радиолокационном изображении (рис. 7) области апвеллинга на разрезах соответствуют темным зонам с наименьшей шероховатостью морской поверхности на масштабах  $\sim 5,5$  м. Именно в зонах циклонической завихренности скорости течения образуются как мезомасштабные [1], так и субмезомасштабные циклонические вихри, формирующиеся, в частности, на периферии мезомасштабных антициклонов [24]. Чередование зон конвергенции и дивергенции, даунвеллинга и апвеллинга, в том числе над склоном и кромкой Патагонского

шельфа [25], является характерной особенностью мезомасштабной и субмезомасштабной циркуляции в районах течений над склоном и кромкой шельфа, а также над прилегающей частью континентального склона.

Зоны конвергенции вектора скорости течения в верхнем слое моря и даунвеллинга, в том числе в мезомасштабных антициклонических вихрях, соответствуют большей шероховатости морской поверхности, что показано более светлым тоном на рис. 7.

Отметим, что 19.02.2022 г. погода была благоприятной и скорость ветра не превышала 4 м/с. Поэтому радиолокационное изображение в эти сутки можно интерпретировать в контексте нашей работы. В другие даты при ветре, превышающем 5 м/с, и хорошо выраженном ветровом волнении на радиолокационных изображениях сложнее выделить зоны конвергенции, дивергенции, циклонические и антициклонические вихри в поле шероховатости поверхности моря.

### Заключение

На основе полученных в 87-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» данных гидрооптических и гидрологических измерений 27–28 января 2022 г., а также спутниковой информации определены основные особенности мезомасштабной циркуляции в проливе Антарктика в пределах циклонического круговорота над глубокой впадиной южной части пролива. Совместный анализ полученных в антарктической экспедиции гидрооптических, гидрологических характеристик и спутниковых измерений в проливе Антарктика показал наличие системы чередующихся антициклонических и циклонических вихрей в районе исследования.

Эта система мезомасштабных вихрей усиливает обмен между водами верхнего и глубинного слоев пролива, а также между водами моря Уэдделла, распространяющимися в проливе на северо-северо-запад вдоль склона дна Антарктического п-ова, и водами пролива Браснфилда, распространяющимися вдоль склона шельфа островов к северо-восточной границе пролива.

Показано, что в районах дрейфа льда, загрязненного грунтом суши или донными осадками шельфа, образуется зона повышенной мутности, связанная не с цветением фитопланктона, а с поступлением в воду терригенной взвеси при таянии загрязненного льда.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simulation of mesoscale circulation in the Tatar Strait of the Japan Sea / V. I. Ponomarev [et al.] // *Ocean Modelling*. 2018. Vol. 126. P. 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.04.006>
2. *Jersild A., Delawalla S., Ito T.* Mesoscale Eddies Regulate Seasonal Iron Supply and Carbon Drawdown in the Drake Passage // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48, iss. 24. e2021GL096020. doi:10.1029/2021GL096020
3. *Krek A. V., Krek E. V., Krechik V. A.* The Circulation and Mixing Zone in the Antarctic Sound in February 2020 // *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean* / Eds. E. G. Morozov, M. V. Flint, V. A. Spiridonov. Cham : Springer, 2021. P. 83–99. (*Advances in Polar Ecology* ; vol. 6). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_6)
4. Iceberg drift and ocean circulation in the northwestern Weddell Sea, Antarctica / L. L. Collares [et al.] // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018. Vol. 149. P. 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.02.014>

