

УДК 528.8:551.46.0

**О ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ С БОРТА МКС
РАЗЛИЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ОКЕАНЕ ПО ПРОЯВЛЕНИЯМ
НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

В.Н. Носов, С.Г. Иванов, Т.В. Глебова, Д.В. Матвеев,
А.В. Кошенко, В.В. Коротких, В.И. Тимонин, С.Б. Каледин,
А.А. Долотова, О.Г. Константинов

Докт. техн. наук В.Н. Носов; канд. физ.-мат. наук С.Г. Иванов;
Т.В. Глебова (ФГБУН ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского)
Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации
космонавт-испытатель Д.В. Матвеев; А.В. Кошенко; В.В. Коротких
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)
Докт. физ.-мат. наук В.И. Тимонин; канд. техн. наук С.Б. Каледин;
А.А. Долотова (ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»)
Канд. физ.-мат. наук О.Г. Константинов (ТОИ ДВО РАН)

Рассмотрена возможность проведения исследований гидродинамических явлений, происходящих в толще морской среды, с борта РС МКС с помощью цифровой фоторегистрации. К таким явлениям относятся течения, вихри, внутренние волны (ВВ), цунами, области обтекания рельефа дна в шельфовой зоне, а также корабельные следы, зоны обтекания подводных сооружений (трубопроводов, опор платформ), участки разлива нефтепродуктов и т. п. Приведены результаты исследования с борта МКС с помощью цифровой фотографии гидродинамических возмущений в виде следа судна и внутренних волн. Представлены возможности разработанных алгоритмов и программного обеспечения для выявления на снимках слабоконтрастных изображений проявлений указанных гидродинамических возмущений с минимизацией времени обработки снимков.

Ключевые слова: гидродинамические явления, морская поверхность, МКС, фоторегистрация следа судна, методы идентификации аномалий в виде следа судна

**On the Possibility of Photographing Various Ocean Events on the
Sea Surface From the ISS. V.N. Nosov, S.G. Ivanov, T.V. Glebova,
D.V. Matveev, A.V. Koshenko, V.V. Korotkikh, V.I. Timonin,
S.B. Kaledin, A.A. Dolotova, O.G. Konstantinov**

The possibility of conducting research on hydrodynamic phenomena occurring in the marine environment using digital photo registration from the Russian Segment of the ISS is considered. Such phenomena include currents, vortices, internal waves (IW), tsunamis, areas of flow around the bottom relief in the shelf zone, as well as ship tracks, areas of flow around underwater structures (pipelines, platform supports), areas of oil spill, etc. The results of the study from the ISS using digital photography of hydrodynamic disturbances in the form of a ship track and internal waves are provided. This paper presents the capabilities of the

developed algorithms and software for detecting low-contrast images of these hydrodynamic disturbances in the images, while minimizing the processing time.

Keywords: hydrodynamic phenomena, sea surface, ISS, photographic registration of a ship's wake, methods for identifying wake anomalies

Для океанологии представляют значительный интерес гидродинамические явления, происходящие в толще морской среды. К этим явлениям относятся такие природные явления, как течения, вихри, ВВ, цунами, области обтекания рельефа дна в шельфовой зоне. К техногенным явлениям относятся: корабельные следы, зоны обтекания подводных сооружений (трубопроводов, опор платформ), участки разлива нефтепродуктов и т. п.

При этом происходят изменения характеристик морской поверхности – могут изменяться как спектры морского волнения, так и параметры пленок поверхностно-активных веществ, часто присутствующих на поверхности моря [1]. Также под воздействием гидродинамических явлений могут изменяться параметры приповерхностных слоев морской среды. В основном это изменение стратификации по глубине минеральной и органической взвеси. Все эти изменения могут быть зарегистрированы с помощью цифровой фотографии и спектрорадиометров (видеоспектрометров) [2–6]. Для ряда случаев возможно применение радиолокационных методов [7]. С учетом пространственных масштабов гидродинамических явлений аппаратуру необходимо размещать на авиационных или космических носителях. При этом применение радиолокационных методов зачастую ограничено их высоким энергопотреблением и избирательностью в величине сигнала при сравнимости длины волны зондирующего излучения и пространственного масштаба морского волнения.

Наиболее привлекательным с точки зрения производительности зондирования акваторий является использование дистанционных методов с космических носителей. Особенно целесообразно использование космических носителей при исследовании гидродинамических явлений, имеющих нестационарный во времени характер (со «временем жизни» до нескольких часов) и обладающих пространственным масштабом порядка нескольких десятков километров. Для таких гидродинамических явлений использование регистрирующей аппаратуры с борта судна и вовсе нецелесообразно из-за сопоставимости скорости исследовательского судна (порядка 4–5 м/сек) и скорости, например ВВ, которая может достигать нескольких м/сек.

Для исследования возможностей цифровой фототехники по регистрации с борта МКС проявлений гидродинамических явлений на морской поверхности в качестве объекта использовалосьдвигающееся судно, являющееся источником как волновых, так и турбулентных возмущений морской среды. Его след на морской поверхности достаточно хорошо изучен и может быть использован в качестве модельного возмущения [3, 8].

Как правило, на фотоснимках проявления различных гидродинамических явлений на морской поверхности представляют собой слабоконтрастные изображения. Для выделения этих изображений необходимы специальные

алгоритмы и соответствующее программное обеспечение, которые необходимо разрабатывать. Кроме того, для увеличения контраста изображений представляет интерес исследование возможности использования особенностей спектральных и поляризационных характеристик, падающего на морскую поверхность и отраженного излучения Солнца, а также выполнение снимков в условиях солнечного блика. [9, 10].

Корректная интерпретация полученных результатов и уточнение теоретических представлений о проявлениях гидродинамических явлений на морской поверхности, необходимых для разработки алгоритмов обработки сигналов измерительной аппаратуры, возможны только при проведении синхронных с измерениями из космоса подспутниковых измерений. Подспутниковые измерения должны включать в себя регистрацию гидро- и метеорологических параметров в районе выполнения космических экспериментов, а также регистрацию изменений характеристик морской поверхности и приповерхностных слоев морской среды, возникающих под действием гидродинамических явлений. Последнее может быть выполнено с помощью размещаемой на судне или авианосителе лазерно-оптической аппаратуры, например, в виде сканирующего лазерного локатора (для исследования характеристик морской поверхности) и фотометра яркости моря (для исследования оптических характеристик приповерхностных слоев морской среды). Однако подобного рода исследования являются пока достаточно сложной задачей. Поэтому проведение морского космического эксперимента в контролируемых условиях целесообразно проводить с борта обитаемого космического носителя – МКС. При этом для определения космонавтами-операторами акватории, на которой проходят исследования, на морской поверхности необходимо наличие маркеров, позволяющих космонавту выполнять пространственную привязку. В качестве таких маркеров могут быть использованы судно, дымовые следы на нем или рельеф береговой линии, если морской полигон расположен недалеко от берега.

