

УДК 532.593.2

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ В ЧЁРНОЙ ГУБЕ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА В РАЗНЫЕ ФАЗЫ ПРИЛИВНОГО ЦИКЛА

© 2025 г. И. Н. Иванова*, А. А. Будников, А. И. Васин, К. А. Левонян

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет,
кафедра физики моря и вод суши, Москва, Россия*

**E-mail: ivair@yandex.ru*

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.

После доработки 18.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Приводятся результаты натурных измерений течений в Чёрной губе Кандалакшского залива в 2021–2023 г., подверженной приливному воздействию. По сетке станций измерено поверхностное и придонное течение в разные фазы приливного цикла, определена область, в которой регистрируется течение из Нильмо-губы, проведено сопоставление натурных измерений с результатами моделирования придонных течений.

Ключевые слова: Белое море, Кандалакшский залив, придонное течение, поверхностное течение, дрейфовое течение, фазы приливного цикла.

DOI: 10.31857/S0367676525020267, **EDN:** DTVFTJ

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики течений в прибрежных зонах представляют интерес для различных научных и хозяйственных сфер жизни. Ряд вопросов, связанных с влиянием приливных течений на формирование рельефа дна, состава донных отложений, развитие тех или иных донных биологических сообществ на сегодняшний день остается открытым [1, 2]. Натурные измерения в небольших заливах и проливах позволяют получить представление о характеристиках течений, собрать данные для верификации результатов численного моделирования, провести анализ влияния движения водных масс на рельеф дна, осадочный слой грунта, распределение донных биологических сообществ. Моделирование течений в прибрежных зонах позволяет предсказывать их воздействие на береговую линию, перенос и распределение водных масс.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Чёрная губа находится в верхней части Кандалакшского залива. Измерения проводились вблизи Крестовых островов: 61°24'07" с.ш., 31°14'07" в.д. Глубины при входе в Чёрную губу составляют 10–34 м, западная часть губы мелководна. В центре губы расположен остров Оленевский. С юга в губу впадает река Нильма, течение которой огибает остров справа. При-

ливное течение входит в губу Чёрная из пролива Великая Салма, отливное течение имеет обратное направление и при выходе в пролив Великая Салма уклоняется к мысу Киндо [3]. Рельеф дна с севера на юг можно разбить на четыре характерные области: северная наклонная мелководная равнина с грядами и ложбинами, центральная равнина, к западу остающаяся достаточно пологой, а к востоку становящаяся холмистой с существенным ростом глубины в сторону пролива Великая Салма, восточная часть центральной равнины, осложненная грядами и южная прибрежная равнина с извилистыми грядами и ложбинами [4].

Натурные измерения проводились в сентябре 2021, апреле 2022, июле 2022 и 2023 г. с борта НИС «Студент» с использованием многопараметрических зондов RDCP-600 и RCM 9 LW AANDERAA INSTRUMENTS. Зонд RDCP-600 устанавливался вблизи дна на буйковом подвесе и использовался для многочасовых измерений (12–48 ч) скоростей течений во всей толще над местом установки. При помощи зонда RCM 9 LW выполнялось профилирование с шагом 1 м при плавном опускании зонда от поверхности до дна в заранее выбранных точках так, чтобы данные по скорости и направлению были получены по возможности в разные фазы прилива-отлива. [5]. Положение станций, на которых проводились измерения отмечено на рис. 1. Скорость ветра и температура