5. Surface Circulation at the Tip of the Antarctic Peninsula from Drifters / A. F. Thompson [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2009. Vol. 39, iss. 1. P. 3–26. <https://doi.org/10.1175/2008JPO3995.1>
6. Caspel M. van, Hellmer H. H., Mata M. M. On the ventilation of Bransfield Strait deep basins // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2018. Vol. 149. P. 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.006>
7. Deep and bottom water of the Bransfield Strait eastern and central basins / A. L. Gordon [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2000. Vol. 105, iss. C5. P. 11337–11346. <https://doi.org/10.1029/2000JC900030>
8. Huneke W. G. C, Huhn O., Schröder M. Water masses in the Bransfield Strait and adjacent seas, austral summer 2013 // Polar Biology. 2016. Vol. 39. P. 789–798. <https://doi.org/10.1007/s00300-016-1936-8>
9. Bograd S. J., Stabeno P. J., Schumacher J. D. A census of mesoscale eddies in Shelikof Strait, Alaska, during 1989 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1994. Vol. 99, iss. C9. P. 18243–18254. <https://doi.org/10.1029/94JC01269>
10. Bruce J. G. Eddies southwest of the Denmark Strait // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1995. Vol. 42, iss. 1. P. 13–29. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(94\)00040-Y](https://doi.org/10.1016/0967-0637(94)00040-Y)
11. Rabinovich A. B., Thomson R. E., Bograd S. J. Drifter Observations of Anticyclonic Eddies near Bussol' Strait, the Kuril Islands // Journal of Oceanography. 2002. Vol. 58. P. 661–671. <https://doi.org/10.1023/A:1022890222516>
12. Winter mesoscale circulation on the shelf slope region of the southern Drake Passage / M. Zhou [et al.] // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2013. Vol. 90. P. 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.03.041>
13. The importance of sub-mesoscale processes for the exchange of properties through the Strait of Gibraltar / M. Bruno [et al.] // Progress in Oceanography. 2013. Vol. 116. P. 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.06.006>
14. On the warm inflow at the eastern boundary of the Weddell Gyre / S. Ryan [et al.] // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2016. Vol. 107. P. 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.11.002>
15. The Weddell Gyre, Southern Ocean: Present Knowledge and Future Challenges / M. Vermet [et al.] // Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57, iss. 3. P. 623–708. <https://doi.org/10.1029/2018RG000604>
16. Eddy overturning of the Antarctic Slope Front controls glacial melting in the Eastern Weddell Sea / O. A. Nøst [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2011. Vol. 116, iss. C11. C11014. <https://doi.org/10.1029/2011JC006965>
17. Eddy transport as a key component of the Antarctic overturning circulation / A. F. Thompson [et al.] // Nature Geoscience. 2014. Vol. 7. P. 879–884. <https://doi.org/10.1038/ngeo2289>
18. Stewart A. L., Klocker A., Menemenlis D. Circum-Antarctic Shoreward Heat Transport Derived from an Eddy- and Tide-Resolving Simulation // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45, iss. 2. P. 834–845. <https://doi.org/10.1002/2017GL075677>
19. Jerlov N. G. Marine optics. Amsterdam : Elsevier, 1976. 230 p. (Elsevier Oceanography Series)
20. Исследования субмезомасштабной изменчивости верхнего слоя океана по данным спутниковых наблюдений / Б. Шапрон [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 6. С. 676–690. doi:10.22449/0233-7584-2020-6-676-690
21. Кудрявцев В. Н., Акимов Д. Б., Йоханнесен О. М. Проявление мезомасштабной изменчивости моря на радиолокационных изображениях его поверхности // Исследование Земли из космоса. 2003. № 2. С. 27–46.
22. Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений / О. Ю. Лаврова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 98–129.

23. Lagrangian analysis of the vertical structure of eddies simulated in the Japan Basin of the Japan/East Sea / S. V. Prants [et al.] // Ocean Modelling. 2015. Vol. 86. P. 128–140. doi:10.1016/j.ocemod.2014.12.010
24. Особенности динамики вод синоптического и субсиноптического масштабов над континентальным склоном Японской котловины и шельфом Приморья / В. И. Пономарев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 2. С. 155–165.
25. Изменчивость биооптических характеристик морской поверхности в районе Фолклендского течения и Патагонского шельфа / П. А. Салюк [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 6. С. 200–213. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-200-213

*Об авторах:*

**Латушкин Александр Александрович**, младший научный сотрудник, отдел оптики и биофизики моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 1239-2858, ORCID ID: 0000-0002-3412-7339, ResearcherID: U-8871-2019, sevsa-lat@gmail.com**

**Пономарев Владимир Иванович**, ведущий научный сотрудник, лаборатория экспериментальной климатологии, ФГБУН ТОИ ДВО РАН им. В. И. Ильичева (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 5421-9651, ORCID ID: 0000-0002-0501-460X, ResearcherID: B-8444-2014, pavel.salyuk@gmail.com**

**Салюк Павел Анатольевич**, заведующий лабораторией спутниковой океанологии и лазерного зондирования, ФГБУН ТОИ ДВО РАН им. В. И. Ильичева (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 1454-3891, ORCID ID: 0000-0002-3224-710X, ResearcherID: E-8592-2014, pavel.salyuk@gmail.com**

**Фрей Дмитрий Ильич**, ведущий научный сотрудник, лаборатория гидрологических процессов, ФГБУН ИО РАН им. П. П. Ширшова (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 9228-1374, ORCID ID: 0000-0001-8141-9513, ResearcherID: X-9812-2018, dima.frey@gmail.com**

**Липинская Надежда Александровна**, старший инженер, лаборатория спутниковой океанологии и лазерного зондирования, ФГБУН ТОИ ДВО РАН им. В. И. Ильичева (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **SPIN-код: 2826-5686, ORCID ID: 0000-0002-3177-4426, ResearcherID: AGE-0831-2022, ef.na.hc@gmail.com**

**Шкорба Светлана Павловна**, научный сотрудник, лаборатория гидрологических процессов и климата, ФГБУН ТОИ ДВО РАН им. В. И. Ильичева (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **SPIN-код: 8197-6065, ORCID ID: 0000-0002-2385-7686, ResearcherID: B-7713-2014, podtel@poi.dvo.ru**