

УДК 556.113.4

© Н. А. Липинская<sup>1\*</sup>, П. А. Салюк<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
690041, ул. Балтийская, д. 43, г. Владивосток, Россия

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, 690091, ул. Суханова, д. 8, г. Владивосток, Россия

\*e-mail: ef.na.hc@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Статья поступила в редакцию 03.02.2020, после доработки 04.04.2020

Проведен анализ вариаций смоделированных коэффициентов яркости моря при прохождении внутренних волн в шельфовой зоне западной части Японского (Восточного) моря в заливе Петра Великого на основе судовых *in situ* измерений гидрологических и биооптических характеристик морской толщи за 2008–2016 гг. Показано, что наибольшим контрастом для дистанционного наблюдения проявлений внутренних волн в морской толще обладают индексы цвета в диапазоне длин волн 400–500 нм и дистанционно определенные концентрации хлорофилла-*a* по алгоритмам типа OC2. Оптимальным спектральным диапазоном для спутниковой идентификации проявления внутренних волн является 440–500 нм с учетом потенциальных ошибок атмосферной коррекции. Получаемые оптические характеристики могут быть напрямую использованы для анализа периода колебаний внутренних волн и их автоматической идентификации на спутниковых изображениях. Положение гребней внутренних волн может быть размазано или смещено, и для его оценки, а также для оценки амплитуды необходимо решение обратной задачи дистанционного зондирования цвета моря с учетом региональных гидрооптических характеристик и непостоянной стратификации оптически-активных компонентов в морской толще, с привлечением данных гидрофизического моделирования.

**Ключевые слова:** хлорофилл-*a*, окрашенное растворенное органическое вещество, коэффициент яркости, индекс цвета, внутренние волны, оптически активные компоненты, Японское море.

© N. A. Lipinskaia<sup>1\*</sup>, P. A. Salyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, 690041, Baltiyskaya Str., 43, Vladivostok, Russia

<sup>2</sup>Far Eastern Federal University, 690090, Sukhanova Str., 8, Vladivostok, Russia

\*e-mail: ef.na.hc@gmail.com

## RESEARCH OF THE INFLUENCE OF INTERNAL WAVES ON THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE SEA SURFACE IN THE SHELF ZONE OF PETER THE GREAT BAY

Received 03.02.2020, in final form 04.04.2020

Based on *in situ* measurements of the hydrological and bio-optical characteristics of the marine water, an analysis was made of the variations of the simulated remote sensed reflectance spectra of the sea during the passage of internal waves in the shelf zone of Peter the Great Bay. It has been shown that color indices and remotely determined concentrations of chlorophyll-*a* have the greatest contrast for remote observation of the manifestations of internal waves in the marine column. The optimal spectral range for satellite identification of the manifestation of internal waves is 440–500 nm. The obtained optical characteristics can be directly used to analyze the period of oscillations of internal waves and their automatic identification in satellite images. The position of the crests of the internal waves can be smeared or shifted, and for its estimation, as well as for estimating the amplitude, it is necessary to solve the inverse problem of remote sensing of the color of the sea, taking into account regional hydro-optical characteristics and the unstable stratification of optically active components in the sea mass, using data from hydro-physical modeling.

**Key words:** chlorophyll-*a*, colored dissolved organic matter, remote sensed reflectance, color indices, internal waves, optically active components, Sea of Japan.

Ссылка для цитирования: Липинская Н.А., Салюк П.А. Исследование воздействия внутренних волн на оптические характеристики поверхности моря в шельфовой зоне залива Петра Великого // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 2. С. 51–59. doi: 10.7868/S2073667320020069

For citation: Lipinskaia N.A., Salyuk P.A. Research of the influence of internal waves on the optical characteristics of the sea surface in the shelf zone of Peter the Great Bay. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 2, 51–59. doi: 10.7868/S2073667320020069

## 1. Введение

Измерение параметров внутренних волн (ВВ) *in situ* или с борта судна является трудоемкой задачей, поскольку ВВ имеют больший горизонтальный масштаб, большие вертикальные амплитуды и более низкую частоту, чем поверхностные волны. Одним из эффективных средств изучения ВВ в морской толще является спутниковое зондирование поверхности моря в различных спектральных диапазонах. Традиционно для обнаружения и исследования ВВ с помощью спутникового зондирования используются радиолокационные изображения, и оптические данные в области солнечного блика [1, 2] или данные в поле видимой полосы высокого разрешения [3]. Основная форма проявления ВВ на таких изображениях — это чередование полос выглаженной и шероховатой морской поверхности. Кроме этого, наблюдение ВВ возможно в полях температур [4] и в полях цвета моря [5, 6]. Радиолокационные изображения обычно дороги, а использование цветных спутниковых изображений океана с более низким пространственным разрешением для обнаружения ВВ и их процессами абсолютно бесплатно [7].

Из анализа спутниковых изображений возможно определять пространственные и временные характеристики ВВ, такие как период и длина ВВ [8]. С учётом дополнительной информации о гидрологических характеристиках водной толщи, получаемой с автономных буйковых станций, гидрологических атласов, судовых измерений или данных реанализа возможно получать информацию об амплитуде ВВ с использованием двуслойной модели океана [5].

Генерация ВВ в морской толще происходит за счет воздействия на воду, с условиями устойчивой стратификации, сильных внешних возмущений. Основными факторами при генерации ВВ являются плотностная стратификация вод и морфология морского дна.

Прохождение ВВ оказывает существенное влияние на вертикальную структуру вод и перемешивание [9], что в первую очередь отражается в полях температуры и солёности. Кроме этого, пассивные оптически-активные компоненты (ОАК) морской воды также могут менять свое распределение по глубине, изменяя при этом цвет поверхности моря, который может быть зарегистрирован дистанционно [10]. Таким образом, соответствующие изменения цвета моря содержат в себе информацию по измененной стратификации и могут быть использованы, как дополнительный фактор при оценке амплитуды ВВ из спутниковых данных [7].