Для оценки возможности использования фоторегистрации с борта МКС различных явлений в океане по проявлениям на морской поверхности нами были использованы известные материалы из различных публикаций в Интернете, результаты натурных экспериментов, проведенных ранее ГЕОХИ РАН в рамках темы «Экон-М», а также данные последних фотосъемок с борта МКС. Последние натурные фотографии с борта МКС были выполнены на морском полигоне в районе бухты Витязь на Дальнем востоке. Данный район был выбран как наиболее перспективный для изучения проявлений ВВ на морской поверхности. Кроме того, в этом районе, на мысе Шульца, располагается научная база ТОИ ДВО РАН, участвующего в проведении настоящих исследований. Это позволяет проводить натурные прибрежные наблюдения термогирлянд видеоаппаратурой ТОИ ДВО РАН, а в ближайшей перспективе и регистрацию исследуемых явлений с помощью лазерно-оптической аппаратуры ГЕОХИ РАН с борта беспилотных авиационных носителей.

1. Космический эксперимент со следом судна на морской поверхности

1.1. Теоретические представления гидродинамических проявлений следа судна на морской поверхности

Гидродинамический след судна в зависимости от тоннажа и обводов судна, а также бальности волнения может занимать площадь на морской акватории в десятки и сотни квадратных километров. Судно при своем движении расходует энергию на преодоление сопротивления воды. При этом образуются вихри в турбулентном следе, и происходит генерация поверхностных (корабельных) волн. Корабельные волны разделяются на поперечные и расходящиеся, что соответствует наблюдениям за внешним проявлением волнообразования при движении судна. В непосредственной близости от корпуса судна разделение корабельных волн на поперечные и расходящиеся весьма условно, однако оно вполне справедливо при рассмотрении особенностей распространения волн на большом удалении от корпуса, где поперечные волны ведут себя как вынужденные, а расходящиеся – как свободные, с ярким проявлением особенностей их групповой структуры. Для судна длина кильватерного следа может достигать тысячи и более метров. Ширина следа увеличивается по мере удаления от кормы судна.

На рис. 1 представлены соответственно усредненная схема и фотография поверхностного следа судна.

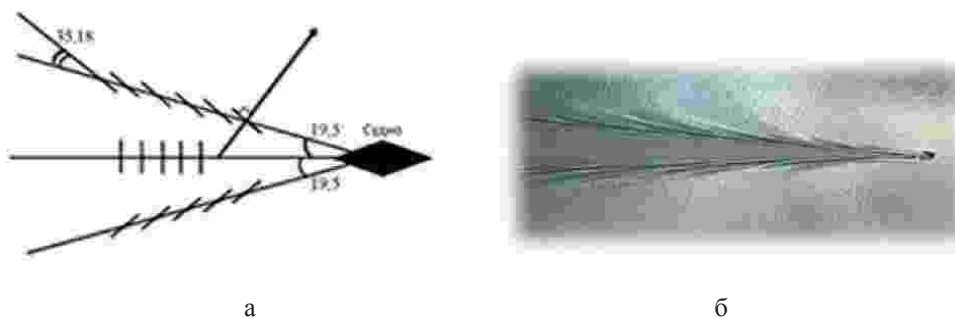


Рис. 1. Поверхностный след судна: а – схема; б – фотография

1.2 Фотографии следа судна на морской поверхности

Ниже приведены фотографии характерных следов судна, полученных ранее ГЕОХИ РАН с борта судна и с борта российского сегмента (РС) МКС во время проведения космического эксперимента «Экон-М» [3]. В ходе космического эксперимента с борта РС МКС выполнялось фотографирование следа судна СР-59, имеющего водоизмещение 2100 т, длину 69 м, ширину 14 м, глубину осадки около 4 м и скорость хода около 8 узлов. Также

с помощью макетов лазерно-оптической аппаратуры, разработанной в ГЕОХИ РАН, выполнялись подспутниковые измерения характеристик морской поверхности (с помощью судового сканирующего лазерного локатора) и приповерхностных слоев морской среды и атмосферы (с помощью фотометра яркости моря и аэрозольного лидара). На рис. 2 представлена фотография следа судна СР-59, выполненная с его борта 07.07.2014 (отчетливо видны турбулентная и волновая части следа).



Рис. 2. След судна

На рис. 3 приведен характерный снимок следа судна, полученный с борта РС МКС. Снимок получен в оптимальных условиях освещенности, настроек фотокамеры и волнения моря не более 3 баллов. На фотографии можно четко наблюдать характерный V-образный вид следа судна.

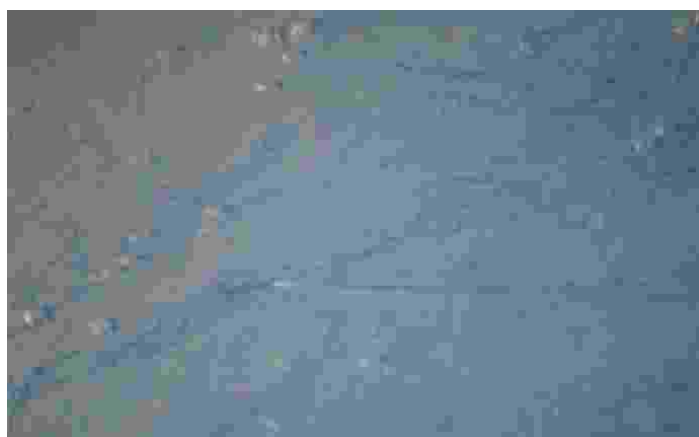


Рис. 3. Снимок судна и его следа с борта РС МКС

Источник: www.roscosmos.ru

Выполненные исследования показали, что полученные с борта РС МКС снимки следа судна представляют собой слабоконтрастные изображения, которые необходимо выделять для увеличения контраста изображений с помощью специальных алгоритмов и соответствующего программного обеспечения.

1.3 Метод идентификации аномалий в виде следа судна на космических снимках морской поверхности

В работах [11, 12] был предложен метод идентификации следа судна, основанный на анализе изменений корреляционных характеристик между градиентами (скоростями) изменения цветов (R, G, B) в различных β -направлениях на фрагментах снимков морской поверхности.

