

Характеристики короткопериодных внутренних волн Авачинского залива по данным экспедиционных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе – сентябре 2018 года

Е. И. Свергун^{1,2,*}, А. В. Зимин^{1,2}

¹ Институт океанологии им. П. П. Шириова РАН, Москва, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: Egor-svergun@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.10.2019 г., после доработки – 17.12.2019 г.

Цель. В работе оцениваются характеристики короткопериодных внутренних волн в различных по гидрологическим и морфометрическим условиям районах Авачинского залива Тихого океана.

Методы и результаты. Характеристики внутренних волн оцениваются на основе обобщения результатов экспедиционных исследований, проводившихся в августе – сентябре 2018 г. в Авачинском заливе, данных дистанционного зондирования высокого разрешения с привлечением результатов моделирования приливов. В работе также производится прямое сопоставление данных контактных и спутниковых наблюдений за внутренними волнами. В результате работы показано, что в мелководном районе Авачинского залива регистрируются волны с высотами от 10 до 15 м. Они встречаются в 10 % от общего числа случаев. В глубоководном районе залива также часто регистрируются внутренние волны, однако их максимальная высота не превышает 10 м. На спутниковых снимках обнаружено 72 проявления короткопериодных внутренних волн. Прослеживаются проявления, распространяющиеся к берегу с приливной периодичностью от источника генерации, находящегося в районе изобаты 500 м, где имеется сильный уклон дна.

Выводы. В результате работы установлена ярко-выраженная связь цугов волн, зарегистрированных в мелководном районе, с полусуточной приливной динамикой. На основе анализа гидрологической ситуации и спутниковых изображений выдвинуто предположение, что внутренние волны могут генерироваться не только в результате распада баротропного прилива, но и благодаря инерционным колебаниям фронтального раздела, образованного меандрами Камчатского течения в присутствии неглубокого обостренного пикноклина. Анализ синхронных спутниковых и судовых наблюдений позволил установить, что внутренние волны высотой 5–8 м отчетливо проявляются на морской поверхности при глубине залегания пикноклина 10–20 м.

Ключевые слова: интенсивные внутренние волны, экспедиционные наблюдения, спутниковые изображения, фазовая скорость, приливные течения.

Благодарности: обработка результатов экспедиционных исследований выполнена в рамках государственного задания № 0149-2019-0015 «Волновые процессы, явления переноса и биогеохимические циклы в морях и океанах: исследование формирующих механизмов на основе физико-математического моделирования и натурных экспериментальных работ». Обработка результатов спутниковых наблюдений выполнена в рамках гранта РФФИ №18-35-20078 мол_а_вед. Авторы благодарны Н. В. Сандаюку, инженеру-исследователю Санкт-Петербургского государственного университета, за помощь в подборе данных оперативного моделирования, а также Н. Н. Шпилёву и Д. И. Дудко, инженерам Крыловского государственного научного центра, за участие в экспедиционных исследованиях.

Для цитирования: Свергун Е. И., Зимин А. В. Характеристики короткопериодных внутренних волн Авачинского залива по данным экспедиционных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе – сентябре 2018 года // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 300–312. doi:10.22449/0233-7584-2020-3-300-312

Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Avacha Bay Based on the *In Situ* and Satellite Observations in August-September, 2018

E. I. Svergun^{1, 2, *}, A. V. Zimin^{1, 2}

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

*e-mail: Egor-svergun@yandex.ru

Purpose. The paper is aimed at evaluating the characteristics of short-period internal waves in different regions of the Avacha Bay in the Pacific Ocean concerning their hydrological and morphometric conditions.

Methods and Results. The characteristics of internal waves are assessed through synthesizing the results of the *in situ* studies in the Avacha Bay in August-September, 2018, the high-resolution remote sensing data and the results of tidal modeling. The data of the *in situ* and satellite observations of internal waves were also directly compared. The results show that in the shallow part of the Avacha Bay, the waves, whose heights are from 10 to 15 m were observed. They constitute 10 % of the total number of cases. In the deep-water part of the bay, the internal waves are also often observed, but their maximum height does not exceed 10 m. The satellite images show 72 manifestations of short-period internal waves. Some of them spread to the coast with a tidal frequency from the generation source located around the 500 m isobath where the bottom abruptly slows down.

Conclusions. The results of the investigation revealed a pronounced relationship between the wave trains recorded in the shallow-water area and the semidiurnal tidal dynamics. Analysis of the hydrological situation and the satellite images permitted to assume that the internal waves could be generated as a result of not only a barotropic tide collapse, but also due to the inertial oscillations of the frontal zone formed by the Kamchatka current meanders in the presence of a shallow sharpened pycnocline. Having been analyzed, the synchronous satellite and *in situ* observations made it possible to find out that the internal waves of the 5–8 m height were distinctly manifested on the sea surface in case the pycnocline depth was 10–20 m.

Keywords: intensive internal waves, expedition observations, satellite images, phase velocity, tidal currents.

Acknowledgements: the results of expedition research were processed within the framework of the state tasks No. 0149-2019-0015 “Wave processes, transport phenomena and biogeochemical cycles in the seas and oceans: investigation of forming mechanisms on the basis of physical and mathematical modeling and field experiments”. The results of satellite observations were processed within the framework of the RFBR grant No. 18-35-20078 mol_a_ved. The authors are grateful to N.V. Sandalyuk, the research engineer at Saint Petersburg State University, for his assistance in selecting the operational modeling data, as well as to N.N. Shpilev and D.I. Dudko, the engineers of the Krylov State Research Center, for their participation in the expedition studies.