В работе исследуется вертикальная структура концентрации хлорофилла-*a* и флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) измеренных *in situ* в морской воде при прохождении ВВ в заливе Петра Великого (ЗПВ), оценивается соответствующее проявление ВВ в полях цвета морской поверхности, и определяются оптимальные оптические характеристики для идентификации ВВ при спутниковом зондировании цвета моря.

## 2. Методы измерений и анализа данных

Для проведения исследования в данной работе использовались ежечасные судовые STD измерения гидрологических и гидрооптических профилей, полученных с использованием профилографа SBE-19plus в шельфовой зоне западной части Японского моря около мыса Шульца (в серии прибрежных экспедиций 2008–2016 г.) с дополнительными датчиками флуоресценции WetLabs SeaStar. Рассматриваемые параметры: температура, солёность, концентрация хлорофилла-*a* и ОРОВ.

Датчик флуоресценции хлорофилла-*a* был калиброван на контактные определения концентрации хлорофилла-*a* с помощью спектрофотометрического метода (ГОСТ 17.1.4.02–90). Датчик флуоресценции ОРОВ определяет концентрацию в единицах сульфата дигидрата, и его значения дополнительно сравнивались с показателями ослабления света ОРОВ, полученных спектрофотометрическим методом после фильтрации проб морской воды на фильтрах 0.2 мкм, для того, чтобы оценить вклад измеренного содержания ОРОВ в формирование цвета поверхности моря.

Характеристики цвета поверхности моря определялись путем прямого моделирования распространения света через морскую толщу с известными распределениями хлорофилла-*a* и ОРОВ по глубине с помощью демонстрационной версии программного обеспечения (ПО) Hydrolight-Ecolight 6.0 [11], предоставленного во время курсов на Четвертой международной конференции по наукам о цвете океана (IOCS-2019) в апреле 2019 г.

Показатель поглощения света фитопланктоном определялся с помощью параметризации через концентрацию хлорофилла-*a* по модели [12]:

$$a_p(z, \lambda) = A(\lambda) [Chl(z)]^{-B(\lambda)} Chl(z), \quad (1)$$

где  $A(\lambda)$  и  $B(\lambda)$  — табулированные значения, приведенные в работе [12].

Показатель коэффициента поглощения света ОРОВ и детритами описывался моделью [13]:

$$a_{dg}(\lambda) = a_{dg}(\lambda_0) \exp[-\gamma(\lambda - \lambda_0)], \quad (2)$$

где коэффициент  $\gamma$  определялся на основе анализа региональных настроек квазианалитической биооптической модели QAA [14] для ЗПВ [15].

Для описания рассеивающих свойств использовалась индикатриса рассеяния Petzold для «средних частиц» [16] и модель рассеяния взвешенными частицами:

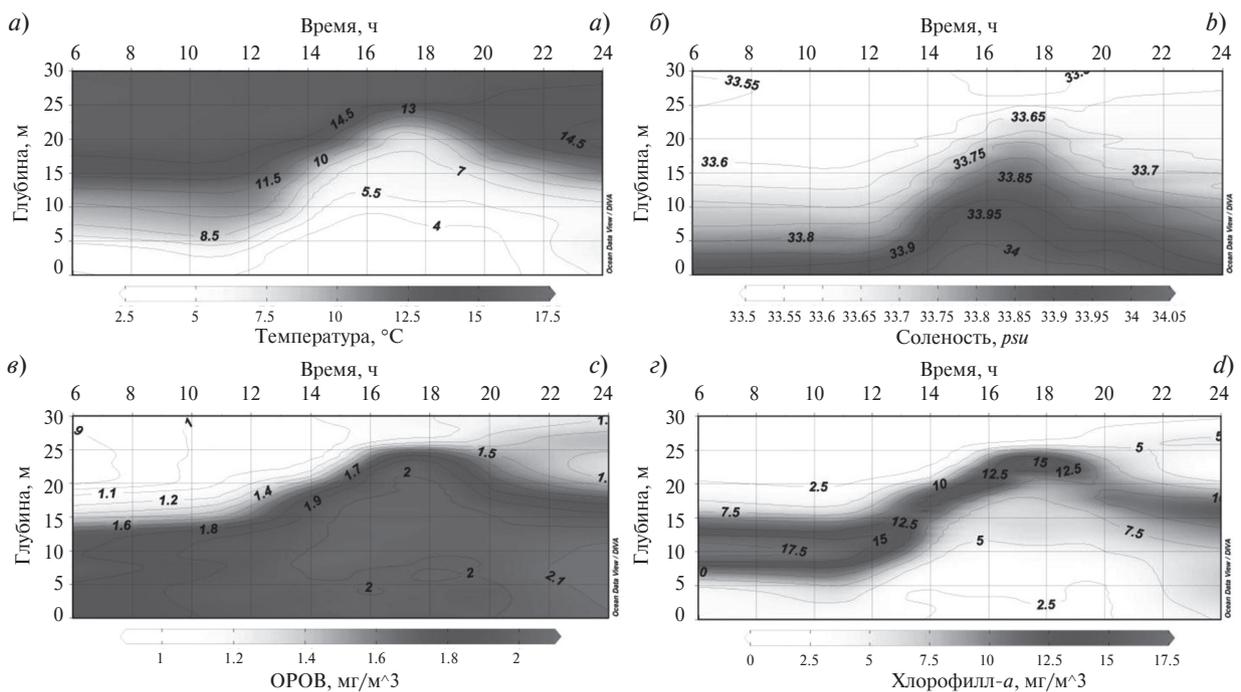
$$b_{bp} = X \left( \frac{400}{\lambda} \right)^Y \quad (3)$$

с коэффициентами  $X$  и  $Y$ , подобранными для ЗПВ [15].