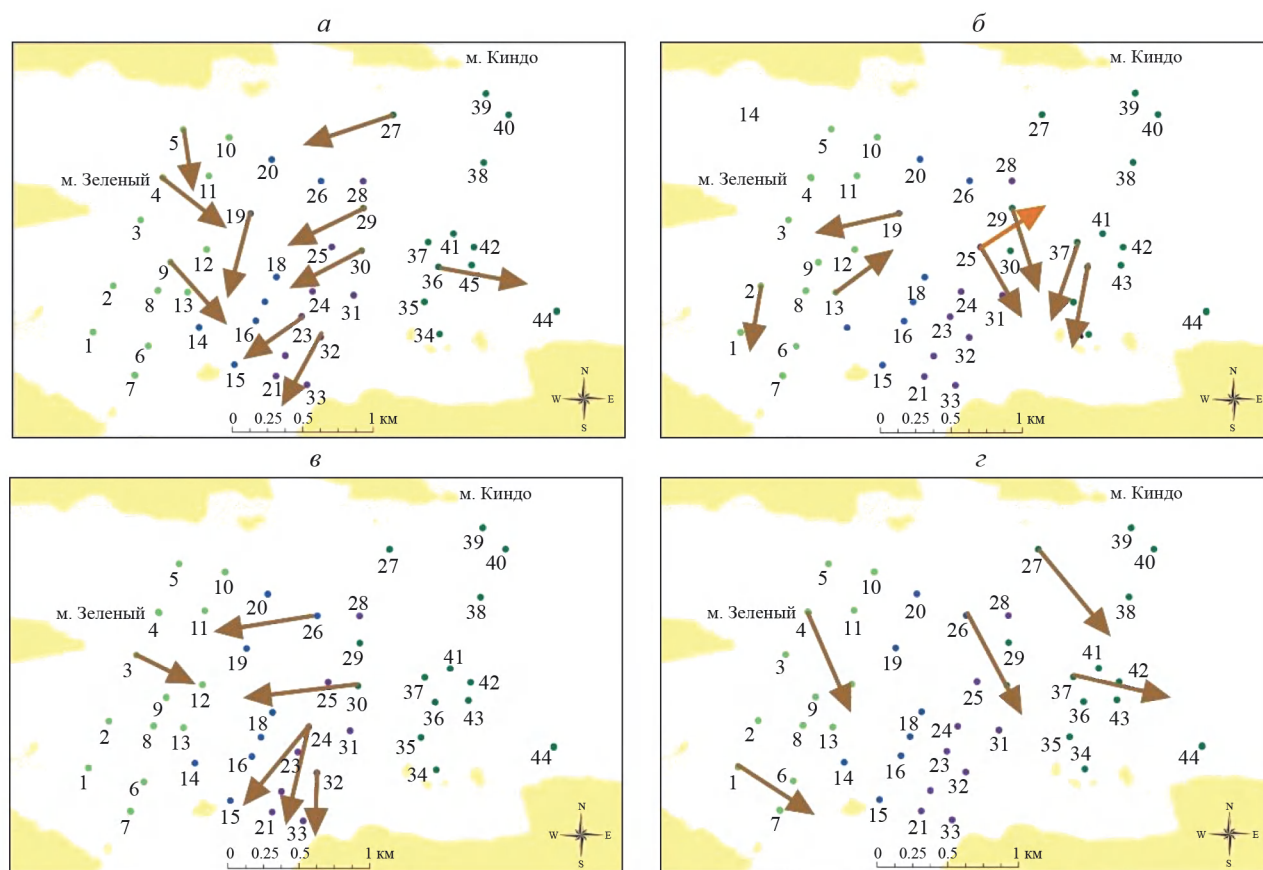


Рис. 1. Направления поверхностного течения во время большой (а) и малой (б) воды, середины прилива (в), середины отлива (г) в июле 2022 г. Числами отмечены положения станций, на которых проводились измерения.

воздуха регистрировалась с помощью цифрового термоанемометра МЕГЕОН 11070.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В РАЗНЫЕ ФАЗЫ ПРИЛИВА

Поверхностное течение и его направление измерялись в слое глубиной до 6 м от поверхности. Полученные значения скоростей были соотнесены с донным рельефом Чёрной губы.

Наиболее показательными являются моменты разворота направления течения — конец и начало фазы прилива и отлива, а также моменты середины фаз цикла — большая вода и малая вода, когда ожидаемое влияние скорости прилива или отлива наименьшее. На рис. 1. показаны направления поверхностного течения во время большой воды, малой воды, середины прилива, середины отлива в июле 2022 г. Общая картина поверхностного течения в случае большой и малой воды достаточно сложная, так как в этих случаях большую роль играют топография дна, близость береговой линии и русла реки Нильма, сгонно-нагонные процессы. Для малой воды прослеживается общая тенденция разворота поверхностного течения в сторону востока. Во время максимума прилива скорости направлены от пролива Великая Салма, во

время середины отлива во всех измеренных точках, попавших на эту фазу цикла, наблюдаются направления течений в сторону открытого моря.