For citation: Svergun, E.I. and Zimin, A.V., 2020. Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Avacha Bay Based on the *In Situ* and Satellite Observations in August-September, 2018. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(3), pp. 278-289. doi:10.22449/1573-160X-2020-3-278-289

Введение

Материковые окраины Мирового океана отличаются повышенной интенсивностью внутренних волн. На этих окраинах вследствие нелинейной трансформации внутренних приливов могут образовываться короткопериодные внутренние волны, характеризующиеся периодами от единиц минут до десятков минут и длинами волн от сотен метров до единиц километров [1]. Такие волны чаще всего регистрируются в области сезонного термоклина и принадлежат к колебаниям низшей моды. Зачастую короткопериодные внутренние волны

являются интенсивными, то есть имеют высоту более 10 м и характеризуются значительной нелинейностью [2]. Их проявления отличаются изменчивостью во времени. Среди этих волн отмечаются цуги значительной высоты, которые оказывают большое влияние на распространение звука и перемешивание вод [3].

Окраина Тихого океана около п-ова Камчатка отличается небольшой шириной шельфа, сильным уклоном дна и сложной гидрологической структурой вод, формирующейся под влиянием Камчатского течения [4]. Особенностью данной акватории являются также внутренние волны, проявления которых на морской поверхности регистрируются дистанционными методами [5, 6]. Обобщение данных спутниковых и контактных наблюдений выявило вблизи океанского побережья Камчатского п-ова сложную картину цугов короткопериодных внутренних волн (КВВ), взаимодействующих друг с другом, а также с меандрами Камчатского течения [1]. Было установлено, что проявляющиеся с приливной периодичностью интенсивные внутренние волны (ИВВ) высотой 10–15 м – типичное явление как для шельфа полуострова, так и для прилегающих участков материкового склона [1, 7].

Однако, ввиду обособленности региона и частых неблагоприятных гидрометеорологических условий, сведения о статистических характеристиках КВВ на различных по глубине участках акватории океанского побережья Камчатки весьма скудны. Они ограничиваются результатами синхронных авиационных и судовых наблюдений, проводившихся только в Кроноцком заливе. Хотя и в Авачинском заливе проявления внутренних волн также регулярно регистрируются по спутниковым данным [6].

Попытка заполнить данный пробел была предпринята на основании обобщения результатов экспедиционных исследований, проводившихся летом – осенью 2018 г. в Авачинском заливе, дополненных данными дистанционного зондирования высокого разрешения с новейших спутников группировки *Sentinel* Европейского космического агентства (*European Space Agency, ESA*), а также результатами моделирования сервиса *Copernicus*.

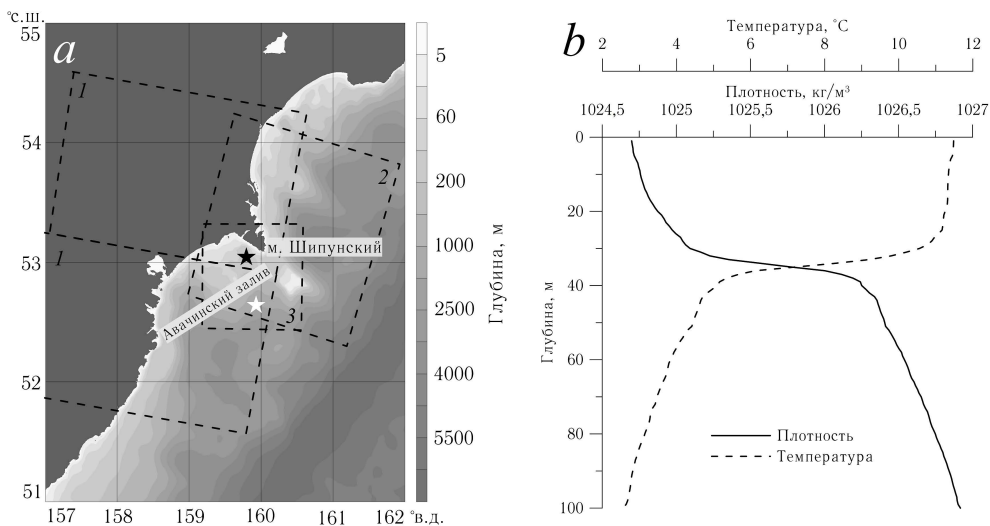
Таким образом, *цель данной работы* – описание статистических характеристик и географических особенностей распространения КВВ в Авачинском заливе Тихого океана по данным разнородных наблюдений.

Описание данных измерений и методики их обработки

Контактные наблюдения. Экспедиционные исследования проводились в Авачинском заливе Тихого океана в августе – сентябре 2018 г. на полигоне над материковым склоном близ м. Шипунского, характеризующемся глубинами от 100 до 200 м (мелководный полигон), а также мористее – на полигоне над склоном Курило-Камчатского желоба, где глубины превышают 1000 м (глубоководный полигон). Положение полигонов измерений показано на рис. 1, а.