В качестве входных параметров для концентрации хлорофилла- $a$  и показателя поглощения света ОРОВ, распределенных по глубине, в модели Hydrolight использовались *in situ* измерения, выполненные во время прохождения ВВ.

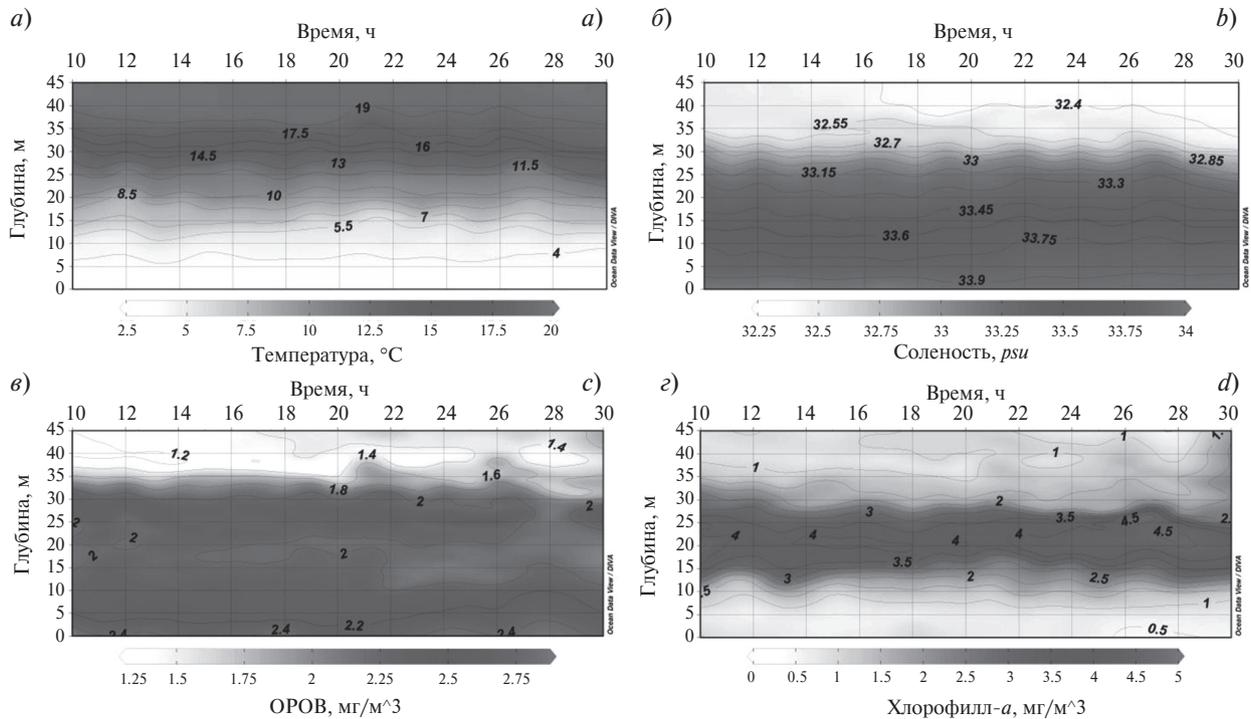
### 3. Результаты и обсуждение

Для определения характеристик ВВ и дальнейших расчетов по судовым *in situ* измерениям температуры, солености морской воды, концентрации хлорофилла- $a$  и ОРОВ были построены временные разрезы вертикального распределения значений исследуемых параметров. На рис. 1 и 2 показаны временные разрезы вертикального распределения концентрации ОРОВ и хлорофилла- $a$  в толще морской воды, выполненные на входе в бухту Витязь с морской стороны мыса Шульц в 2008 и 2009 г. соответственно. На рис. 1 временная разница между гребнем и впадиной волны примерно равна 6 ч, что соответствует периоду 12 ч. Амплитуда колебания составила 13 м. Длина имеющегося временного ряда не позволяет с полной уверенностью говорить о периоде волны. Однако в данном районе при исследовании вертикальных распределений температуры воды выявлено, что генерация ВВ с периодом около 12 ч является типичным явлением [17, 18]. Это дает основания полагать, что в имеющемся ряде оптических данных зафиксировано проявление ВВ с периодом 12 ч. На временном разрезе (рис. 2) период колебания составил 4 ч и амплитуда 3.5 м.



**Рис. 1.** Временной разрез вертикального распределения температуры (а), солености (б), концентрации ОРОВ (в), хлорофилла- $a$  (г), выполненный 2008.10.03 в шельфовой зоне западной части Японского моря на входе в бухту Витязь около мыса Шульц.

**Fig. 1.** A temporal section of the vertical distribution of temperature (a), salinity (b), CDOM (c), chlorophyll- $a$  (d), performed on October 03, 2008 in the offshore Sea of Japan at the entrance to Vityaz Bay near Cape Schulz.