Обозначим $\Omega = \{\omega\}$ – множество размера $M \times N$ пикселей анализируемой фотографии (M – количество столбцов, N – количество строк в цифровом представлении фотографии). Каждому пикселю можно сопоставить его координаты $\omega = \omega(x, y)$, $x = 1, 2, \dots, M$; $y = 1, 2, \dots, N$. Здесь x, y – номера столбца и строки соответственно, в которых расположен пиксель. Таким образом на фотографиях вводится естественная система целочисленных координат.

Каждому пикселю $\omega(x, y)$ соответствует вектор $(R(\omega(x, y)), G(\omega(x, y)), B(\omega(x, y)))$ из интенсивностей красного, зеленого и голубого цветов. Для краткости в дальнейшем будем обозначать этот вектор как $\vec{V}(x, y) = (R(x, y), G(x, y), B(x, y))$.

Пусть $u(x, y) = \varphi(\vec{V}(x, y))$ – некоторый скалярный функционал от $\vec{V}(x, y)$. Это может быть, например, одна из координат вектора $\vec{V}(x, y)$, разность между его двумя координатами и другие величины.

Назовем разность $\Delta u(x, y) = u(x + \Delta x, y + \Delta y) - u(x, y)$ – градиентом в направлении вектора $\vec{\Delta} = (\Delta x, \Delta y)$, $\Delta x, \Delta y$ – целые числа. Углы, которые образуют векторы $\vec{\Delta}$ с горизонтальной осью, будем обозначать буквами α, β . Например, если $\Delta x = \Delta y = 1$, то $\alpha = 45^\circ$; если $\Delta x = -1, \Delta y = 2$, то $\alpha \approx 116^\circ$. В дальнейшем зависимость градиента от угла обозначается $\Delta u_\alpha(x, y)$.

На рис. 4 показаны направления и соответствующие им приближенные значения углов, которые применялись при расчетах в данной работе (указаны направления, для которых $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$). Для выпуклых углов использовались значения $206^\circ, 225^\circ, \dots, 334^\circ$.

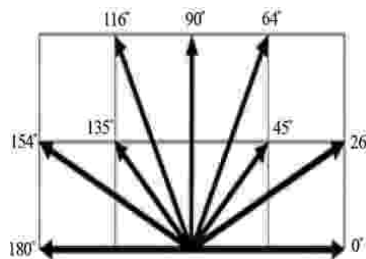


Рис. 4. Направления, по которым вычисляются градиенты цветов

Пусть зафиксированы два направления с углами α, β . Рассмотрим фрагмент фотографии – множество пикселей $\sigma_h(x_0, y_0) = \{\omega(x, y) : x_0 - h \leq x \leq x_0 + h, y_0 - h \leq y \leq y_0 + h\}$ – квадрат со стороной $(2h+1)$. Всего пикселей в фрагменте – $(2h+1)^2$. Для каждого $\omega \in \sigma_h(x_0, y_0)$ вычисляется вектор $\Delta u_\alpha(x, y), \Delta u_\beta(x, y)$ и по их совокупности по стандартным формулам определяется «коэффициент корреляции» $r_\sigma(\alpha, \beta)$ между градиентами $\Delta u_\alpha, \Delta u_\beta$. После этого пиксель $\omega(x_0, y_0)$ окрашивается в цвет, соответствующий значению $r_\sigma(\alpha, \beta)$, согласно некоторой выбранной цветовой шкале для отрезка $[-1; 1]$. Если провести такие расчеты для всех возможных фрагментов снимка одинакового размера, то вместо исходной фотографии будет получено ее корреляционное представление (картина или карта) для функционала $u(x, y) = \varphi(\vec{V}(x, y))$. Уточним, что для всех последующих примеров обработки фотографий в качестве функционала выбиралась интенсивность голубого цвета $u(x, y) = B(x, y)$. Также символом $r(\alpha, \beta)$ обозначается совокупность значений $r_\sigma(\alpha, \beta)$ для всех обработанных фрагментов.

В источниках [12, 13] было показано, что в зависимости от выбранных направлений (α, β) коэффициенты корреляции между градиентами $(\Delta B_\alpha, \Delta B_\beta)$ на фрагментах снимков, содержащих в себе продольные или поперечные волны следа судна, значительно отличаются от аналогичных корреляций в тех же направлениях на фоновых фрагментах снимка. В методе для каждого скользящего (с некоторым шагом τ) по снимку фрагмента вычисляются указанные коэффициенты корреляций, а затем геометрическая конфигурация совокупности фрагментов с одинаковыми экстремальными корреляциями проверяется на соответствие конфигурации, соответствующей предполагаемому явлению (следу судна). Кроме того, в источнике [13] предложена процедура выбора возможных направлений, позволяющая уменьшить объем вычислений, необходимых для идентификации следа. На рис. 5 представлены исходные снимки, которые подвергались обработке по разработанным алгоритмам.

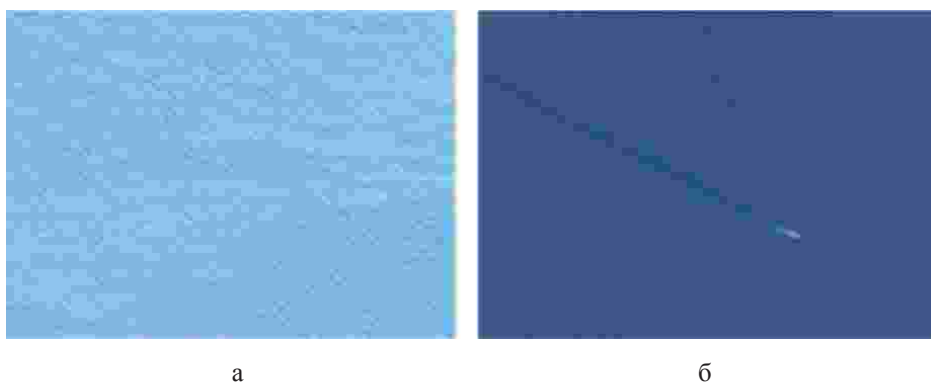
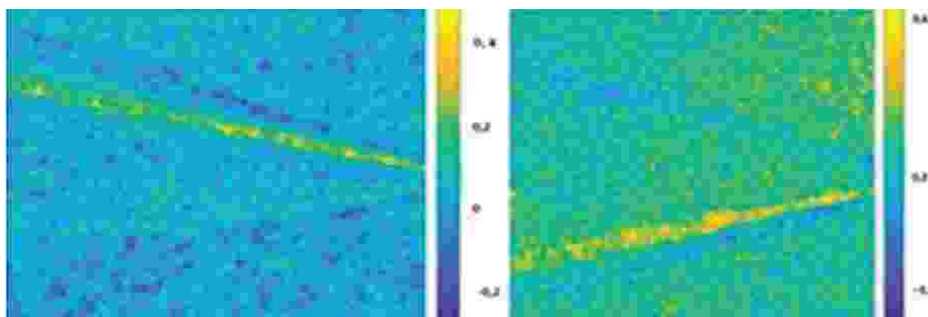