Измерения выполнялись с судна, лежащего в дрейфе. Для измерений использовалась гирлянда из 26 температурных датчиков *PME* (Великобритания) с расстоянием между датчиками 2 м и общей длиной 50 м. Датчики регистрировали температуру с точностью $\pm 0,05$ °С. Положение нижнего конца гирлянды контролировалось с помощью датчика давления. Перед началом каждого эпизода измерений с судна-носителя выполнялось *CTD*-зондирование

прибором *SBE 25* (США) для определения глубины залегания слоя скачка. По результатам такого зондирования корректировалось положение гирлянды датчиков по вертикали. Суммарная продолжительность измерений на мелководном полигоне составляла 44 ч, на глубоководном полигоне – 97 ч. При этом каждый эпизод измерений имел продолжительность от 6 до 18 ч.



Р и с. 1. Положение полигонов контактных измерений и покрытие акватории Авачинского залива спутниковыми изображениями (а) (звездой черного цвета обозначен мелководный полигон; звездой белого цвета – глубоководный полигон; пунктирной рамкой – границы спутниковых изображений: 1 – *Sentinel-1A* от 13 и 24 августа, 17 сентября 2018 г.; 2 – *Landsat-8* от 22 августа, 16 и 23 сентября 2018 г.; 3 – *Sentinel-2A* и *Sentinel-2B* от 23 августа, 12 и 27 сентября 2018 г.); вертикальный профиль температуры и плотности на полигоне около м. Шипунского по данным *CTD*-зондирования 27 сентября 2018 г. (б)

F i g. 1. Position of the polygons of *in situ* measurements and coverage of the Avacha Bay water area with satellite images (а) (black star shows the shallow polygon, white star – the deep-sea polygon, dotted frame – the borders of satellite images: 1 – *Sentinel-1A* on August, 13 and 24, and September 17, 2018; 2 – *Landsat-8* on August 22, and September 16 and 23, 2018; 3 – *Sentinel-2A* and *Sentinel-2B* on August, 23, and September 12 and 27, 2018); temperature and density vertical profiles at the polygon near the Cape Shipunsky based on the *CTD*-sensing on September 27, 2018 (б)

Оговоримся, что по данным *CTD*-зондирований установлено: на полигонах положения термоклина и пикноклина совпадали (рис. 1, б). Это позволяет оценивать высоту и период каждой внутренней волны, используя только записи колебаний температуры, полученные с гирлянды температурных датчиков. По данным этих наблюдений оценивались периоды и высоты внутренних волн по методике, подробно изложенной в работе [8].

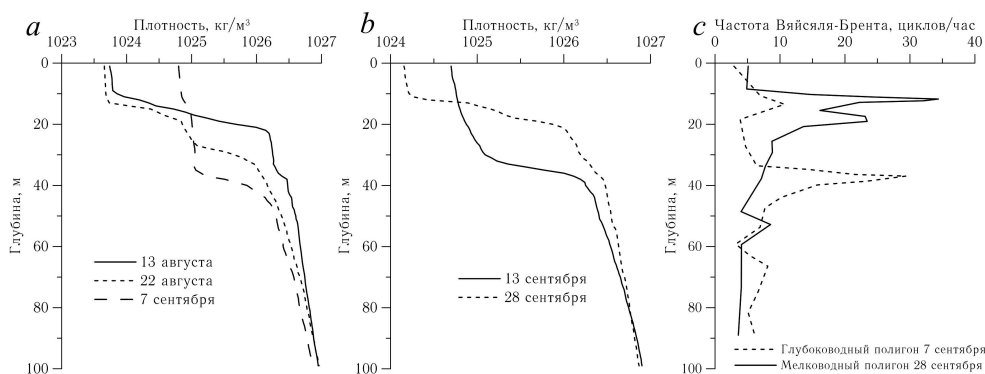
Для сопоставления моментов регистрации цугов КВВ с приливными течениями использованы данные ассимиляционного продукта *The Mercator global ocean operational analysis system* (URL: <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products>), содержащего величину ежечасных горизонтальных компонент приливного течения в точке, соответствующей положению мелководного полигона. Данные оперативного моделирования поставляются сервисом *Copernicus*.

Спутниковые наблюдения. Для анализа характеристик поверхностных проявлений КВВ использованы данные спектрорадиометров *Sentinel-2A* и *Sentinel-2B* в оптическом диапазоне с пространственным разрешением 10 м от 23 августа, 12 и 27 сентября 2018 г.; снимки спектрорадиометра *Landsat-8* в оптическом диапазоне с разрешением 30 м от 22 августа, 16 и 23 сентября 2018 г.; изображения радара с синтезированной апертурой *Sentinel-1A* в *C*-диапазоне с *VV*-поляризацией и режимом съемки *IW* с разрешением 20 м ([URL: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1](https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1)) от 13 и 24 августа, 17 сентября 2018 г. Всего в работе использовано девять спутниковых изображений. Покрытие акватории Авачинского залива спутниковыми изображениями показано на рис. 1, *a*.

Внутренние волны на морской поверхности в радиолокационных изображениях (РЛИ) проявляются в виде дугообразных чередующихся светлых и темных полос, образующих волновые пакеты. Это явление обусловлено различными характеристиками отражения радиолокационного сигнала капиллярными поверхностными волнами, модулированными течением, возникающим при прохождении КВВ [9, 10]. Для каждого поверхностного проявления внутренних волн (ВВ) определены такие характеристики, как положение проявления, длина волны, длина дуги лидирующего гребня в пакете, направление распространения, количество волн в пакете.