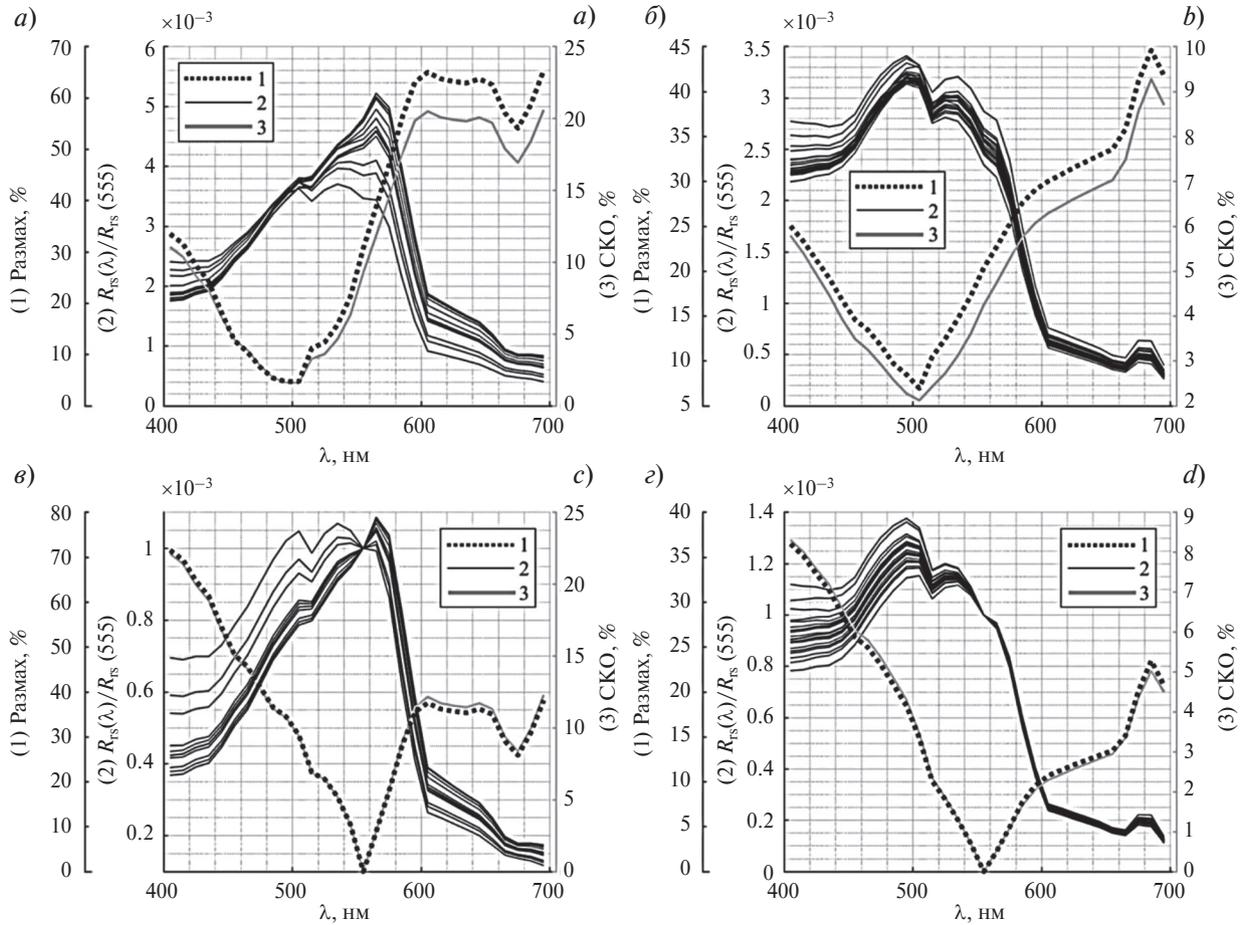
**Рис. 2.** Временной разрез вертикального распределения температуры (а), солёности (б), концентрации ОРОВ (в), хлорофилла-а (г), выполненный 2009.09.04 в шельфовой зоне западной части Японского моря с морской стороны мыса Шульц.

**Fig. 2.** A temporal section of the vertical distribution of temperature (a), salinity (b), CDOM (c), chlorophyll-a (d), performed on September 04, 2009 in the offshore Sea of Japan at the entrance to Vityaz Bay near Cape Schulz.

Определяющим фактором для генерации ВВ в шельфовой зоне приливного моря является полусуточный приливной цикл. Приливное течение из открытой части моря, набегая на крутой подъем дна, совершает гидродинамический скачок и порождает ВВ. [19, 20]. Для данного района характерно активное и мощное по энергетике внутреннее волнение. По данным ЕСИМО [21] в 2008 г. было выявлено, что в исследуемом районе наблюдался прилив с перепадом уровня 0.32 м, при этом период колебаний прилива и концентраций хлорофилла-а имел схожую картину. Исходя из этого можно предположить, что приливное течение могло существенно повлиять на генерацию мощной ВВ (амплитудой около 13 м) в данном районе. [22, 23].

Зная распределения ОАК по глубине, возможно промоделировать спектры коэффициентов яркости моря ( $R_{rs}$ ) с помощью ПО Hydrolight-Ecolight 6.0 на различных фазах движения ВВ, чтобы оценить соответствующие вариации яркости моря, которые можно регистрировать дистанционно (рис. 3, а, б). Дополнительно на (рис. 3) показаны размах (разница максимального и минимального значения) и среднеквадратичное отклонение (СКО) на различных длинах волн. На рис. 3, в, г представлены те же самые результаты при нормировке на  $R_{rs}(555)$ . Видно, что при этом относительные величины размаха и СКО увеличились, что позволяет более избирательно детектировать проявления ВВ в цвете моря.

Видно, что гидрофизические процессы, происходящие в водной толще, значимо отразились в цвете поверхности моря, как в значениях размаха, так и в СКО. Ожидаемо, что ВВ с амплитудой 13 м привела к более существенным вариациям коэффициентов яркости моря. Хорошими показателями для идентификации проявлений ВВ из спутниковых оптических радиометров будут отношения от  $R_{rs}(440)/R_{rs}(555)$  до  $R_{rs}(500)/R_{rs}(555)$ , где длина волны изменяется в числителе от 440 до 500 нм. Во-первых, в данном спектральном диапазоне удовлетворительно работают алгоритмы атмосферной коррекции данных [24], во-вторых, наблюдаются высокие значения относительных и абсолютных изменений дистанционно-определённых параметров, в-третьих, глубина проникновения света близка к максимально возможной, что расширяет возможности дистанционного анализа ВВ. Если использовать надводные носители оптических радиометров — суда или летательные аппараты, где нет необходимости проводить атмосферную коррекцию, то спектральный диапазон можно расширить до 400–500 нм, где в синей его части будет оказывать дополнительное влияние ОРОВ, которое также изменяет глубину своего положения при прохождении ВВ.



