УДК 528.8.044.6:528.854:551.465.4

© *В. Н. Носов*[1], *С. Г. Иванов*[1], *В. И. Тимонин*[1,2], *А. Л. Подгребенков*[1], *А. Н. Плишкин*[1], *С. Б. Каледин*[1,2], *Т. В. Глебова*[1], *А. Н. Ядренцев*[3], *В. К. Захаров*[4]
[1]Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Москва
[2]Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
[3]Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина, пос. Звездный городок, Московская обл.
[4]Испытательный центр ВМФ, Феодосия
ivanovsg5167@ya.ru

СОВМЕСТНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ И МОРСКОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО КОМПЛЕКСНОЙ РЕГИСТРАЦИИ СЛЕДА СУДНА

Приводится описание космического эксперимента по фотографической регистрации с борта Российского сегмента МКС гидродинамических возмущений в виде следа судна на морской поверхности с последующей обработкой изображений по разработанным алгоритмам и программам, позволяющим выделять слабоконтрастные аномалии на изображениях морской поверхности. Параллельно с космическим экспериментом выполнялись подспутниковые измерения параметров следа судна с помощью лазерно-оптической аппаратуры. Измеренные с помощью лазерно-оптической аппаратуры параметры турбулентной части следа судна согласуются с визуальными оценками по фотоснимкам, полученным с МКС, и с результатами цифровой обработки этих снимков. Намечены пути по совершенствованию методики съемки с борта МКС и разработке эффективных алгоритмов по выделению аномалий на изображениях морской поверхности с учетом симметрии этих аномалий.

Ключевые слова: гидродинамические возмущения, динамика вод, Международная космическая станция, фотометр яркости моря, аэрозольный лидар, сканирующий лазерный локатор.

V. N. Nosov[1], *S. G. Ivanov*[1], *V. I. Timonin*[1,2], *A. L. Podgrebenkov*[1], *A. N. Pliskin*[1], *S. B. Kaledin*[1,2], *T. V. Glebova*[1], *A. N. Yadrintsev*[3], *V. Hr. Zakharov*[4]
[1]Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow, Russia
[2]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[3]Yu. A. Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center, Zvezdniy gorodok, Moscow region, Russia
[4]Testing Center of the Navy, Feodosia, Russia

COOPERATIVE SPASE AND MARINE EXPERIMENT ON INTEGRATED REGISTRATION OF SHIP WAKES

The paper describes the space experiment of photographing from the board of the Russian segment of the International Space Station of hydrodynamic disturbances in the form of ship wakes on the sea surface followed by image processing by the developed algorithms and programs which allow to highlight low-contrast anomalies in images of the sea surface. Ground truth measurement parameters ship wakes using laser and optical equipment were performed in parallel with the space experiment. Measured by the laser and optical equipment parameters of the turbulent ship wakes correspond both with the visual assessments (due to images obtained from the International Space Station) and with the results of the digital processing of images. The ways to improve the photographic technique from the International Space Station and to develop the efficient algorithms for allocation of anomalies in the images of the sea surface using the symmetry of these anomalies are planned.

Key words: hydrodynamic perturbations, the dynamics of water, International Space Station, photometer of sea brightness, aerosol lidar, scanning laser locator.

Одним из направлений изучения океана является исследование различных гидродинамических возмущений морской среды. Эти явления могут иметь как естественное (течения, синоптические вихри, внутренние волны, апвеллинг), так искусственное (например, возникающие при движении в морской среде различных морских объектов) происхождение. Гидродинамические возмущения могут проявляться на морской поверхности. В этом случае для их регистрации могут использоваться дистанционные методы, работающие в различных диапазонах электромагнитного излучения, в том

числе в оптическом диапазоне. Размещение на борту авиа- или космического носителя (КН) средств дистанционных измерений на основе таких методов позволяет оперативно получать данные о различных гидродинамических явлениях в заданном участке акватории Мирового океана [1—3].

В ГЕОХИ РАН с использованием разработанных макетов лазерно-оптической аппаратуры (ЛОА) проводятся эксперименты по комплексной дистанционной регистрации гидродинамических явлений, вызванных как природными, так и техногенными процессами, по их проявлениям на морской поверхности и в приповерхностных слоях морской среды и атмосферы [4—8].