В поверхностном слое значения скоростей менялись в интервале 6–50 см/с. Во время максимума прилива скорость приближалась к 50 см/с, в то время как во время большой воды скорость падала в два раза. Наиболее точно значение скорости поверхностного течения соответствует рассчитанному в соответствии с теорией Экмана по формуле [6]

$$U_0 = \frac{T}{\sqrt{2\rho A_v \omega \sin \varphi}}, \quad (1)$$

где T — касательное напряжение ветра, ρ — плотность воды на поверхности, A_v — коэффициент турбулентного трения, ω — угловая скорость вращения Земли, φ — географическая широта. Для расчета касательного напряжения ветра о поверхность будем пользоваться формулой [7]:

$$T = C_D \rho_a V_w^2, \quad (2)$$

где C_D — безразмерный коэффициент трения, ρ_a — плотность воздуха, V_w — скорость ветра в момент измерений. Выражение (1) позволяет получить более приближенное к реальности значение

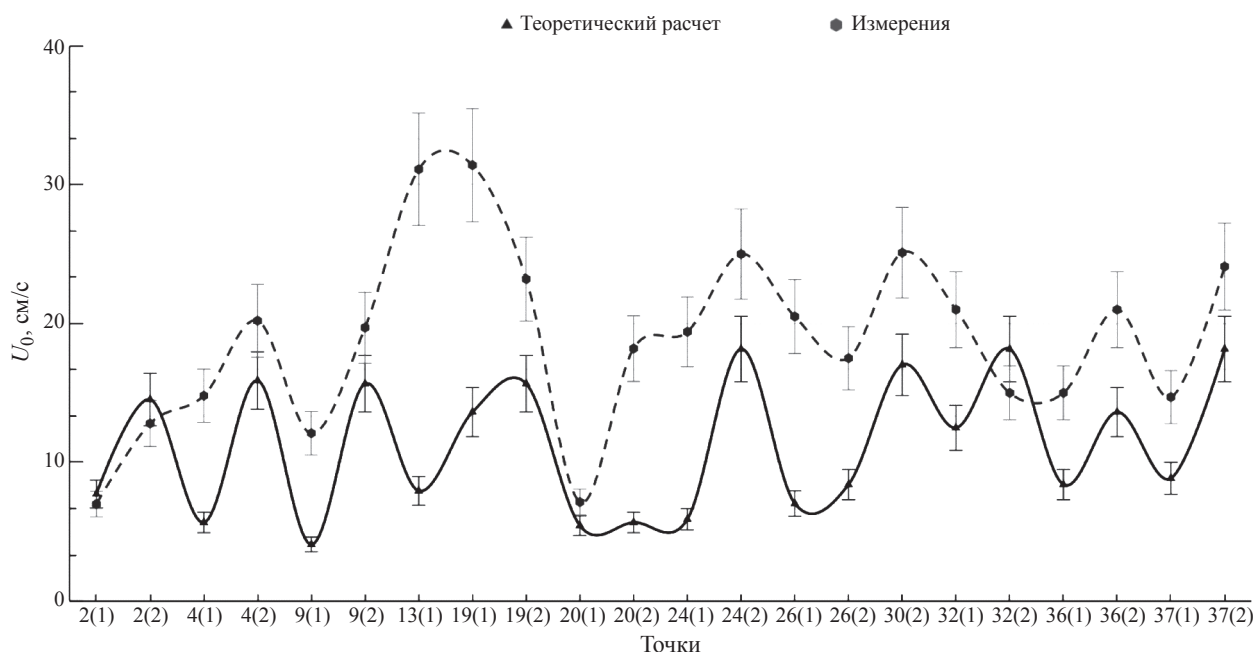


Рис. 2. Графическое представление сравнения измеренных данных поверхностных течений, и рассчитанных теоретически.

скоростей, так как для коэффициента турбулентного трения используется не постоянное его значение, а связанное со скоростью ветра следующим соотношением, где $\psi = 0.43 \text{ (с} \cdot \text{кг)}/\text{м}^3$ [6]:

$$A_v = \psi V_w^2. \quad (3)$$

На рис. 2. приводится сравнение измеренных данных поверхностных течений и рассчитанных по формуле (1). Для случаев большой и малой воды в большей степени проявляется воздействие внешних факторов. Во время середины отлива и прилива полученные направления течений в наибольшей степени согласуются с расчетными значениями.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА, СОЗДАВАЕМОГО РЕКОЙ НИЛЬМА