**Рис. 3.** Рассчитанные спектры коэффициентов яркости моря  $R_{rs}(\lambda)$  для 2008.10.03 (а) и 2009.09.04 (б) (линия 2), и нормированные спектры  $R_{rs}(\lambda)$  на значение  $R_{rs}(555)$  для 2008.10.03 (в) и 2009.09.04 (г) (линия 2). Линия 1 — размах в % от среднего, линия 3 — СКО в % от среднего.

**Fig. 3.** The calculated spectra of the sea brightness coefficients  $R_{rs}(\lambda)$  for 2008.10.03 (a) and 2009.09.04 (b) (line 2), and the normalized spectra of  $R_{rs}(\lambda)$  by the value of  $R_{rs}(555)$  for 2008.10.03 (c) and 2009.09.04 (d) (line 2). Line 1 — range in % of the average, line 3 — standard deviation in % of the average.

В табл. 1 приведены значения размаха и СКО в % от среднего для различных оптических характеристик, которые могут быть определены дистанционно, для данных 2008 и 2009 гг в ЗПВ. Дополнительно рассчитаны индекс цвета  $R_{555}^{490}$ :

$$R_{555}^{490} = \log_{10}(R_{rs}(490) / R_{rs}(555)) \quad (4)$$

и дистанционно определяемая концентрация хлорофилла-а  $C_{rs}$  по упрощенному биооптическому алгоритму ОС2:

$$C_{rs} = 10^{(k_1 \cdot R_{555}^{490} + k_2)}, \quad (5)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — эмпирические коэффициенты, определяемые путем сравнения с исходными данными по концентрации хлорофилла-а.

Из табл. 1 видно, что использование индекса цвета  $R_{555}^{490}$  и дистанционно определенной концентрации хлорофилла-а  $C_{rs}$  увеличивает значения размаха и СКО, и соответственно, улучшает возможности дистанционного обнаружения проявления ВВ.

На рис. 4 представлен анализ временного хода дистанционно определенной концентрации хлорофилла-а  $C_{rs}$  (линия 1), *in situ* измеренной концентрации хлорофилла-а на горизонтах верхнего положения максимума хлорофилла-а (линия 2) и посередине его положения (линия 3). В скобках в подписях осей указаны конкретные значения глубин *in situ* определений.

Таблица 1

Размах (%) и СКО (%) различных показателей, определяемых дистанционно, во время прохождения ВВ 2008 и 2009 гг.  
 The range (%) and standard deviation (%) of various indicators, determined remotely, during the passage of internal waves 2008 and 2009

Показатель	2008		2009	
	Размах, %	СКО, %	Размах, %	СКО, %
$R_{rs}(490)$	4.9	1.8	9.1	2.4
$R_{rs}(555)$	30.7	9.3	20.4	4.2
$R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$	35.5	11.0	19.6	4.6
$R_{555}^{490}$	137.4	43.1	92.0	21.4
$C_{rs}$	58.7	18.9	22.25	5.2