Значительный интерес как для задач морской навигации, так и для обнаружения судов-загрязнителей морской поверхности представляет проблема измерения средствами дистанционного зондирования характеристик следных аномалий, возбуждаемых судами на морской поверхности [9—11]. Следы судов могут быть зарегистрированы с авиа- и космических носителей и могут нести в себе информацию о размерах, скорости, направлении движения и предполагаемом местоположении судна. По кильватерным следам можно обнаруживать и небольшие суда, непосредственное обнаружение которых с борта КН путем прямой регистрации корпуса судна затруднено или невозможно.

Эффективность применения аэрокосмических дистанционных средств зависит от решения задачи установления связи регистрируемых характеристик гидрофизических полей в приповерхностном слое морской среды, на морской поверхности и в приводном слое атмосферы с физическими процессами в глубинных слоях моря и в атмосфере. Для таких исследований необходимо использовать методы и средства, позволяющие выполнить подспутниковые измерения структуры этих гидрофизических полей.

Цель представленного в настоящей работе космического эксперимента (КЭ) состояла в получении с борта Российского сегмента Международной космической станции фотографических изображений следа судна на морской поверхности при одновременном выполнении подспутниковых измерений, обеспечивающих измерение масштабов и характеристик гидродинамических возмущений (ГДВ) в виде следа судна, регистрации гидрометеопараметров, а также в разработке алгоритмов и программного обеспечения для обработки изображений морской поверхности с учетом симметрии следа судна.

Описание космического эксперимента. Представленный в настоящей работе КЭ состоял из космической и морской составляющих, согласованных между собой по времени и подчинённых одной цели — выявлению аномальных структур в виде следа, созданного движением судна на морской поверхности и в приповерхностных слоях морской среды и атмосферы. КЭ проводился вблизи юго-восточного побережья Крыма в два этапа: первый — в 2013 г. (6 сеансов), второй — в 2014 г. (7 сеансов).

В эксперименте использовались два судна. Одно из них (НК-2) двигалось, возбуждая следные аномалии на морской поверхности, а второе (НК-1) — выполняло вспомогательные задачи. Операторы на МКС визуально обнаруживали заданный район, используя характерные очертания ближайшей береговой линии и вспомогательные ориентиры — светодымовые маркеры от фальшфейеров и трассёров, одновременно инициированных на обоих судах в момент пролета МКС над районом работ. Для облегчения интерпретации результатов КЭ во время эксперимента на судах, участвующих в эксперименте, проводились гидрометеорологические наблюдения.

Задачей космонавтов-операторов являлось фотографирование с борта РС МКС ГДВ, создаваемых на морской поверхности судном-постановщиком следа. При съемке использовались цифровые фотокамеры Nikon D3S, Nikon D3X и Nikon D800.

Для уменьшения «смаза» снимков, возникающего из-за движения МКС, использовалась короткая выдержка 1/8000 с. Фотографирование с частотой 1 кадр/с производилось при съемке фотокамерой с фокусом объектива 800 мм, и с частотой не менее 2 кадров/с — с эквивалентным фокусом объектива 1200 мм. Время съемки в каждом сеансе КЭ составляло около 10 с. Такой режим съемки позволял получать изображения судна и его следных аномалий, а также достаточно большого фонового участка морской поверхности в районе проведения работ. При этом изображение судна-постановщика следа находилось примерно в центре кадра.

После пролета МКС судно-постановщик следа выполняло маневрирование по пересечению собственного следа с целью регистрации изменений параметров морского волнения и приповерхностных слоев морской среды и атмосферы, вызванных воздействием следных аномалий. Регистрация осуществлялась с помощью установленных на судне макетов ЛОА, разработанных в ГЕОХИ РАН (краткое описание макетов ЛОА приведено ниже).

На рис. 1 (см. вклейку) показана карта крымского побережья, в районе которого проводился эксперимент. Возможные траектории полета МКС показаны: синей линией — восходящая ветвь

орбиты, красной линией — нисходящая ветвь. Траектория движения судна-постановщика следа НК-2 при проведении эксперимента проходила параллельно трассе полета МКС.