Рис. 5. Тестируемые снимки морской поверхности

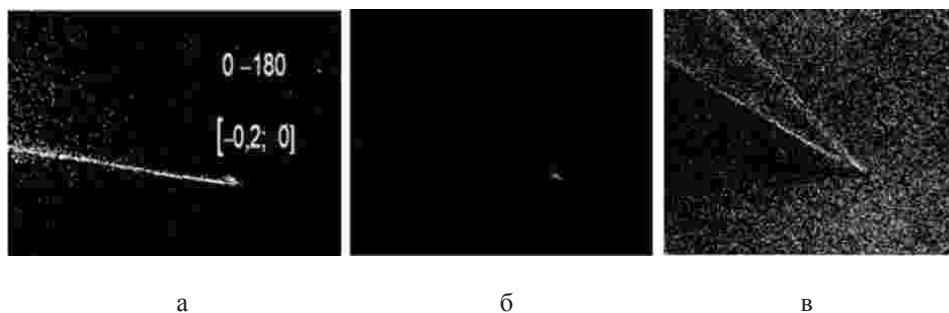


а б
Рис. 6. Корреляционные картины снимка 5, а:
 $a - r(26,206)$; $б - r(116,296)$

Для слабоконтрастных снимков морской поверхности метод не всегда дает удовлетворительные результаты. На снимке 5, б не удается достоверно обнаруживать левый боковой след судна. Была применена следующая модификация корреляционной картины снимка. Вычислялись следующие величины:

$$r^0(\alpha, \beta) = \begin{cases} r(\alpha, \beta), & a < r(\alpha, \beta) < b \\ 0, & r(\alpha, \beta) < a \text{ или } r(\alpha, \beta) > b \end{cases}$$

Такие картины называются бинарными. На рис. 7 показаны три бинарные корреляционные картины рисунка 5, б для $(\alpha, \beta) = (0,180)$ и $(\alpha, \beta) = (154,334)$. Для корреляций $r^0(154, 334)$, $[a, b] = [0,4; 0,6]$ на рис. 7, в четко идентифицируются левый боковой и турбулентный составляющие следа судна. Для $r^0(0,180)$, $[a, b] = [-0,2; 0]$ на рис. 7, а идентифицируется правый боковой след судна. Для $r^0(0,180)$, $[a, b] = [0,4; 0,6]$ на рис. 7, б идентифицируется только само судно.



а б в
Рис. 7. Корреляционные картины снимка 5, б:
 $а, б - r^0(0,180)$; $в - r^0(154, 334)$

1.4. След быстроходного катера

Для специальных задач представляет интерес след быстроходных безэкипажных катеров и возможность их регистрации из космоса. На рис. 8 приведены их характерные следы, полученные с близкого расстояния.

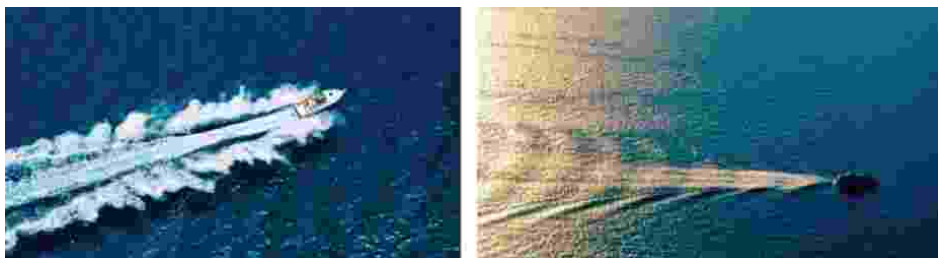


Рис. 8. Следы быстроходных катеров

Приведенные фотографии свидетельствуют о том, что след судна, идущего с небольшой скоростью (6–14 узлов), значительно отличается от следа быстроходного судна типа беспилотного катера, в котором имеется сильно развитая турбулентная часть. Это требует создания особых алгоритмов обработки снимков следов от быстроходных катеров.

Следы быстроходных катеров (лодок), полученные из космоса, можно наблюдать на фото, представленном на рис. 9.

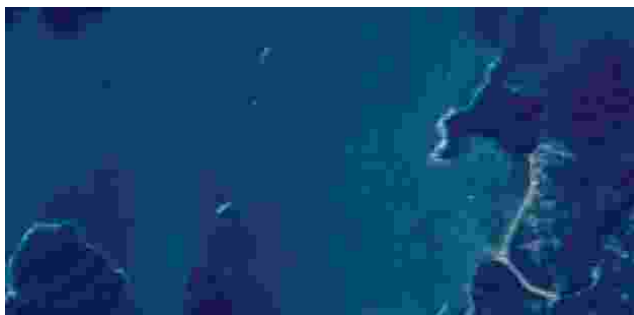


Рис. 9. Район бухты Витязь

Снимок получен с борта РС МКС 04.08.2025 в районе бухты Витязь на Дальнем Востоке экипажем 73-й экспедиции в составе космонавтов Роскосмоса С. Рыжикова (командир) и А. Зубрицкого. Использована фотокамера Nikon Z 9 и объектив с фокусным расстоянием 1000 мм. Основные настройки фотокамеры: диафрагма – $f/7.1$; выдержка – $1/1250$ с; ISO 400. Высота Солнца над горизонтом составляла $32,8^\circ$. Азимут траектории МКС был равным $28,8^\circ$ ССВ. Дальность на траверзе составляла 507 км.

Для увеличения пространственного разрешения снимка следовало бы уменьшить выдержку до $1/2000$ – $1/4000$ с, что уменьшило бы «смаз»

изображения за счет движения МКС. При этом целесообразно увеличить диафрагму и ISO для компенсации уменьшения освещенности матрицы фотокамеры.

Использованные настройки фотокамеры можно считать оптимальными.

В качестве примера применения рассмотренного выше алгоритма на рис. 10 показан фрагмент рисунка 9, содержащий быстроходные катера и их следы на водной поверхности (10, *а*). На рис. 10, *б* приведена его корреляционная картина для $r(135; 315)$, на которой четко выделяются местоположения этих катеров.