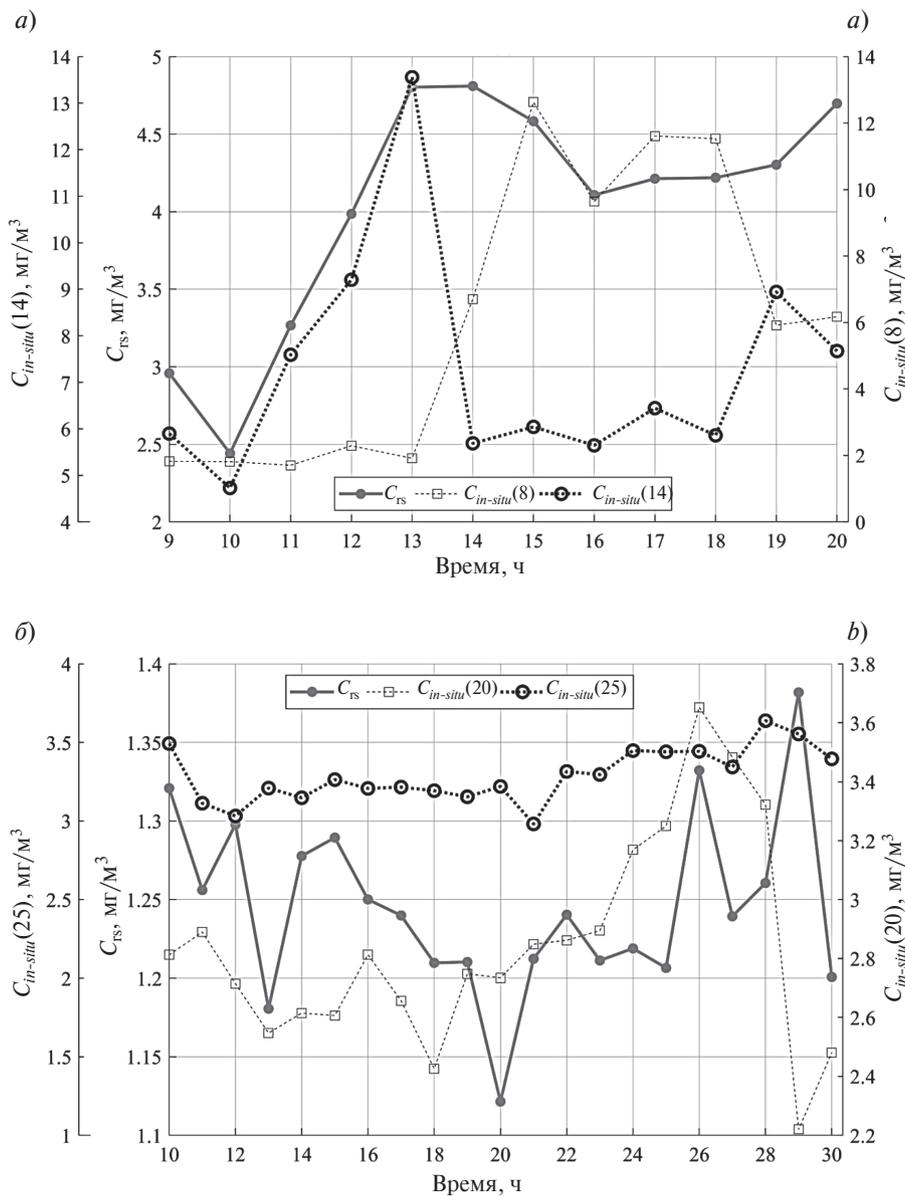


Рис. 4 Измеренная *in situ* концентрация хлорофилла-а для 2008.10.03 (а) и 2009.09.04 (б) —  $C_{rs}$ , на горизонте верхнего положения максимума хлорофилла-а —  $C_{in situ}(20)$ , и среднего положения хлорофилла-а —  $C_{in situ}(25)$ .

Fig. 4. *In situ* measured concentration of chlorophyll-a for 2008.10.03 (a) and 2009.09.04 (b) —  $C_{rs}$ , at the horizons, the maximum values of chlorophyll-a —  $C_{in situ}(20)$ , and the average position of chlorophyll-a —  $C_{in situ}(25)$ .

Величина  $C_{rs}$  включает в себя вариации глубины залегания ОАК морской воды (в данном случае, в основном, — фитопланктона) и может быть использована для идентификации ВВ, а также в качестве дополнительного критерия для оценки амплитуды.

На рис. 4, *а* видно, что временной ход  $C_{rs}$  отражает усредненный ход ВВ. На данных рис. 4, *б* с помощью анализа спектров мощности колебаний определено, что на всех временных рядах присутствует колебание с периодом около 4 ч. Поэтому частота колебания дистанционно измеренных параметров может быть дополнительным критерием для идентификации ВВ. Этот критерий может быть использован либо для геостационарных спутниковых сканеров цвета, таких как действующий GOCI [25], или планируемых к запуску новых миссий [26], либо для анализа последовательно измеренных изображений с разных спутников, на которых можно идентифицировать проявление ВВ в виде полосатой структуры и оценить соответствующую скорость распространения [27] и таким образом перейти от анализа пространственного ряда к временному.

Положение гребня волны в данных дистанционного зондирования цвета моря может быть размазано или смещено за счет вклада ОАК с разных глубин и динамических процессов, возникающих после прохождения ВВ, когда часть взвешенных частиц поднимается выше гребня или остается на его уровне в течении еще какого-то времени [28]. Этот эффект можно наблюдать на рис. 4, *а* и на рис. 1, *з* по изолинии 5 мкг/л после гребня ВВ.

На рис. 4 амплитуда колебания  $C_{rs}$  выше для более мощной ВВ, зарегистрированной в 2008 г. Но напрямую использовать амплитуду дистанционно определенных оптических характеристик для оценки амплитуды ВВ нельзя, поскольку дополнительно имеет значение глубина распространения ВВ и региональные гидрооптические характеристики фотического слоя моря.

Таким образом, для полноценного анализа положения гребня ВВ и ее амплитуды с помощью дистанционного измерения цвета моря необходимо решение обратной задачи с учетом региональных оптических характеристик морской воды и непостоянной стратификации ОАК в слое, формирующем цвет моря. Перспективным видится совместное использование оптического и гидрофизического подходов [5], когда в качестве дополнительных граничных условий при решении обратной задачи могут выступать гидрофизические модели распространения ВВ, а для начальных значений глубины перемешанного слоя использоваться данные реанализов [29, 30].

#### 4. Заключение

Показано, что наибольшим контрастом для дистанционного наблюдения проявлений ВВ в морской толще обладают индексы цвета и дистанционно определенные концентрации хлорофилла-*а*. Оптимальным спектральным диапазоном для спутниковой идентификации проявления ВВ является 440–500 нм за счет особенностей работы алгоритмов атмосферной коррекции, глубины проникновения света в морскую толщу и поглощения света ОРОВ и фитопланктоном. Из данных дистанционного зондирования цвета моря возможно напрямую оценивать период колебаний ВВ. При этом положение гребня может быть размазано или смещено, и для его оценки, а также для оценки амплитуды ВВ, необходимо решение обратной задачи дистанционного зондирования с учетом региональных гидрооптических характеристик и непостоянной стратификации ОАК в морской толще с привлечением данных гидрофизического моделирования. Получаемые оптические характеристики могут быть использованы для повышения избирательности автоматической идентификации проявлений ВВ на спутниковых изображениях цвета моря.

#### 5. Финансирование

Обработка, анализ и моделирование гидрооптических измерений выполнен в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117030110037-8, анализ пространственных проявлений ВВ на морской поверхности выполнен в рамках гранта РФФИ № 19-77-10022.

#### Литература

1. Liu B., Yang H., Ding X., Li X. Tracking the internal waves in the South China Sea with environmental satellite sun glint images // *Remote Sensing Letters*. 2014. V. 5, N 7. P. 609–618.
2. Дубина В.А., Митник Л.М. Внутренние волны в Японском море: пространственно-временное распределение и характеристики по данным спутникового дистанционного зондирования // *Исследование Земли из космоса*. 2007. № 3. С. 37–46.
3. Liu A., Holbrook J., Apel J. Nonlinear Internal Wave Evolution in the Sulu Sea // *Journal of Physical Oceanography*. 1985. N 15. P. 1613–1624.
4. Алексанин А.И., Ким В. Автоматическое обнаружение внутренних волн на спутниковых изображениях и оценка плотности перемешанного слоя // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 1. С. 44–52.
5. Kim H., Son Y.B., Jeong J.-Y., Jo Y.-H. Hourly Observed Internal Waves by Geostationary Ocean Color Imagery in the East/Japan Sea // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2018. N 35. P. 609–617.