Описание макетов лазерно-оптической аппаратуры. В состав макетов ЛОА, использованных при проведении морской составляющей КЭ, входят сканирующий лазерный локатор морского волнения (СЛЛ), фотометр яркости моря (ФЯМ) и аэрозольный лидар (АЛ), предназначенные для регистрации и обработки сигналов от морской поверхности, приповерхностного слоя морской среды и приводного слоя атмосферы соответственно.

С помощью СЛЛ посредством сканирования морской поверхности узким лазерным лучом регистрируются параметры лазерно-бликовых отражений (амплитуды импульсов, интервалы времени между импульсами и т. д.), имеющие статистический характер. Данные параметры определяются такими характеристиками морских волн, как их кривизна поверхности и пространственный период [8]. Это позволяет связывать изменение статистических характеристик сигналов СЛЛ с изменениями статистических характеристик поверхностного морского волнения в области следных аномалий.

ФЯМ измеряет меняющееся в присутствии следных аномалий отношение яркости моря на двух длинах волн: 440 нм (рабочая длина волны отвечает максимальному поглощению хлорофилла, содержащегося в фитопланктоне) и 540 нм (опорная длина волны, не попадающая в полосу поглощения хлорофилла). Отметим, что данный параметр мало зависит от помехового воздействия морского волнения. С помощью дополнительного, третьего «солнечного» канала ФЯМ также измеряется освещённость от прямого солнечного излучения в синем диапазоне длин волн 430—450 нм, что обеспечивает нормировку на условия освещенности морской поверхности.

АЛ измеряет изменения интенсивности лазерного излучения, рассеянного на приводном аэрозоле, в присутствии гидродинамических процессов, которые приводят к изменению приповерхностной концентрации аэрозольных частиц.

Более подробно описание макетов ЛОА представлено в [4—8].

Результаты и их обсуждение. Одной из главных задач первого КЭ в 2013 г. являлась отработка методики проведения эксперимента. На основании анализа фотографий, полученных на первом этапе, удалось выявить параметры в настройках фотокамер, которые могут быть оптимизированы. Для проверки эффективности введения коррекции настроек были проведены две тестовые съемки с борта самолета и МКС. С учетом полученного опыта на втором этапе КЭ в 2014 г., была успешно отработана методика выполнения эксперимента, и удалось получить фотографии, на которых уверенно обнаруживаются турбулентный и волновой следы судна-постановщика следа. На рис. 2 и 3 представлены фотографии со следами судов и дымов от трассера, которые были отобраны для дальнейшей программной обработки и сравнения полученных результатов.

Видно, что наблюдаемые следы судов представляют собой на фотоснимках малоконтрастные аномалии. По этой причине требуется разработка специальных алгоритмов обработки изображений, позволяющих повысить эффективность выявления этих аномалий, и их соотнесение с данными подспутниковых измерений, выполненных с помощью макетов ЛОА.

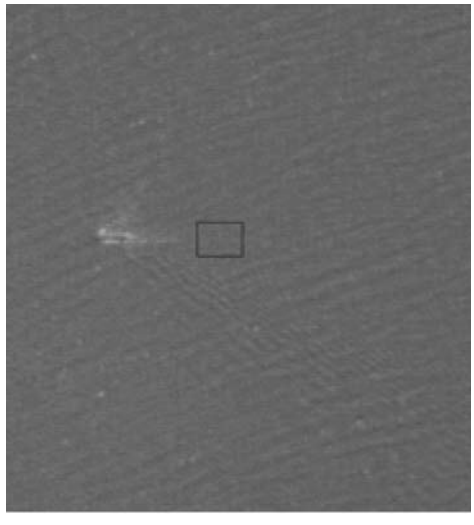

Рис. 2. Снимок с борта МКС, полученный в ходе подготовки к эксперименту.