По 24-часовым записям данных с прибора RDCP 600 изучалась суточная изменчивость вертикального распределения модуля скорости течения и направления. В точках 14, 17, 24, 43 на определенных глубинах (13–15 м от поверхности) были обнаружены устойчивые во времени подповерхностные течения, сохраняющие свое направление вне зависимости от фазы прилива. Для этих точек 14, 17, 24, 43 были составлены розы ветров («течений»). На определенных горизонтах прослеживается направление потока воды, обусловленного предположительно, впадением в Чёрную губу реки Нильма. Проявление влияния данного течения можно наблюдать на спутниковом снимке, полученном в мар-

те 2023 года. На снимке отчетливо видна полынья (темная область) и более плотный лед (светлый тон), сносимый в восточном направлении (рис. 3.) По нашим оценкам, глубина залегания такого течения составляет 13–15 м от поверхности, толщина 3–5 м, модуль скорости течения меняется в диапазоне 2–22 см/с.

ПРИДОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В РАЗНЫЕ ФАЗЫ ПРИЛИВА

Были собраны и систематизированы результаты измерений придонных течений за несколько периодов работ в Чёрной губе. Сентябрь 2021 года — 70 измерений, апрель 2022 года — 29 измерений, июль 2022 года — 46 измерений, июль 2023 года — 40 измерений. Для каждого измерения фиксировалось время измерения, и фаза прилива, в которую было произведено измерение. Каждое значение величины скорости и направления течения было получено как среднее за одно измерение (10–15 мин).

Проведенные измерения показали, что значения придонных скоростей (0.5 м от дна), полученные с помощью RCM, находятся в диапазоне 1.2–16.6 см/с, а при наличии ледового покрова 1.5–9.4 см/с. Значения скоростей могут меняться в различные фазы прилива. Наибольшие по величине значения скоростей придонного течения чаще приходится на точки, где глубина превышает 30 м. На северной равнине приливно-отливный режим проявляется наиболее активно. Центральная и западная части центральной равнины обладают постоянным рельефом, здесь

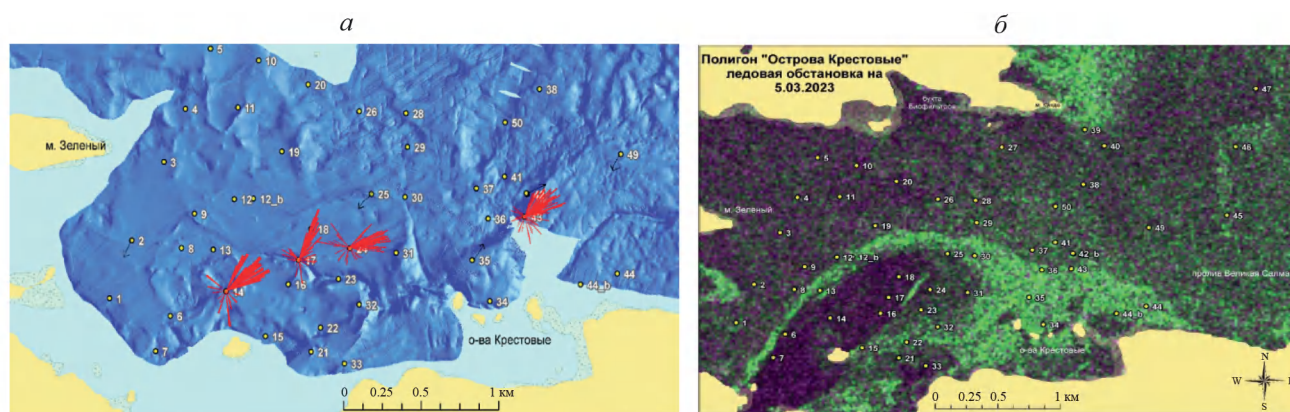


Рис. 3. Направления устойчивых подповерхностных течений, полученных с помощью RDCP 600 (а), спутниковый снимок Чёрной губы (б), полученный в марте 2023 года.