6. *Werdell P.J., McKinna L.I.W., Boss E., Ackleson S.G., Craig S.E., Gregg W.W., Lee Z., Maritorena S., Roesler C.S., Rouseaux C.S., Stramski D., Sullivan J.M., Twardowski M.S., Tzortziou M., Zhang X.* An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing. *Progress in Oceanography*. 2018, 160, 186–212.
7. *Su F.-C., Ho C.-R., Zheng Q., Kuo N.-J.* Estimating amplitudes of internal waves using satellite ocean colour imagery of the South China Sea // *International Journal of Remote Sensing*. 2008. V. 29, N 21. P. 6373–6380.
8. *Daniel T.L., Sung H.N., Steven D.M.* Tracking oceanic nonlinear internal waves in the Indonesian seas from geostationary orbit // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 208. P. 202–209.
9. *Навроцкий В.В.* Внутренние волны и тонкая структура в океане // Доклады АН СССР. 1976. 231:5. С. 1080–1083
10. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 5. С. 98–129.
11. *Mobley C.D.* Fast light calculations for ocean ecosystem and inverse models // *Optics express*. 2011. V. 19, N20. P. 18927–18944.
12. *Bricaud A. et al.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. 103(C13). P. 31033–31044.
13. *Morel A., Antoine D., Gentil B.* Bidirectional reflectance of oceanic waters: Accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function // *Applied Optics*. 2002. 41. P. 6289–6306.
14. *Lee Z.P., Carder K.L., Peacock T.G., Davis C.O., Mueller J.I.* Method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance // *Applied Optics*. 1996. V. 35. P. 453–462.
15. *Salyuk P.A., Stepankin I.E., Krikun V.A., Pavlov A.N.* Tuning of hyperspectral bio-optical algorithms in the Peter the Great Bay // *Proceedings of SPIE — The International Society For Optical Engineering*. 2010. V. 7857. P. 78570H-1–78570H-8.
16. *Mobley C.D., Gentili B., Gordon H.R., Jin Z., Kattawar G.W., Morel A., Reinert P., Stamnes K., Stavn R.H.* Comparison of numerical models for computing underwater light fields // *Applied Optics*. 1993. V. 32, N 36. P. 7484–7504.
17. *Новотрясов В.В., Захарков С.П., Степанов Д.В.* Осенний внутренний прилив в прибрежной зоне Японского моря // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 8. С. 64–69.
18. *Новотрясов В.В., Ляпидевский В.Ю., Павлова Е.П., Храпченков Ф.Ф.* Внутренние волны и перемешивание в шельфовой зоне моря // *Известия ТИНРО*. 2010. Т. 162. С. 324–337.
19. *Морозов Е.Г., Писарев С.В.* Внутренние волны и образование полыней в море Лаптевых // Доклады РАН. 2004. Т. 398, № 2. С. 255–258.
20. *Ярошук И.О., Леонтьев П., Кошелева А.В., Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Храпченков Ф.Ф., Швырев А.Н., Ярошук Е.И.* Экспериментальные исследования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря // *Подводные исследования и робототехника*. 2013. № 1(15). С. 37–44.
21. Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане. URL: <http://esimo.oceanography.ru/tides/index.php?endsea=9&station1=5> (дата обращения: 20.02.2018).
22. *Ярошук И.О., Леонтьев А.П., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Степанов Д.В., Швырев А.Н.* Об интенсивных внутренних волнах в прибрежной зоне залива Петра Великого (Японское море) // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 9. С. 55–62.
23. *Навроцкий В.В., Ляпидевский В.Ю., Павлова Е.П., Храпченков Ф.Ф.* Трансформация и эффекты внутренних волн в прибрежной зоне моря // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 2. С. 230–245.
24. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Shebertsov S.V., Evdoshenko M.A.* Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian seas // *Deep-Sea Research II* 51: 2004. P. 1063–1091.
25. *Ryu J., Han H., Cho S. et al.* Overview of geostationary ocean color imager (GOCI) and GOCI data processing system (GDPS) // *Ocean Science Journal*. 2012. 47. P. 223–233.
26. IOCCG (2012). Ocean-Colour Observations from a Geostationary Orbit. Antoine, D. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, N 12.
27. *Kim H., Son Y.B., Jeong J.-Y., Jo Y.-H.* Comparison of Internal Waves in Various Ocean Fields around the Korean Peninsula // *Journal of Coastal Research*. 2018. Special Issue N 85. P. 466–470.
28. *Биллюнас М.В., Доценко С.Ф.* Свободные внутренние волны в неоднородном течении с вертикальным сдвигом скорости // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 1. С. 3–16.
29. *Chassignet E.P., Hurlburt H.E., Metzger E.J., Smedstad O.M., Cummings J., Halliwell G.R., Bleck R., Baraille R., Wallcraft A.J., Lozano C.* US GODAE: Global Ocean Prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) // *Oceanography*. 2009. V. 22. P. 64–75.
30. *Madec G., and the NEMO team.* NEMO ocean engine. Note du Pole de modelisation // Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). 2008. France. N 27. P. 1288–1619.

## References

1. *Liu B., Yang H., Ding X., Li X.* Tracking the internal waves in the South China Sea with environmental satellite sun glint images. *Remote Sensing Letters*. 2014, 5, 7, 609–618.