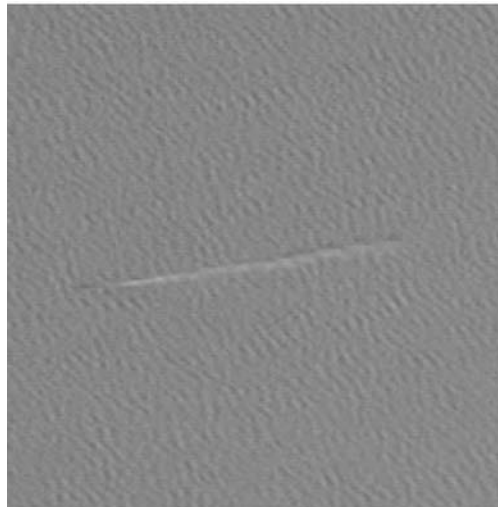

Рис. 3. Снимок с борта МКС, полученный в ходе эксперимента 30.06.2014 г.

Для решения сформулированных задач применялись различные методы обработки изображений, как известные, так и специально разработанные для этих целей. Так как при анализе фотографий анализируются только цвета (или, что то же самое, трехмерный вектор (R,G,B) интенсивностей красного, голубого и зеленого цветов), то возможность идентификации следа судна на морской поверхности во многом зависит от качества (разрешения) снимка. Оценка пространственного разрешения снимков с учетом размеров одного пикселя фотоприемной матрицы и с учетом фокусного расстояния объектива и параметров съемки (высоты и скорости полета МКС) дает величину 2.5 м/пк. Достаточность такого разрешения для регистрации изучаемых аномалий в виде следа судна проверяется сопоставлением результатов анализа снимков с борта МКС и результатов подспутниковых измерений.

На рис. 4 показан фрагмент снимка, изображенного на рис. 2. Для выделения аномальных участков проводилось комплексное сравнение характеристик участков «фона» морской поверхности с исследуемыми фрагментами. В частности, анализировались спектральные характеристики главной компоненты вектора интенсивностей (*R, G, B*) цветов во взаимно перпендикулярных направлениях; сравнивались гистограммы главных компонент; проводилась сегментация фотографических изображений методом выделения границ (в дальнейшем для краткости главной компонентой называется первая главная компонента вектора (*R, G, B*)). Например, на рис. 5 приведен результат сегментирования фрагмента изображенного на рис. 4 методом Прюитта. На этом же рисунке отмечены три области, четко различающиеся по концентрации сегмента.

Для проверки возможной угловой симметрии обнаруженных аномалий волнового следа применялся метод многомерных ранговых сумм. Его суть состоит в следующем. Сравниваемые участки обнаруженных аномалий одинакового размера разбивались на n прямоугольников, для каждого из которых вычислялись p показателей $X_1, ..., X_p$ (средние значения интенсивностей цветов, среднее главной компоненты, наибольший градиент главной компоненты, шероховатость прямоугольника). Таким образом, каждому участку сопоставлялась выборка $\vec{X}_1^{\,i}, \vec{X}_2^{\,i}, \ldots, \vec{X}_n^{\,i}$, состоящая из p-мерных векторов (здесь i — номер участка). Далее для двух сравниваемых участков по полученным для них выборкам вычислялась статистика ранговых сумм U^*, позволяющая оценить меру расхождения между ними.

Статистика U^* вычисляется по формуле

$$U^* = N^{-1}U'\left(V\right)^{-1}U = U'\left(NV\right)^{-1}U,$$

где $U_i = \sum_{t=1}^{n}\left[\frac{R_{it}}{N+1} - \frac{1}{2}\right]$ — элементы вектора $U' = (U_1, ..., U_p)$, $N = 2n$.

Здесь R_{it} — ранг i-й координаты t-го элемента первой выборки в объединенном вариационном ряду из i-х координат двух выборок. Элементы ковариационной матрицы V определяются по формулам

$$\hat{v}_{ii} = \frac{n^2}{12N\left(N+1\right)} \text{ и } \hat{v}_{ij} = \frac{n^2}{N^2\left(N-1\right)\left(N+1\right)^2}\left[\sum_{t=1}^{N} R_{it}R_{jt} - \frac{N\left(N+1\right)^2}{4}\right].$$

Подробнее о статистике критерия ранговых сумм изложено в работе [12].