Для оценки связи наблюдаемых внутренних волн и их поверхностных проявлений 28 сентября 2018 г. было выполнено прямое сопоставление контактных и спутниковых наблюдений.

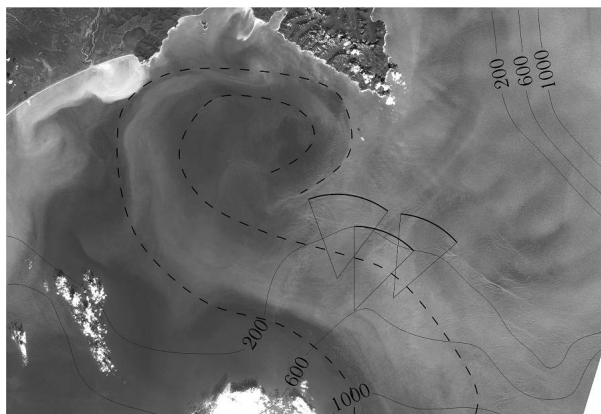
Описание гидрологической обстановки на исследуемых полигонах во время проведения экспедиционных работ. В ходе анализа данных *CTD*-зондирований были выявлены долговременные изменения положения пикноклина, произошедшие за время проведения экспедиционных работ. На рис. 2, *a* и *b* представлены вертикальные профили плотности, полученные в разное время на полигонах.



Р и с. 2. Профили вертикального распределения гидрологических характеристик: *a* – плотности на глубоководном полигоне; *b* – плотности на мелководном полигоне; *c* – частоты Вэйсälä – Брента на глубоководном и мелководном полигонах

F i g. 2. Profiles of vertical distribution of hydrological characteristics: *a* – density at the deep-sea polygon; *b* – density at the shallow-water polygon; *c* – Väisälä – Brent frequency at the deep-sea and shallow-water polygons

Как видно из рис. 2, *a*, во время экспедиционных работ на глубоководном полигоне происходило заглубление пикноклина, увеличение толщины верхнего перемешанного слоя, уменьшение плотности в пикноклине. В начале экспедиционных работ на глубоководном полигоне пикноклин располагался на глубинах от 10 до 20 м, градиент плотности в пикноклине составлял 0,26 у. е./м, толщина верхнего перемешанного слоя – 10 м. На момент окончания работ на глубоководном полигоне пикноклин залегал на глубинах от 40 до 50 м, градиент плотности в нем составлял 0,12 у. е./м, а толщина верхнего слоя – 40 м. Из рис. 2, *b* видно, что на мелководном полигоне, напротив, во время проведения экспедиционных работ происходил подъем пикноклина. Так, на начало работ пикноклин залегал в слое от 5 до 45 м, градиент плотности в пикноклине составлял 0,08 у. е./м, а толщина верхнего слоя всего 5 м. На момент окончания работ на мелководном полигоне пикноклин залегал в слое от 10 до 20 м, градиент плотности в пикноклине составлял 0,18 у. е./м, а толщина верхнего перемешанного слоя – 10 м. Рассмотренная эволюция вертикальных профилей температуры на мелководном и глубоководном полигоне, по-видимому, обуславливалась совместным действием штормового поверхностного волнения и мезомасштабных меандров Камчатского течения, зарегистрированных на космических снимках в оптическом диапазоне (рис. 3).

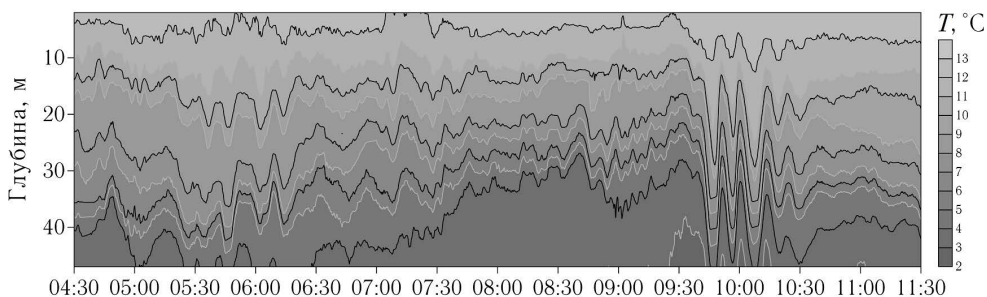


Р и с. 3. Пример регистрации меандров Камчатского течения на спутниковом изображении *Landsat-8* от 22 августа 2018 г. (штриховыми линиями на изображениях обозначено положение фронтов по данным поверхностных проявлений, сплошными толстыми линиями – проявления КВВ, сплошными тонкими линиями – предполагаемые места генерации КВВ)

F i g. 3. Example of recording the Kamchatka current meanders on the *Landsat-8* satellite image on August 22, 2018 (dashed lines on the images indicate position of the fronts based on the surface manifestations, solid thick lines – manifestations of the short-period internal waves (SIWs), solid thin lines – the assumed places of SIWs generation)

На рис. 2, *c* приведены вертикальные профили частоты Вэйсяля – Брента на момент окончания работ на мелководном и глубоководном полигонах. Видно, что на мелководном полигоне слой повышенных значений частоты Вэйсяля – Брента простирается на глубинах от 10 до 30 м, а на глубоководном – от 30 до 50 м. Максимальное значение ЧВБ на мелководном полигоне больше, чем на глубоководном.