2. Dubina V.A., Mitnik L.M. Internal waves in the Sea of Japan: spatio-temporal distribution and characteristics according to satellite remote sensing data. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 2007, 3, 37–46 (in Russian).
3. Liu A., Holbrook J., Apel J. Nonlinear Internal Wave Evolution in the Sulu Sea. *Journal of Physical Oceanography*. 1985, 15, 1613–1624.
4. Aleksanin A.I., Kim V. Automatic detection of internal waves on a satellite. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2015, 1, 44–52 (in Russian).
5. Kim H., Son Y.B., Jeong J.-Y., Jo Y.-H. Hourly Observed Internal Waves by Geostationary Ocean Color Imagery in the East/Japan Sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2018, 35, 609–617.
6. Werdell P.J., McKinna L.I.W., Boss E., Ackleson S.G., Craig S.E., Gregg W.W., Lee Z., Maritorena S., Roesler C.S., Rousseaux C.S., Stramski D., Sullivan J.M., Twardowski M.S., Tzortziou M., Zhang X. An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing. *Progress in Oceanography*. 2018, 160, 186–212.
7. Su F.-C., Ho C.-R., Zheng Q., Kuo N.-J. Estimating amplitudes of internal waves using satellite ocean colour imagery of the South China Sea. *International Journal of Remote Sensing*. 2008, 29, 21, 6373–6380.
8. Daniel T.L., Sung H.N., Steven D.M. Tracking oceanic nonlinear internal waves in the Indonesian seas from geostationary orbit. *Remote Sensing of Environment*. 2018, 208, 202–209.
9. Navrotsky V.V. Internal waves and fine structure in ocean. *Doklady AN SSSR*. 1976, 231:5, 1080–1083 (in Russian).
10. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Serebryany A.N. The study of hydrodynamic processes in the shelf zone based on satellite information and data from sub-satellite measurements. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2015, 12, 5, 98–129 (in Russian).
11. Mobley C.D. Fast light calculations for ocean ecosystem and inverse models. *Optics Express*. 2011, 19, 20, 18927–18944.
12. Bricaud A. et al. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998, 103(C13), 31033–31044.
13. Morel A., Antoine D., Gentil B. Bidirectional reflectance of oceanic waters: Accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function. *Applied Optics*. 2002, 41, 6289–6306.
14. Lee Z.P., Carder K.L., Peacock T.G., Davis C.O., Mueller J.I. Method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance. *Applied Optics*. 1996, 35, 453–462.
15. Salyuk P.A., Stepankin I.E., Krikun V.A., Pavlov A.N. Tuning of hyperspectral bio-optical algorithms in the Peter the Great Bay. *Proceedings of SPIE — The International Society For Optical Engineering*. 2010, 7857, 78570H-1–78570H-8.
16. Mobley C.D., Gentili B., Gordon H.R., Jin Z., Kattawar G.W., Morel A., Reinersman P., Stamnes K., Stavn R.H. Comparison of numerical models for computing underwater light fields. *Applied Optics*. 1993, 32, 36, 7484–7504.
17. Novotryasov V.V., Zakharkov S.P., Stepanov D.V. Internal tides in the coastal zone of the Sea of Japan in autumn. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2016, 41, 564–568.
18. Novotryasov V.V., Lyapidevsky V.Yu., Pavlova E.P., Khrapchenkov F.F. Internal waves and mixing in the shelf zone of the sea. *Izvestiya TINRO*. 2010, 162, 324–337 (in Russian).
19. Morozov E.G., Pisarev S.V. Internal waves and wormwood formation in the Laptev Sea. *Doklady' RAS*. 2004, 398, 2, 255–258 (in Russian).
20. Yaroshchuk I.O., Leontyev P., Kosheleva A.V., Samchenko A.N., Pivovarov A.A., Khrapchenkov F.F., Shvyrev A.N., Yaroshchuk E.I. Experimental studies of internal waves in the coastal zone of the Sea of Japan. *Podvodniye Issledovaniya i Robototekhnika*. 2013, 1 (15), 37–44 (in Russian).
21. The unified state system of information on the situation in the oceans. URL: <http://esimo.oceanography.ru/tides/index.php?endsea=9&station1=5> (date of access: 02/20/2018) (in Russian).
22. Yaroshchuk I.O., Leontyev A.P., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Stepanov D.V., Shvyrev A.N. On intense internal waves in the coastal zone Peter the Great Bay (Sea of Japan). *Meteorology and Hydrology*. 2016, 9, 55–62 (in Russian).
23. Navrotsky V.V., Liapidevskii V.Yu., Pavlova E.P., Khrapchenkov F.F. Transformation and effects of internal waves in the nearshore region of sea. *Journal of Oceanological Research*. 2019, 47, 2, 230–245.
24. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Shebertsov S.V., Evdoshenko M.A. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian seas. *Deep-Sea Research II* 51, 2004, 1063–1091.
25. Ryu J., Han H., Cho S. et al. Overview of geostationary ocean color imager (GOCI) and GOCI data processing system (GDPS). *Ocean Science Journal*. 2012, 47, 223–233.
26. IOCCG (2012). Ocean-Colour Observations from a Geostationary Orbit. Antoine, D. (ed.), *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group*, N12.
27. Kim H., Son Y.B., Jeong J.-Y., Jo Y.-H. Comparison of Internal Waves in Various Ocean Fields around the Korean Peninsula. *Journal of Coastal Research*. 2018, 85, 466–470.
28. Bilyunas M.V., Dotsenko S.F. Free internal waves in an inhomogeneous flow with a vertical velocity shift. *Morskoy Gidrofizicheskii Zhurnal*. 2012, 1, 3–16 (in Russian).
29. Chassignet E.P., Hurlburt H.E., Metzger E.J., Smedstad O.M., Cummings J., Halliwell G.R., Bleck R., Baraille R., Wallcraft A.J., Lozano C. US GODAE: Global Ocean Prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). *Oceanography*. 2009, 22, 64–75.
30. Madec G., and the NEMO team. NEMO ocean engine. Note du Pole de modelisation. *Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)*. 2008, France, 27, 1288–1619.