Расчеты были проведены для области следа судна, выделенной прямоугольником на рис. 6 (часть фотографии, изображенной на рис. 3). Для участков аномалий, расположенных под углом 19° к оси следа (в его верхней части на рис. 7), определялись области, расположенные в нижней

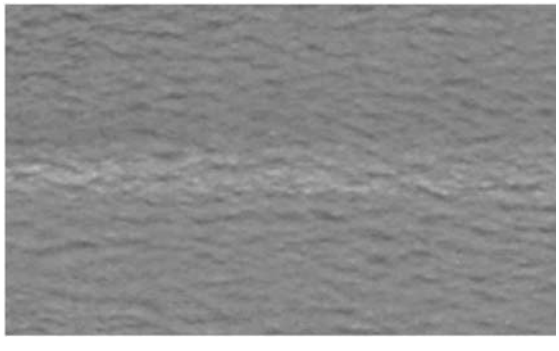

Рис. 4. Фрагмент изображения турбулентного следа.

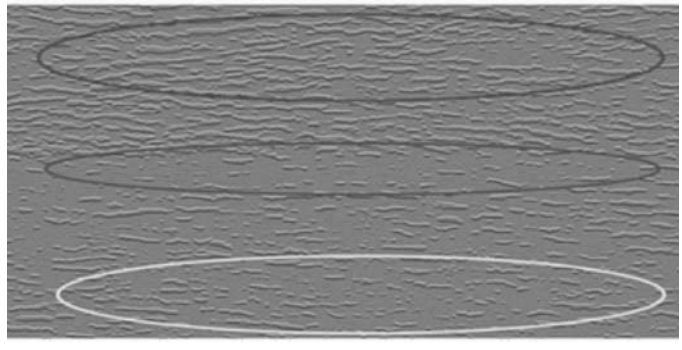

Рис. 5. Результат сегментирования изображения турбулентного следа и области сегментирования.

части снимка на линии, перпендикулярной оси следа. Области выбирались исходя из условия наименьшего значения статистики ранговых сумм среди участков на этой линии.

Целью выбора таких областей была проверка возможности метода ранговых сумм обнаружить расходящийся волновой след, который, согласно теоретическим представлениям, обладает симметрией и образует углы порядка 19—20° с осью следа. Результаты обработки для этой области приведены на рис. 7, где квадратами показана совокупность вертикально расположенных пар участков, для которых статистика ранговых сумм минимальна. Наглядно видна симметричность полученной картины, что согласуется с известной моделью следа.

Таким образом, предложенный способ обработки обладает достаточной достоверностью и может быть использован в качестве базового для дальнейшего развития.

Для согласования полученных результатов с данными подспутниковых измерений был выполнен предварительный визуальный анализ характеристик следа. По фотографии, изображенной на рис. 3, была выполнена оценка пространственных характеристик следа судна-постановщика: видимая длина турбулентной части следа оценивается величиной 360 м (при возрасте следа 2 мин). Ширина турбулентной части следа при возрасте 20 мин оценивалась путем аппроксимации видимой на фотографии части следа с возрастом 2 мин и составила около 300—400 м. Правый ус волнового следа составляет 23° от оси следа, левый — 20°, ширина волнового следа при возрасте 35 с оценивается величиной 85 м.

Выполненные оценки хорошо согласуются с данными, приведенными на рис. 7 и полученными с помощью разработанных алгоритмов обработки изображений для волновой части следа.

В ходе эксперимента были проведены подспутниковые измерения параметров поверхностного волнения с помощью макетов ЛОА. Результаты обработки сигналов каждого из макетов ЛОА в области пересечения судном-постановщиком собственного следа с возрастом около 20 мин приведены на рис. 8 (см. вклейку).

В области пересечения турбулентного следа с возрастом 20 мин наблюдается существенное изменение интенсивности обработанных сигналов макетов ЛОА. По полученным данным ширина турбулентной части следа судна при скорости движения 6 узлов и возрасте следа 20 мин оценивается величиной около 300 м. Некоторое смещение максимума графика для АЛ относительно зоны следа может быть связано со сносом аэрозольного облака из-за ветрового воздействия, а смещение максимума графика ФЯМ может быть обусловлено наличием в районе работ приповерхностных течений.