Характеристики КВВ по данным контактных наблюдений: анализ и обсуждение результатов. По результатам обработки записей колебаний температуры (рис. 4) получена первичная статистика характеристик волн, а также выполнены оценки повторяемости высот КВВ, представленные в таблице.



Р и с. 4. Пример записи колебаний температуры по данным измерений гирляндой датчиков *PME* на мелководном полигоне от 16 сентября 2018 г.

F i g. 4. Example of the records of temperature fluctuations from the *PME* thermistor chain measurements at the shallow-water polygon on September 16, 2018

**Повторяемость высот КВВ на глубоководном и мелководном полигонах
Repeatability of the short-period internal wave heights at the deep-sea
and shallow-water polygons**

Высота, м / Height, m	Повторяемость, число случаев / Repeatability, cases	
	Глубоководный полигон / Deep-sea polygon	Мелководный полигон / Shallow-water polygon
2÷3	179	84
3÷4	97	38
4÷5	54	20
5÷6	33	12
6÷7	19	7
7÷8	15	7
8÷9	7	3
9÷10	1	1
10÷11	–	–
11÷12	–	1
12÷13	–	2
13÷14	–	–
14÷15	–	1
15÷16	–	1
Всего	405	177

Всего на записях температуры обнаружено 582 колебания, из них 405 приходится на глубоководный район, а 177 – на мелководный. Такое существенное различие связано с тем, что продолжительность измерений в районах сильно отличается. Однако если нормировать количество волн на время записи, то частота регистрации внутренних волн и в глубоководном, и в мелководном полигонах будет примерно одинаковой.

ководном районах составляет около четырех волн в час. Различия в статистических характеристиках периодов волн, зарегистрированных в разных районах не существенны: волны имеют средний период около 10 мин.

Иная картина наблюдается при анализе первичных статистик высот волн: при равенстве средних значений максимальные зарегистрированные высоты волн на полигонах сильно разнятся – в глубоководном районе максимальная высота волны составляет 9 м, а в мелководном – 15 м. В мелководном районе повторяемость ИВВ с высотами от 10 до 15 м достигает 6 % от общего числа волн, при этом КВВ высотой 15 м регистрируются два раза за период наблюдений. В глубоководном районе сильно нелинейные волны высотой от 9 до 10 м (будем для краткости называть такие волны близкими к интенсивным) регистрируются в 1 % случаев. Наибольшую повторяемость в районах имеют волны высотой от 2 до 3 м.

Существенное различие характеристик КВВ на глубоководном и мелководном полигонах можно объяснить описанными ранее различиями не только в донной топографии исследуемых районов, но и в гидрологической обстановке. Гидрологические особенности, наряду с сильным уклоном дна и меандрами Камчатского течения, взаимодействующими с пикноклином, создают на мелководном полигоне более благоприятные условия для генерации цугов ИВВ. Для Белого и Черного морей, например, известно [12, 13], что значительные по высоте КВВ генерируются в условиях мелко залегающего термоклина с повышенными градиентами температуры при его взаимодействии с меандрирующими фронтами.

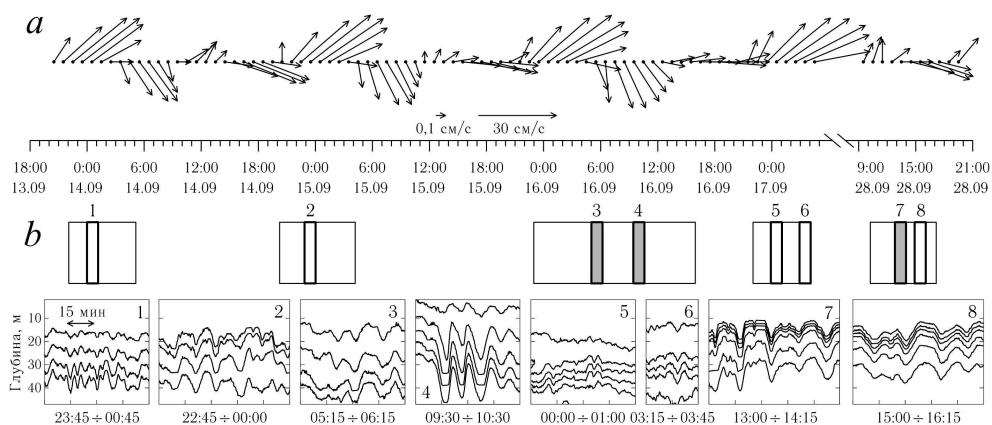


Рис. 5. Сопоставление записей колебаний температуры мелководного полигона и приливных течений с 13 по 28 сентября 2018 г.: *a* – график модуля и направления приливных течений; *b* – временные рамки записей колебаний температуры (вверху) и их фрагменты, иллюстрирующие цуги ярко выраженных и интенсивных КВВ (внизу). Тонкими рамками показаны записи колебаний температуры (ось времени совпадает с графиком течений), жирными рамками (1, 2, 5, 6, 8) – моменты регистрации цугов КВВ, жирными рамками с серой заливкой (3, 4, 7) – моменты регистрации цугов ИВВ