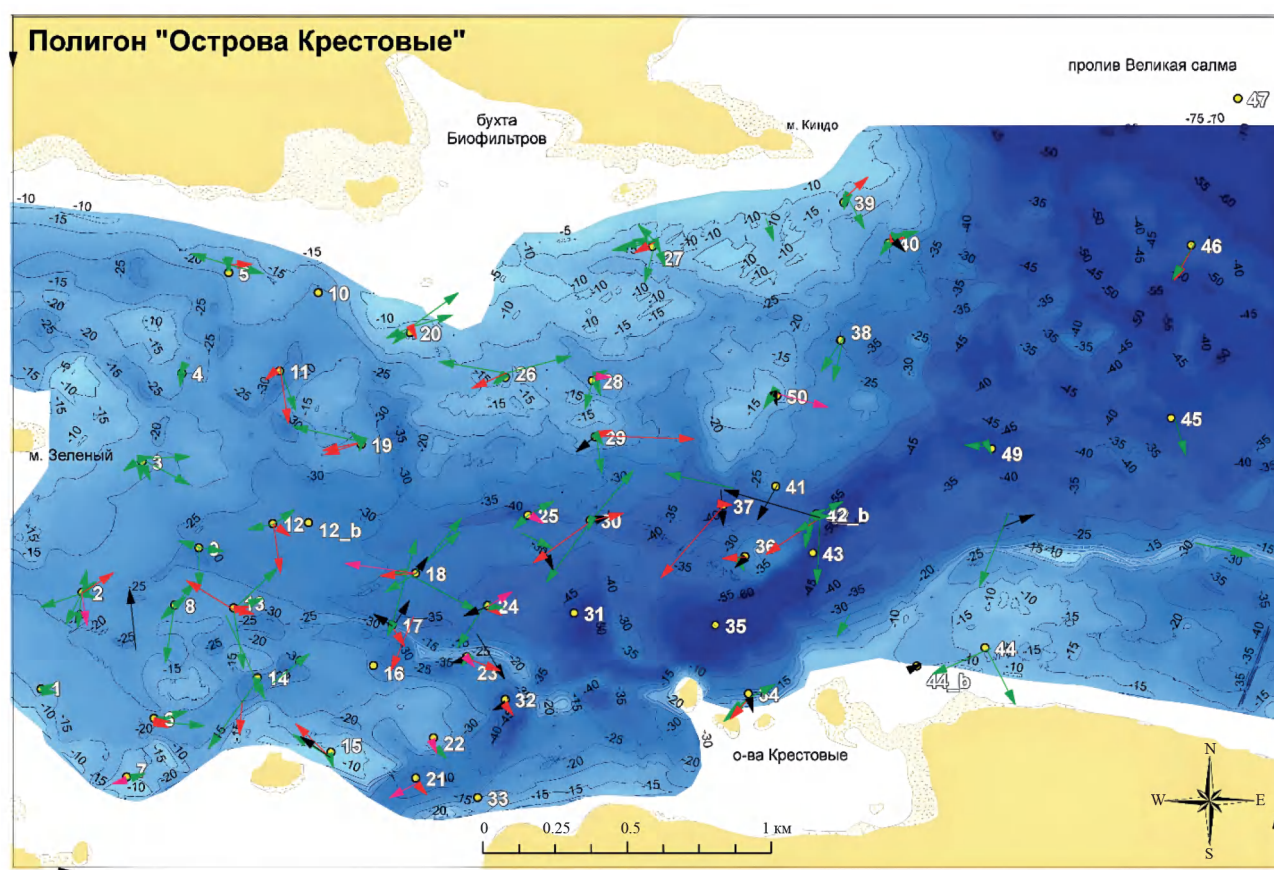


Рис. 4. Общая карта придонных течений для разных фаз приливо-отливного цикла. Отлив – зеленый, прилив – черный, большая/малая вода – красный. Масштаб 10 см/с.

преобладают активные стоковые течения. Восточная часть центральной равнины, осложнена грядами, поэтому в этой части наблюдается наиболее активный гидродинамический режим. В южной части полигона, обладающей наиболее сложным рельефом и зависимой от влияния реки Нильма, наблюдаются вихревые течения.

Таким образом, учет фаз прилива является неотъемлемой частью моделирования придон-

ных течений и позволит получить более точные результаты. Обобщенная карта придонных течений приводится на рис. 4. Во время прилива наблюдается общая динамика перемещения жидкости из пролива Великая Салма на запад вглубь Чёрной губы, а в период отлива воды выходит из губы, и отливное течение имеет обратное направление. В то же время есть станции, на которых не удалось зафиксировать изменение

направления течения при смене фазы прилива (станции 3, 4, 5, 11, 19, 40).