Таким образом, размеры турбулентной части следа судна-постановщика, полученные из анализа фотографий с борта МКС, хорошо согласуются с данными, зарегистрированными в ходе подспутниковых измерений с помощью макетов ЛОА.

Следует отметить, что в связи с небольшой скоростью движения судна (6 узлов), на котором были размещены макеты ЛОА, регистрация волнового следа судна с возрастом около 20 мин не представлялась возможной.

***

Совместный космический и морской эксперименты по комплексной регистрации следа судна с использованием подспутниковых измерений показал возможность достижения поставленной цели: определения масштаба и характеристик ГДВ в виде следа судна с борта МКС. Для имевшихся

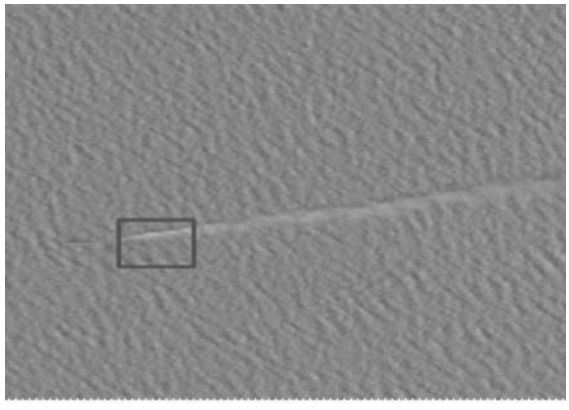

Рис. 6. Фрагмент изображения следа судна, использованный при обработке.

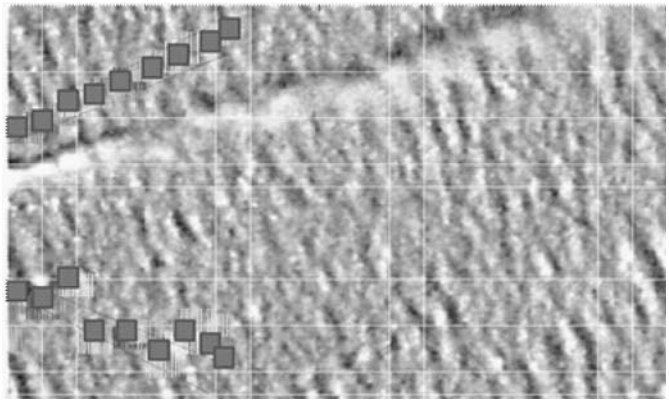

Рис. 7. Оценка симметрии сегментированного следа судна (угол 19° с осью следа).

на момент проведения КЭ гидрометеорологических условий получено достаточно хорошее совпадение результатов космических и подспутниковых измерений размеров турбулентной части следа судна. Это позволяет развивать данное направление исследований с целью разработки эффективных дистанционных оптических методов обнаружения из космоса аномалий на морской поверхности, вызванных какими-либо гидродинамическими возмущениями.

Показано, что результативность применяемых алгоритмов обработки изображений во многом определяется необходимостью учета внешних факторов в виде гидрометеоусловий (направление и скорость ветра, наличие течений и пр.). В зависимости от этих факторов должны решаться такие, во многом не исследованные задачи, как определение размеров и конфигурации анализируемых участков поверхности, определение возможных искажений структуры следа, выбор наиболее информативных показателей наличия аномалий. К таким показателям относятся: «выглаживание» спектральных характеристик высокочастотных компонент спектров поверхностного волнения; значение градиентов уровней яркости; изменение геометрии кластеров, образованных сегментами одинаковой структуры и др. Решение указанных проблем, наряду с разработкой наиболее чувствительных в конкретной ситуации статистических алгоритмов, является задачей для дальнейших исследований. Связанной с обозначенной задачей является проблема накопления статистических данных по особенностям влияния гидрометеоусловий на эффективность выделения аномалий в различных районах Мирового океана.

Кроме того, для обеспечения качественных исходных данных необходимо, по нашему мнению, определить оптимальные условия и параметры фотосъемки с борта космического носителя (использование области зеркального солнечного блика; применение светофильтров для исключения искажений, вызванных атмосферными явлениями; одномоментное фотографирование одного участка поверхности несколькими аппаратами с необходимой синхронизацией их работы).