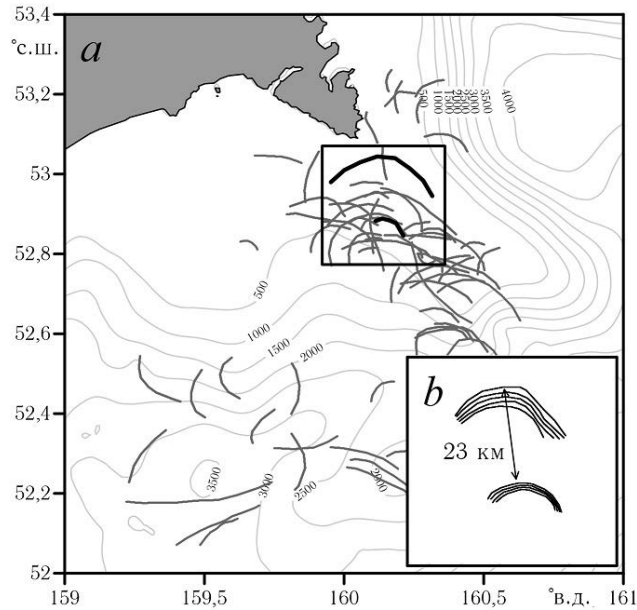
Fig. 5. Comparison of the records of temperature fluctuations of the shallow-water polygon and the tidal currents from September 13 to 28, 2018: *a* – graph of module and direction of the tidal currents; *b* – temporal frameworks of the temperature fluctuations records (above) and their fragments illustrating the trains of distinctly pronounced and intense SIWs (below). Thin frames show the records of temperature fluctuations (the time axis coincides with the chart of tidal currents), bold frames (1, 2, 5, 6, 8) – the moments of recording the SIWs trains, bold frames with grey fill (3, 4, 7) – the moments of recording the intense internal wave trains

На рис. 5 показаны сопоставление моментов регистрации интенсивных и близких к интенсивным цугов КВВ с модельными значениями скорости и направления приливных течений в точке, ближайшей к точкам мелководного полигона, по данным ассимиляционного продукта *The Mercator global ocean operational analysis system*.

Из рис. 5 видно, что волны, близкие к интенсивным, и ИВВ регистрируются в моменты, когда модуль приливных течений близок к максимальному, при этом приливные течения направлены перпендикулярно берегу – либо в его сторону, либо от него. То есть цуги КВВ регистрируются как в прилив, так и отлив. Анализ записей температуры показал, что ИВВ и близкие к интенсивным волны регистрируются с периодичностью 5–7 ч, что совпадает с результатами исследований, выполнявшихся здесь ранее [7]. В качестве примера можно привести запись от 16 сентября (см. рис. 4), на которой ИВВ регистрируются с периодичностью около 5 ч.

Характеристики КВВ по спутниковым данным. Сравнение характеристик КВВ по контактному и спутниковым данным. В общей сложности на 9 РЛИ зарегистрировано 72 поверхностных проявления пакетов КВВ с длиной волны в пакете от 200 до 800 м при средней длине волны 400 м. Протяженность лидирующего гребня в пакете КВВ варьируется от 4 до 39 км, в среднем составляя 14 км. Количество волн в пакете варьируется от 2 до 10. Зная характеристики поверхностных проявлений, можно примерно оценить площадь акватории, занятую ими. Эта площадь вычисляется как произведение длины лидирующего гребня проявления, длины волны и количества волн в пакете. Она составила ~ 1700 км². Учитывая, что приблизительная площадь акватории Авачинского залива – 4800 км², можно сказать, что проявления КВВ занимают 35 % площади акватории, то есть имеют не локальное, а повсеместное распространение. Положение лидирующих гребней проявлений пакетов КВВ показано на рис. 6, а. Как видно из рисунка, наибольшее число поверхностных проявлений КВВ зарегистрировано в районе свала глубин у изобат 500–1500 м. Подавляющее число проявлений КВВ направлено к берегу. Так как работы на акватории Авачинского залива производились в условиях присутствия меандров Камчатского течения, обнаруженных на многих проанализированных спутниковых изображениях в оптическом диапазоне (см. рис. 3), можно предположить, что в мелководном регионе к генерации КВВ приводит как взаимодействие мелко залегающего обостренного пикноклина с меандрами, так и взаимодействие приливных течений с неровностями дна. Небольшое число поверхностных проявлений зарегистрировано в районе изобат 2–3 км. Проявления КВВ в глубоководном районе не имеют ярко выраженной тенденции в направлении распространения.

Фазовая скорость внутренних волн по спутниковым данным определялась с использованием длины волны, измеренной на снимке, а также с привлечением данных о вертикальном распределении плотности в точке, максимально приближенной к местоположению проявления, в соответствии с дисперсионным соотношением для внутренних волн в двухслойном приближении стратифицированной среды [14]. Длина волн, определенная по расстоянию между соседними гребнями поверхностных проявлений, составляет 300–400 м. Для указанных значений длины волны фазовая скорость составляет около 0,6 м/с.