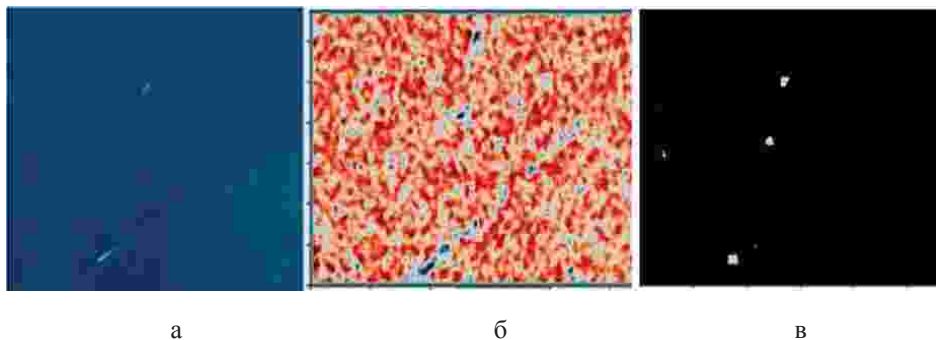


Рис. 10. Фрагмент рис. 9:

а, б – корреляционная карта фрагмента; *в* – кластер с выделенными быстроходными катерами

Заметим, что имеет значение автоматизация выделения следа судна или самого судна, не требующая визуального контроля результатов обработки. Одним из возможных способов решения этой задачи является применение методов кластерного анализа, разбивающего множество объектов на некоторое количество кластеров (таксонов) в соответствии с некоторым критерием «схожести» между ними. В качестве множества, разбиваемого на кластеры, можно рассматривать множество значений $r(\alpha; \beta)$, вычисленного в каждой точке снимка (для каждого пикселя). Другими более сложными множествами могут являться векторы $\vec{r}(\alpha; \beta) = (r_R(\alpha, \beta); r_G(\alpha, \beta); r_B(\alpha, \beta))$ из корреляций градиентов всех интенсивностей цветов (R, G, B) в направлениях $(\alpha; \beta)$. На рис. 10, *в* показан кластер (области белого цвета), полученный в результате обработки множества значений корреляций $r(135; 315)$ градиентов голубого цвета B , полученный методом « k – средних» [13]. Общее число кластеров разбиения в алгоритме – 10. Кластер полностью соответствует лодкам, имеющимся на снимке.

Применение разрабатываемых алгоритмов и программного обеспечения должно увеличить контраст наблюдаемых слабозаметных следов быстроходных катеров (лодок) на значительном удалении от них.

2. Внутренние волны

ВВ представляют собой интерес для океанологии как с фундаментальной точки зрения, так и для специальных задач, выступая в качестве модельных возмущений. ВВ возникают при движении водных масс, например, при приливах, когда в рельефе дна имеются резкие перепады глубин или когда имеется термоклин в приповерхностных слоях морской среды. Места в Мировом океане, где можно наблюдать ВВ, достаточно хорошо известны. К ним относятся, например, Гибралтарский пролив и бухта Витязь на Дальнем Востоке.

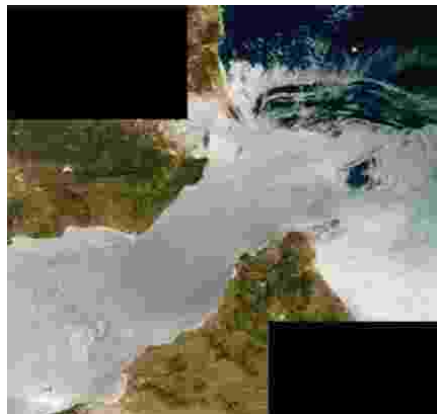
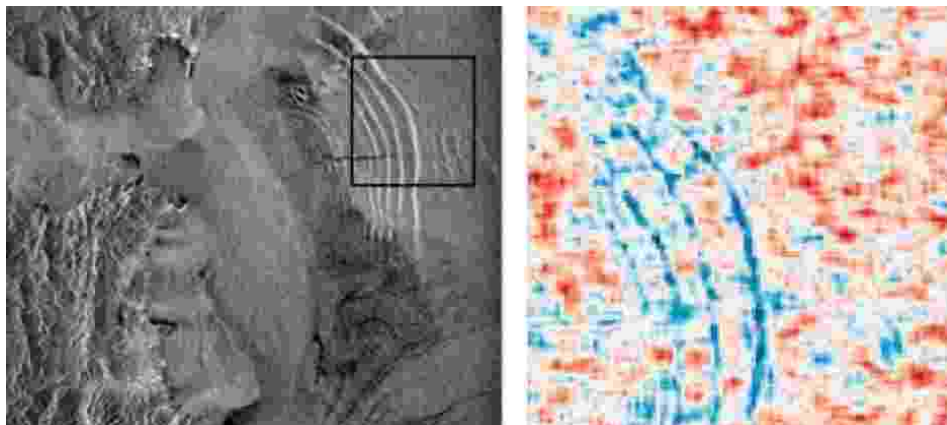


Рис. 11. Гибралтарский пролив
 Источник: www.roscosmos.ru

На рис. 11 приведено спутниковое изображение Гибралтарского пролива, а на рис. 12, *а* – радиолокационное, сделанные во время прохождения через него ВВ. Длина пролива составляет 59 км.

На рис. 12, *а* отчетливо видны ВВ в его правой части, относящейся к Средиземному морю, юго-восточнее бухты Альхесирас (размеры бухты примерно 8×10 км). Расстояние между гребнями ВВ может быть оценено величиной 2–3 км и менее. На рис. 12, *б* показан выделенный на рис. 12, *а* фрагмент в виде его полной корреляционной карты при $r(64; 244)$.



а

б

Рис. 12. Изображение корреляционной карты:

а – ВВ в Гибралтарском проливе на РЛИ ERS-1; *б* – корреляционная карта выделенного фрагмента на рис. 12, *а*. Источник: © ESA

2.1. Анализ снимков морской поверхности вблизи бухты Витязь с борта МКС

Представленные ниже снимки морской поверхности выполнены в августе 2025 г. с борта РС МКС в районе бухты Витязь на Дальнем Востоке вышеупомянутыми членами 73-й экспедиции. Из-за значительного перепада глубин дна на расстоянии около 23 км от бухты Витязь часто возникают ВВ, связанные с приливом [14–16]. Район считается полигоном для изучения ВВ.

2.1.1. Снимки во всем видимом диапазоне в районе бухты Витязь

В данном разделе представлены снимки морской поверхности без использования каких-либо оптических фильтров, выделяющих определенный спектральный диапазон. На рис. 13 представлено наиболее удачное фото в районе бухты Витязь, выполненное 04.08.2025 с борта РС МКС (фотокамера Nikon Z 9: кадр _91R8502; фокус – 1000 мм; диафрагма – f/7.1; выдержка – 1/2000 с; ISO 400; высота Солнца – 62.8°; азимут траектории МКС – 330.4° ССЗ; дальность на траверзе – 502 км). На рис. 13.1–13.5 представлены фрагменты этого фото.