Результаты измерений придонных течений сопоставлялись с расчетами по модели INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [8, 9]. Для масштаба меньше десятка километров данная модель ранее не использовалась и впервые была пересчитана для масштабов Чёрной губы с учетом имеющейся карты глубин. Дискретизация модели по времени была выбрана 1 ч, расчеты проводились для 2022 г. В точках 2, 20, 26, 27, 426, 49, 50 на дне были рассчитаны температура, соленость, модуль скорости, зональная скорость, меридиональная скорость, уровень моря и сопоставлены с данными измерений за апрель и июль 2022 года. Были посчитаны коэффициенты корреляции для измеренных и расчетных скоростей и направления придонных течений, которые оказались меньше 0.5 для этих зависимостей. Такое несовпадение можно объяснить тем, что в модели не были учтены факторы, значимые на маленьком масштабе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено, что наиболее интенсивные движения наблюдались в верхнем 10-метровом слое в центральной части полигона, которая в наибольшей степени подвержена ветровому воздействию, а также в придонном слое с максимумом течения на высоте от 2 до 12 м от дна в мелководных прибрежных зонах и в восточной, наиболее глубоководной части. Максимальные скорости придонных течений в нижнем полуметровом слое были зарегистрированы в центральной и восточной частях полигона, и чаще приходились на точки, где глубина превышает 30 м.

Проведено сравнение теоретически рассчитанной скорости в поверхностном слое и полученной в результате измерений при значительном влиянии приливных явлений. Оценены скорости поверхностных течений, построены карты с указанием направлений распространений поверхностных течений для разных фаз приливного цикла.

Обнаружено устойчивое по направлению течение, предположительно обусловленное рекой Нильмой, впадающей в Чёрную губу. Направление этого течения соответствует направлению смещения морского льда в зимний период, полученного со спутниковой фотографии.

Впервые представлена карта придонных течений в Чёрной губе. На карту были нанесены 184 измерения, совершенные в разные фазы прилива и в разные сезоны (весна, лето, осень).

Была проведена работа с моделью INMOM и впервые получены результаты моделирования придонных течений и их направлений для Чёрной губы Кандалакшского залива. Сравнение показало расхождение результатов эксперимента и моделирования. Обоснование этих результатов и уменьшение такого значительного расхождения представляет интерес к этой работе в дальнейшем.

Авторы выражают благодарность Антону Макарову за помощь в проведении измерений и предоставлении метеоданных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехина Я.Е., Токарев М.Ю., Шевченко Н.В., Козуница Н.А. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. География. 2017. № 2. С. 51.
2. Терехина Я.Е., Токарев М.Ю., Галаев В.Е. Геофизика. Тверь: Полипресс. Спецвыпуск. 2021. С. 35.
3. Зимин А.В. Субприливные процессы и явления в Белом море. М.: Изд. ГЕОС, 2018. 220 с.
4. <https://www.geomark.ru/wp-content/uploads/2021/04/1105-1130-tokarev-mju.pdf>
5. Иванова И.Н., Будников А.А., Левонян К.А., Сергеев А.С. // Труды MARESEDU-2023. Т. 4. (Тверь, 2024). С. 121.
6. Сутырина Е.Н. Океанология. Учебн. пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 192 с.
7. Крюков Н.Д., Шматков В.А. // Евраз. союз ученых. 2015. № 6–2 (15). С. 109.
8. Дианский Н.А., Багатинский В.А. // Изв. РАН. Физ. Атм. и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 157; Diansky N.A., Bagatinsky V.A. // Izv. Atm. Ocean. Phys. 2019. V. 55. No. 6. P. 628.
9. Багатинский В.А., Дианский Н.А. // Изв. РАН. Физ. Атм. и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 231; Bagatinsky V.A., Diansky N.A. // Izv. Atm. Ocean. Phys. 2021. V. 57. No. 2. P. 208.

Current structure in the Black Bay of the Kandalaksha Bay during different phases of the tidal cycle

I. N. Ivanova*, A. A. Budnikov, A. I. Vasin, K. A. Levonyan

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

**e-mail: ivair@yandex.ru*

We presented the results of in-situ measurements of currents in the Black Bay of Kandalaksha Bay in 2021–2023, which is subject to tidal influence. The surface and bottom currents in different phases of the tidal cycle were measured using a grid of stations, the area in which the current from Nilmo-guba is registered was determined, and the in-situ measurements were compared with the results of modeling of bottom currents.

Keywords: White Sea, Kandalaksha Bay, bottom current, surface current, drift current, phases of the tidal cycle.