References

1. *Ginzburg A. I., Kostyanoy A. G., Krivosheya V. G., Nezlin N. P., Soloviev D. M., Stanichniy S. V., Yakubenko V. G.* Peculiarities of water dynamics and distribution of chlorophyll a in the North-Eastern part of the Black sea in the autumn of 1997. *Okeanologija.* 2000, 40, 3, 344—356 (in Russian).
2. *Karabashev G. S., Evdoshenko M. A., Sheberstov S. V.* The Analysis of the manifestations of mesoscale water cycle on satellite images of sea surface. *Okeanologija.* 2005, 45, 2, 182—192 (in Russian).
3. *Turova E. S., Ivanov A. Yu.* Peculiarities of manifestation of hydrodynamic structures in the South-Eastern part of the Baltic sea according to the spectrometer MODIS and radiolocation space. *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2001, 4, 41—54 (in Russian).
4. *Gorelov A. M., Zevakina E. A., Ivanov S. G., Kaledin S. B., Leonov S. A., Nosov V. N., Savin S. A.* About an integrated approach to remote registration of hydrodynamic perturbations of the marine environment by optical methods. *Fizicheskie osnovy priborostroenija.* 2012, 1, 4, 58—65 (in Russian).
5. *Ivanov S. G., Nosov V. N., Kaledin S. B., Pliskin A. N., Pogodin V. I., Leonov S. O., Glebova T. V., Zevakin E. A.* Study of small-scale variability of the surface layers of the marine environment under the action of hydrodynamic perturbations by using a brightness photometer sea. *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. Estestvennye nauki.* 2014, 5, 53—65 (in Russian).
6. *Nosov V. N., Gorelov A. M., Kaledin S. B., Kuznetsov V. A., Leonov S. O., Savin A. S.* Laser emission scattering over a marine surface during hydrodynamic disturbances within the water mass. *Doklady Earth Sciences.* 2010, 433, 1, 920—921.
7. *Nosov V. N., Kaledin S. B., Gorelov A. M., Leonov S. O., Kuznetsov V. A., Pogonin V. I., Savin A. S.* Light scattering in the atmospheric near-water layer above areas of long-living hydrodynamic disturbances of the marine environment. *Doklady Earth Sciences.* 2012, 442, 2, 247—248.
8. *Esipov I. B., Naugolnykh K. A., Nosov V. N., Pashin S. Y.* Measurement of the probability distribution of radii of curvature of the sea surface. *Izv. Akademii nauk. Ser. Fizika atmosfery i okeana.* 1986, 10, 1115—1117 (in Russian).
9. *Zubkov E. V., Lyubimov Yu. K., Shamayev S. I.* Method of detecting anomalies of the marine environment by the signals of the laser aerosounding. *Optika atmosfery i okeana.* 1997, 10, 9, 1093—1102 (in Russian).
10. *Smirnov G. V., Veden'kov V. E.* On the evaluation of some parameters of the moving surface objects by remote sensing of the wave trace. *Oceanologija.* 2000, 40, 2, 186—191 (in Russian).
11. *Wright R., Deloatch J., Osgood S., Yuan J.* The spectral reflectance of shipwakes between 400 and 900 nanometers. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* 2012, 4186—4189.
12. *Hettmansperger D.* Statistical inference based on ranks. *Moskva, Finansy i statistika,* 1989. 355 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 08.04.2015 г.