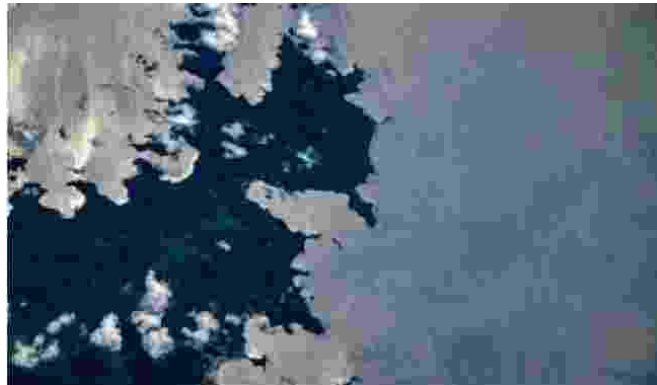


Рис. 13. Бухта Витязь



Рис. 13.1. Фрагмент 1



Рис. 13.2. Фрагмент 2 (в области солнечного блика)

В левой части рис. 13 часть морской поверхности видна в области солнечного блика. Этот фрагмент представлен на рис. 13.3.

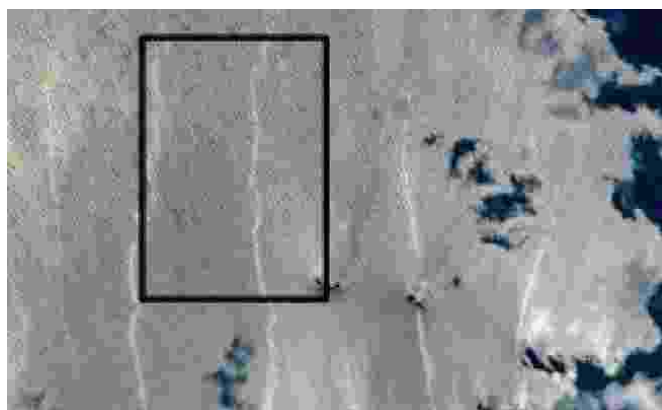


Рис. 13.3. Фрагмент 3 (в области солнечного блика крупно)

Для данных параметров объектива и выдержки пространственное разрешение снимка _91R8502 может быть оценено величиной 6 м. Используя размеры бухты Витязь ($2,9 \times 1,5$ км), можно оценить на приведенных фрагментах кадра расстояния и пространственные периоды волнения. Кроме волн с периодом около 24 м, покрывающих всю морскую поверхность, на рис. 13.3 видны 4 яркие полосы, представляющие собой, по всей видимости, зеркальное отражение солнечных лучей от сликов на морской поверхности.

Расстояние между полосами 700–900 м. Эти полосы могут быть отнесены к проявлениям ВВ на морской поверхности. Темные области в виде пятен в зоне солнечного блика представляют собой тени от облаков.

На рис. 13.3 в верхней левой части выделен фрагмент, который был обработан описанным выше алгоритмом. Результаты обработки приведены на рис. 13.4.

На полной корреляционной карте (рис. 13.4, *a*) синим и белым цветами выделяются следы проявления ВВ, что соответствует небольшим по модулю значениям отрицательных корреляций (согласно приведенной рядом шкале). По этой причине бинарная корреляционная карта наилучшим образом выделяет ВВ для интервала корреляций $[-0,35; -0,3]$ – рис. 13.4, *б*. Следует отметить, что проявления ВВ менее ярко выражены на корреляционных картах по сравнению с проявлениями следов от технических морских объектов (судов и катеров). По всей видимости, необходимо использовать для их идентификации более чувствительные показатели состояния морской поверхности в видимом спектре – главные компоненты градиентов всех цветов (R, G, B), корреляции между градиентами разных цветов и др.

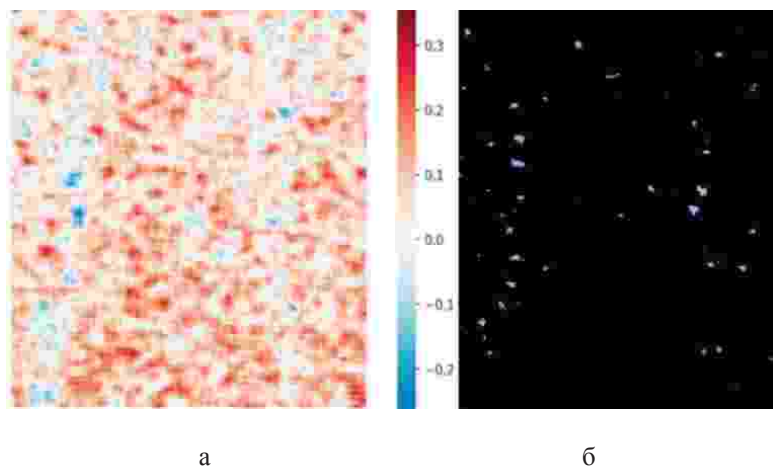


Рис. 13.4. Корреляционная карта выделенного фрагмента рис. 13.3:
a – для $r(154, 334)$; *б* – бинарная корреляционная карта фрагмента для $r^o(154, 334)$,
 $[a, b] = [-0,35; -0,3]$

Дальше в море от бухты Витязь на расстоянии около 4,5 км от бухты, в верхней части кадра _91R8502 наблюдаются темные полосы (рис. 13.5).



Рис. 13.5. Фрагмент 4 (в области проявления сликов)

По всей видимости, наблюдаемые темные полосы представляют собой структуры, которые могут быть связаны как с проявлением на морской поверхности ВВ, так и с наличием пленок биологических веществ. На снимке полосы расположены перпендикулярно волнам с периодом около 24 м. Определить пространственный период снимков визуальным способом по фотоснимку оказывается достаточно затруднительно из-за разброса данных по расстояниям между полосами.

2.1.2. Снимки в красной области спектра вблизи бухты Витязь (в бухте Врангеля)

С учетом спектральных характеристик восходящего из моря излучения и отраженного морской поверхностью излучения неба можно ожидать увеличения контраста изображений волновых структур на морской поверхности в красной области спектра, когда отраженное морской поверхностью излучение неба превышает выходящее из моря излучение. Однако выполненные с борта РС МКС снимки морской поверхности в области длин волн 720 нм, оказались бесструктурными и довольно темными из-за недостаточной экспозиции, вызванной уменьшением мощности излучения, идущего от моря в области длин волн 720 нм, и небольшой спектральной ширины использованного интерференционного светофильтра.