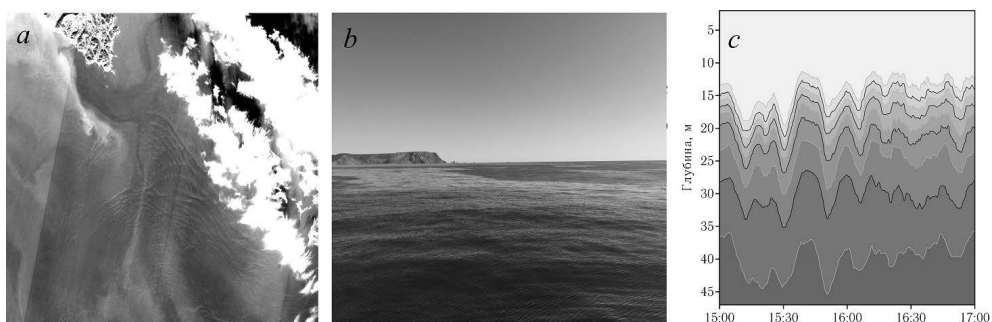


Р и с. 6. Поверхностные проявления КВВ по результатам анализа спутниковых изображений: *a* – положения поверхностных проявлений КВВ на акватории Авачинского залива (серые линии); *b* – увеличенное изображение поверхностных проявлений КВВ в выделенной области (черные линии), распространяющихся с приливной периодичностью

F i g. 6. Surface manifestations of SIWs resulted from analysis of satellite images: *a* – positions of surface manifestations of SIWs at the Avacha Bay water area (grey lines); *b* – enlarged image of surface manifestations of SIWs propagating with tidal frequency in the marked out area (black lines)

На снимках присутствуют сигнатуры, регулярно распространяющиеся в одном направлении – от шельфа к берегу (рис. 6, *b*). Если полагать, что они имеют приливной характер генерации, то, измерив на снимке расстояние между лидирующими гребнями пакетов и разделив его на время приливного цикла 12,4 ч, можно определить их фазовую скорость. Результаты расчета показали, что фазовая скорость двух зарегистрированных проявлений составляет около 0,6 м/с, что близко к ранее полученным оценкам по дисперсионному соотношению. Можно приблизительно оценить положение их источника генерации, проведя нормаль к касательным дуги лидирующего гребня в нескольких точках (аналогичный подход применен в работе [11]). Геометрические построения на снимке, аналогичные приведенным на рис. 3, показали, что нормали, проведенные к нескольким касательным дуги лидирующего гребня, сходятся в области у изобаты 500 м, где располагается бровка шельфа.

Поверхностное проявление КВВ, зарегистрированное на спутниковом изображении *Sentinel-2B* в 10:53 28 сентября 2018 г. (рис. 7, *a*), находится в непосредственной близости от положения судна-носителя, выполняющего контактные измерения. Расстояние от лидирующего гребня поверхностного проявления до судна-носителя составляет 7 км. Это проявление, с учетом его фазовой скорости, достигнет судна через 4 ч от момента получения снимка спутником, то есть около 15:00 28 сентября. На рис. 7, *c* представлена запись колебаний температуры гирляндой датчиков *РМЕ* от 28 сентября 2018 г.



Р и с. 7. Сопоставление результатов спутниковых, визуальных и контактных наблюдений за КВВ: *a* – фрагмент изображения спутника *Sentinel-2B*, 10:53 28 сентября, 2018 г.; *b* – фотография сликов на поверхности Авачинского залива, 15:21 28 сентября 2018 г.; *c* – фрагмент записи колебаний температуры, 15:00–17:00 28 сентября 2018 г.

F i g. 7. Comparison of the results of satellite, visual and *in situ* observations of SIWs: *a* – fragment of the *Sentinel-2B* satellite image, 10:53, September 28, 2018; *b* – photograph of slicks on the Avacha Bay surface, 15: 21, September 28, 2018; *c* – fragment of temperature fluctuations record, 15:00–17:00, September 28, 2018

Как видно из рисунка, с 15:30 до 16:15, то есть в момент, весьма близкий к расчетному времени, регистрируется ярко выраженный цуг КВВ с высотами 5–8 м. Данные визуальных наблюдений (рис. 7, *b*) также подтверждают наличие в указанное время на поверхности акватории ярко выраженных сликов, что является признаком, свидетельствующим о прохождении цуга КВВ. Фазовая скорость данного проявления, определенная с привлечением контактных данных, совпадает с результатами наблюдений и расчетов, выполненных на основе выделенных последовательных пакетов. Если принять во внимание, что на записи колебаний температуры цуг волн зарегистрирован в момент наибольшего модуля приливного течения (см. рис. 6), то не вызывает сомнений приливной характер генерации обнаруженного проявления.

З а к л ю ч е н и е

На записях колебаний температуры по данным экспедиционных исследований в глубоководном и мелководном районах Авачинского залива зарегистрировано в общей сложности более 500 внутренних волн с высотами от 2 до 15 м. В результате анализа статистических характеристик высот КВВ установлено, что в мелководном районе Авачинского залива в 10 % случаев регистрируются ИВВ с высотами от 10 до 15 м. В глубоководном районе они не регистрируются. Существенные различия в характеристиках КВВ в шельфовом и глубоководном районах Авачинского залива обусловлены различиями как в донной топографии, так и в гидрологической обстановке, а именно: в шельфовом районе ИВВ образуются из-за сильного уклона дна, а также мелко залегающего обостренного термоклина, взаимодействующего с меандрами Камчатского течения. Анализ записей колебаний температуры показал, что ИВВ в шельфовой зоне Авачинского залива регистрируются в виде цугов из 2–4 волн. Сопоставление записей колебаний температуры с приливными течениями показало ярко выраженную связь цугов КВВ с полусуточной приливной динамикой.