К статье *Родионов А. А.* и др. **«Комплексные исследования...»**

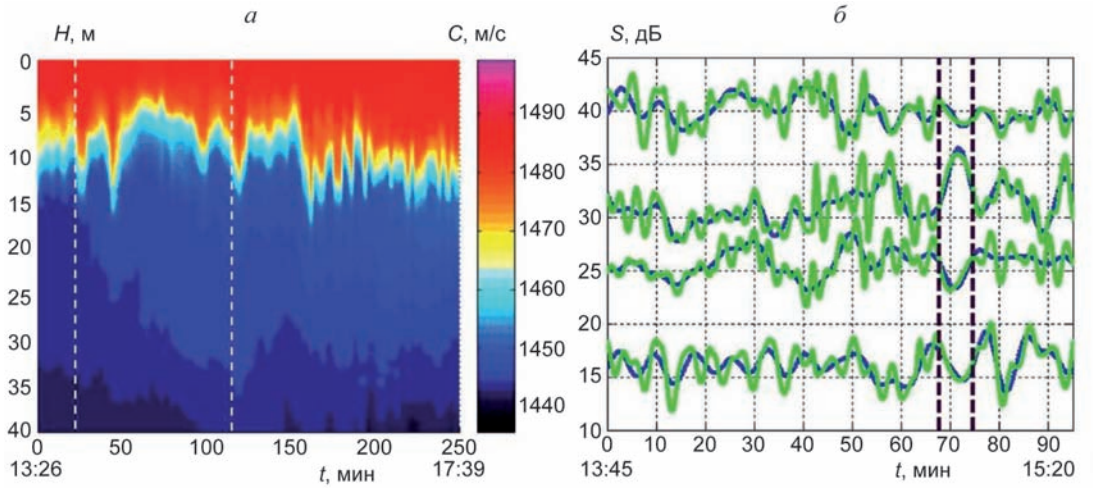

Рис. 6. Динамика вертикального распределения скорости звука (*а*)
и дисперсии гидроакустических сигналов (*б*) в точке 3.
H — глубина, м; *C* — скорость звука, м/с; *t* — время, мин; *S* — дисперсия сигнала, дБ.

К статье *Носов В. Н.* и др. **«Совместный космический и морской эксперимент...»**

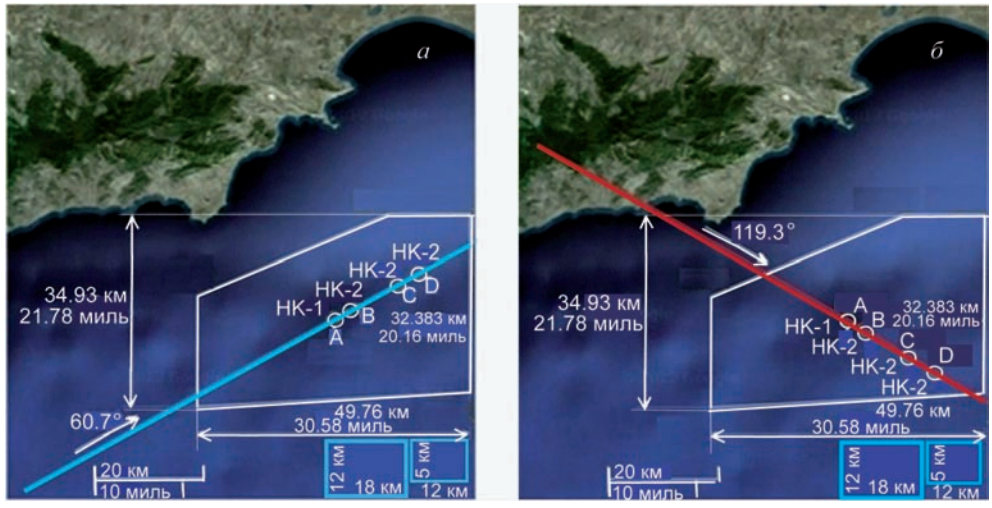

Рис. 1. Восходящая (*а*) и нисходящая (*б*) ветви траектории полета МКС.

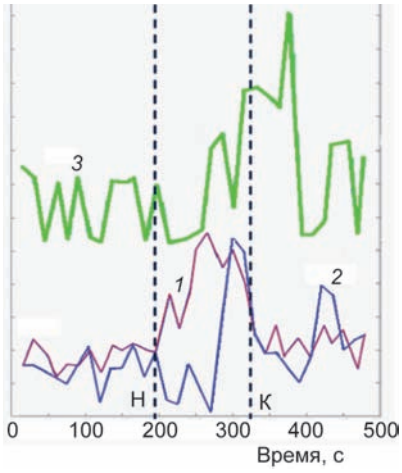

Рис. 8. Результаты обработки сигналов СЛЛ (*1*), ФЯМ (*2*)
и АЛ (*3*) при пересечении собственного следа судна-постановщика
с возрастом 20 мин.