Снимки были выполнены в районе бухты Врангеля на Дальнем Востоке 04.08.2025 в 7:26 UTC фотокамерой Nikon D4 (диафрагма – $f/5.6$; выдержка – $1/1000$ с; ISO 400), использовался объектив с фокусным расстоянием 400 мм. Размер кадра на морской поверхности составлял 26×40 км. Пространственное разрешение снимков оценивается величиной 14 м.

Для увеличения светового потока, падающего на матрицу фотокамеры, следует перейти в область длин волн 600–640 нм, где выходящее из моря излучение больше, чем в области 720 нм, но при этом на порядок меньше, чем в зеленой области спектра. Также возможно использование более широкополосных интерференционных светофильтров или набора фильтров из цветного оптического стекла. Другой возможностью является программная обработка кадра, при которой для построения изображения используются только R-пиксели (красные пиксели, имеющие максимальную чувствительность в области 580–630 нм).

3. Использование солнечного блика для увеличения контраста изображений проявлений различных гидродинамических возмущений на морской поверхности

Для увеличения контраста изображений проявлений гидродинамических явлений на морской поверхности может быть использован солнечный блик, когда область съемки находится вблизи солнечного блика или на его периферии. Ниже (рис. 14) представлена серия фотографий, сделанных с борта

РС МКС 27.04.2015 во время первого сеанса космического эксперимента «Экон-М» с помощью фотокамеры с короткофокусным объективом (фотокамера Nikon D3S: фокус камеры – $f' = 24$ мм; выдержка – $1/160$ с; ISO – Auto (200); диафрагма – $f/11$). На серии снимков видно неизвестное судно и перемещающийся солнечный блик. Вне зоны солнечного блика (верхний левый кадр) следа судна не видно, когда же блик начинает «наползать» на след судна, волновая и турбулентная части следа начинают проявляться на фотографии (нижний правый кадр).



Рис. 14. Снимок следа судна в условиях солнечного блика на морской поверхности. Волнение 0–1 балл, диаметр блика на морской поверхности – около 300 км

4. Использование поляризации для увеличения контраста изображений волновых структур на морской поверхности

Другая возможность увеличения контраста изображений волновых структур на морской поверхности с борта МКС связана с использованием поляризации света, идущего от морской поверхности. При определенных углах между направлением солнечных лучей, освещающих акваторию, и осью визирования фотокамеры (около 106° – двойной угол Брюстера) установка поляризатора определенной ориентации на объектив камеры позволяет подавить излучение, идущее из морской толщи и выделить только отраженное от морской поверхности излучение. Контраст изображения волновых структур на морской поверхности должен при этом увеличиться. Это продемонстрировано в работах [16, 17], где регистрировались структуры на морской поверхности от ВВ с использованием поляризаторов, установленных на объектив видеокамеры. Фотографирование выполнялось с берега в бухте Витязь и рядом с ней для почти настильных углов визирования. Такой способ регистрации волновых структур на морской поверхности подходит для выполнения

подспутниковых измерений. Использование поляризации на МКС может быть затруднено. Это связано с ограниченными размерами иллюминатора, через который ведется фотографирование, и с увеличением расстояния до места фотографирования на морской поверхности из-за больших углов визирования (около 530 от вертикали), что может ухудшать разрешение на снимках, особенно при наличии дымки в атмосфере.

Выводы

На основе результатов проведенного космического эксперимента и выполненного ранее космического эксперимента «Экон-М» проведен анализ возможностей использования МКС для фотографической регистрации проявлений на морской поверхности гидродинамических явлений, происходящих в толще морской среды. В качестве исследуемых гидродинамических явлений использованы след судна и ВВ. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности исследования таких гидродинамических явлений с борта МКС. Эти возможности существенно расширяются при использовании разработанных алгоритмов и программного обеспечения для выделения слабоконтрастных изображений на полученных снимках, отвечающих проявлениям гидродинамических явлений на морской поверхности.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что следы от быстроходных судов малого водоизмещения сильно отличаются от обычных корабельных следов, что может быть использовано при разработке алгоритмов обработки фотоснимков и соответствующего программного обеспечения. Отмечена целесообразность использования МКС для регистрации гидродинамических явлений, имеющих нестационарный во времени характер (со «временем жизни» до нескольких часов) и обладающих пространственным масштабом порядка нескольких десятков километров. Обсуждены возможности повышения контраста изображений проявлений гидродинамических явлений на снимках с борта МКС за счет использования спектральных и поляризационных характеристик выходящего из толщи моря излучения, а также съемки в условиях солнечного блика. Приведена оценка пространственного разрешения цифровых фотокамер, расположенных на борту МКС. В целом представленный материал по использованию РС МКС для регистрации гидродинамических явлений, обладая новизной, является основой для более глубоких экспериментальных исследований и теоретических оценок.

Область применения результатов выполненных исследований – оперативная океанология (теоретическое описание гидродинамических явлений, происходящих в толще морской среды, методы и аппаратура).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптика океана: в 2 т. Т. 2: Прикладная оптика океана / АН СССР. Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова; отв. ред. А.С. Монин. – Москва: Наука, 1983. – 236 с.