По результатам анализа спутниковых изображений обнаружено 72 поверхностных проявления КВВ, преимущественно сконцентрированных в районе свала глубин у изобаты 500 м. Кроме того, выделены поверхностные проявления КВВ, распространяющиеся к берегу с приливной периодичностью. Показано, что КВВ могут распространяться из области взаимодействия мелкого обостренного пикноклина с меандрами Камчатского течения, обнаруженными на спутниковых изображениях.

Сопоставление синхронных данных спутниковых, контактных и визуальных наблюдений выявило, что КВВ с высотами 5–8 м и длинами 300–400 м имеют отчетливые проявления на морской поверхности.

Синтез данных контактных и спутниковых наблюдений позволил провести качественный и достаточно полный пространственно-временной анализ изменчивости характеристик КВВ в рассматриваемом регионе. В работе впервые показано повсеместное распространение КВВ на акватории Авачинского залива и регулярное появление ИВВ, распространяющихся к берегу на шельфе, а также связь цугов КВВ с полусуточным приливным циклом. Продемонстрированные в рамках данной статьи особенности поля КВВ весьма сходны с полученными ранее результатами для Белого моря [15], что подтверждает вывод о том, что сильная приливная динамика является ключевым фактором, определяющим явления и процессы на масштабах от сотни метров до десятка километров и временном интервале от минут до полусуток. Однако полученные результаты поднимают вопросы, на которые еще предстоит найти ответы. Так, анализ спутниковых данных показывает, что в заливе встречаются сигнатуры КВВ с весьма различающимися пространственными масштабами и ориентацией, указывающими на специфические условия их формирования. Не совсем ясно, как влияет изменчивость гидрофизических полей, связанная с меандрами Камчатского течения на условия генерации КВВ. Все это предполагает дальнейшие, в том числе натурные, исследования в данном районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сабинин К. Д., Серебряный А. Н.* «Горячие точки» в поле внутренних волн в океане // Акустический журнал. 2007. Т. 53, № 3. С. 410–436. URL: http://www.akzh.ru/pdf/2007_3_410-436.pdf (дата обращения: 03.04.2020).
2. *Сабинин К. Д., Серебряный А. Н., Назаров А. А.* Интенсивные внутренние волны в Мировом Океане // Океанология. 2004. Т. 44, № 6. С. 805–810.
3. *Родионов А. А., Семенов Е. В., Зимин А. В.* Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 2. С. 89–108. URL: <http://hydrophysics.info/wp-content/uploads/2014/10/%D0%A0%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2.pdf> (дата обращения: 03.04.2020).
4. *Храпченков Ф. Ф.* Гидрологическая структура и распределение энергии вихрей Камчатского течения // Метеорология и гидрология. 1989. № 1. С. 65–71.
5. База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане / А. С. Епифанова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 4. С. 395–403. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-395-403

6. *Jackson C. R.* An Atlas of internal solitary-like waves and their properties. Alexandria: Global Ocean Associates, 2004. 560 p. URL: https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html (дата обращения: 09.08.2019).
7. *Pao H. P., He Q.* Generation and transformation of intense internal waves on shelves // Abstracts for COAA Scientific Workshop, at the University of Maryland, Collage Park, July 13, 2002. URL: <http://www.coaaweb.org/documents/2002JulyAbstracts.pdf> (date of access: 10.04.2020).
8. *Жегулин Г. В., Зимин А. В., Родионов А. А.* Анализ дисперсионных зависимостей и вертикальной структуры внутренних волн в Белом море по экспериментальным данным // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 4. С. 47–59.
9. *Robinson I. S.* Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography. London: Springer, 638 p. doi:10.1007/978-3-540-68322-3
10. *Klemas V.* Remote sensing of ocean internal waves: An overview // *Journal of Coastal Research*. 2012. Vol. 28, no. 3. P. 540–546. doi:10.2112/JCOASTRES-D-11-00156.1
11. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. / А. В. Зимин [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 2014. № 3. С. 41–55. doi:10.7868/S0205961414030087
12. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря / Д. А. Романенков [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 1. С. 59–72.
13. Внутренние волны на шельфе Черного моря в районе Гераклеийского полуострова: моделирование и наблюдение / В. А. Иванов [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 4. С. 322–340. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-322-340
14. *Коняев К. В., Сабинин К. Д.* Волны внутри океана. СПб. : Гидрометеиздат, 1992. 271 с.
15. *Зимин А. В.* Субприливные процессы и явления в Белом море. М. : ГЕОС, 2018. 220 с.

Об авторах:

Свергун Егор Игоревич, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), аспирант 1-го года обучения Санкт-Петербургского государственного университета (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9), **WoS ResearcherID: AAC-7289-2020**, **Scopus Author ID: 57195066881**, egor-svergun@yandex.ru

Зимин Алексей Вадимович, глава лаборатории, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), доктор географических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9), **WoS ResearcherID: C-5885-2014**, **Scopus Author ID: 55032301400**, zimin2@mail.ru