2. Океанология: средства и методы океанологических исследований / Г.В. Смирнов, В.Н. Еремеев, М.Д. Агеев [и др.]; Междунар. Ассое. Академии Наук; РАН; Нац. Академия Наук Украины. – Москва: Наука, 2005. – 795 с.
3. Совместный космический и морской эксперимент по комплексной регистрации следа судна с использованием подспутниковых измерений / В.Н. Носов, С.Г. Иванов, В.И. Тимонин, А.Л. Подгребенков [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 34–35.
4. Исследование спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн по спутниковым и контактными данным / В.Г. Бондур, В.А. Дулов, А.Б. Мурынин, Ю.Ю. Юровский // *Исследование Земли из космоса*. – 2016. – № 1–2. – С. 7–24.
5. Observation of Oceanic Internal and Surface Waves from the Earth Resources Technology Satellite / J.R. Apel, H.M. Byrne, J.R. Proni, R.L. Charnell // *J. Geophysical Research*. – 1975. – Vol. 80. – P. 865–881.
6. Особенности динамики вод и распределения хлорофилла «а» в северо-восточной части Черного моря осенью 1997 г. / А.И. Гинзбург, А.Г. Костяной, В.Г. Кривошея, Н.П. Незлин [и др.] // *Океанология*. – 2000. – Т. 40, № 3. – С. 344–356.
7. Рис, У. Основы дистанционного зондирования. – Москва: Техносфера, 2006. – 335 с.
8. The Spectral Reflectance of Ship Wakes Between 400 and 900 Nanometers / R. Wright, J. Deloatch, S. Osgood, J. Yuan // *IGARSS*. – 2012. – P. 4186–4189.
9. Breon, F.M. Space Borne Observations of Ocean Glint Reflectans and Modeling of Wave Slope Distributions / F.M. Breon, N. Henriot. – DOI: 10.1029/2005JC003343 // *J. Geophysical Research*. – 2006. – Vol. 111. – P. 06005.
10. Интерпретация оптических спутниковых изображений Черного моря в зоне солнечного блика / М.В. Юровская, В.Н. Кудрявцев, Б. Шапрон, В.А. Дулов // *Морской гидрофизический журнал*. – 2014. – № 4. – С. 68–82.
11. Применение многомерных корреляционных процедур для идентификации следных структур на космических снимках морской поверхности / В.И. Тимонин, Н.Д. Тянникова, В.Н. Носов, С.Г. Иванов [и др.] // *Процессы в геосредах*. – 2018. – Т. 4, № 18. – С. 1221–1225.
12. Тимонин, В.И. Об одном статистическом методе обнаружения аномалий на снимках морской поверхности / В.И. Тимонин, Р.А. Курбатов, В.Н. Носов // *Процессы в геосредах*. – 2016. – Т. 4. – С. 363–370.
13. Method for Detection of the Vessel Trace Anomalies in the Sea Surface Images-based on Analysis of Color Gradient Correlations / V.N. Nosov, V.I. Timonin, M.K. Klementiev, L.M. Budovskaya // *Springer Geology*. – 2021. – Vol. 2. – P. 219–224.
14. Дубина, В.А. Внутренние волны в Японском море: пространственно-временное распределение и характеристики поданным спутникового дистанционного зондирования / В.А. Дубина, Л.М. Митник // *Исслед. Земли из космоса*. – 2007. – № 3. – С. 37–46.
15. Липинская, Н.А. Исследование воздействия внутренних волн на оптические характеристики поверхности моря в шельфовой зоне залива Петра Великого / Н.А. Липинская, П.А. Салюк // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 51–59.

16. Наблюдения внутренних волн по видеоизображениям / А.И. Алексанин, В. Ким, О.Г. Константинов, Р.А. Коротченко [и др.] // Подводные исследования и робототехника. – 2019. – № 3(29). – С. 47–53.
17. Константинов, О.Г. Поверхностные проявления внутренних волн по данным видеосистемы берегового базирования / О.Г. Константинов, В.В. Новотрясов // Известия. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 364–369.

REFERENCES

1. Ocean Optics: Vol. 2: Applied Ocean Optics / Editor-in-chief A.S. Monin. – Moscow: Nauka, 1983. – 236 p.
2. Ocean Science: Instruments and Methods of Ocean Study / G.V. Smirnov, V.N. Yeremeyev, M.D. Ageyev [et al.] // International Association of Academy of Science; RAS; Ukraine National Academy of Science. – Moscow: Nauka, 2005. – 795 p.
3. Cooperative Space and Marine Experiment on Integrated Registration of Ship Wakes / V.N. Nosov, S.G. Ivanov, V.I. Timonin, A.L. Podgrebenkov [et al.] // Fundamental and Applied Hydrophysics. – 2015. – Vol. 8, No 4. – P. 34–35.
4. Study of Sea Wave Spectra in a Wide Spectrum Wavelength Range Based on Satellite and Contact Data / V.G. Bondur, V.A. Dulov, A.B. Murynin, Yu.Yu. Yurovskiy // Earth Research from Space. – 2016. – No 1–2. – P. 7–24.
5. Observation of Oceanic Internal and Surface Waves from the Earth Resources Technology Satellite / J.R. Apel, H.M. Byrne, J.R. Proni, R.L. Charnell // Journal of Geophysical Research. – 1975. – Vol. 80. – P. 865–881.
6. Features of Water Dynamics and Distribution of Chlorophyll A in the Northeast Part the Black Sea in the Fall of 1997 / A.I. Ginzburg, A.G. Kostyanoy, V.G. Krivisheya, N.P. Nezlin [et al.] // Oceanology. – 2000. – Vol. 40, No 3. – P. 344–356.
7. Ris, U. Basics of Remote Sensing. – Moscow: Technosfera, 2006. – 335 p.
8. The Spectral Reflectance of Ship Wakes Between 400 and 900 Nanometers / R. Wright, J. Deloatch, S. Osgood, J. Yuan // IGARSS. – 2012. – P. 4186–4189.
9. Breon, F.M. Space Borne Observations of Ocean Glint Reflectans and Modeling of Wave Slope Distributions / F.M. Breon, N. Henriot. – DOI: 10.1029/2005JC003343 // Journal of Geophysical Research. – 2006. – Vol. 111. – P. 06005.
10. Interpretation of Black Sea Optical Satellite Images in Sun Glitter Area / M.V. Yurovskaya, V.N. Kudryavtsev, B. Chapron, V.A. Dulov // Physical Oceanography. – 2014. – No 4. – P. 68–82.
11. Correlations Procedures Using of Anomaly Detection on the Sea Surface / V.I. Timonin, N.D. Tyannicova, V.N. Nosov, S.G. Ivanov [et al.] // Process in Geomedia. – 2018. – No 4(18). – P. 1221–1225.
12. Timonin, V.I. One of the Methods of Anomaly Detection on the Sea Surface / V.I. Timonin, R.A. Kurbatov, V.N. Nosov // Process in Geomedia. – 2016. Vol. 4. – P. 363–370.
13. Method for Detection of the Vessel Trace Anomalies in the Sea Surface Images Based on Analysis of Color Gradient Correlations / V.N. Nosov, V.I. Timonin, M.K. Klementiev, L.M. Budovskaya // Springer Geology. – 2021. – Vol. 2. – P. 219–224.

14. Dubina, V.A. Internak Waves in the Sea of Japan: Time-Space Distribution and Characteristics Based on Satellire Remote Sensing / V.A. Dubina, L.M. Mitnik // *Earth Research from Space*. – 2007. – No 3. – P. 37–46.
15. Lipinskaia, N.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 / N.A. Lipinskaia, P.A. Salyuk // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. – 2020. – Vol. 13, No 2. – P. 51–59.
16. Observation of Internal Waves on Image Sequences / A.I. Alwksanin, V. Kim, O.G. Konstantinov, R.A. Korotchenko [et al.] // *Underwater Investigations and Robotics*. – 2019. – No 3(29). – P. 47–53.
17. Konstantinov, O.G. Surface Manifestations of Internal Waves Observed Using a Land-Based Video System / O.G. Konstantinov, V.V. Novotryasov // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2013. – Vol. 49, No 3. – P. 364–369.