

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 528.8

**Комплексный контроль состояния морских акваторий
оптическими методами. Часть 2. Регистрация загрязнений
на морской поверхности**

О.Г. Константинов¹, А.Н. Павлов^{2*}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5

Поступила в редакцию 27.03.2012 г.

Анализируется создание технических средств и методов оперативного и комплексного контроля состояния прибрежных морских акваторий оптическими методами. Показана возможность применения поляризационной панорамной видеосистемы берегового базирования для картирования и определения динамических характеристик поверхностных загрязнений органическими пленками. Рассмотрена возможность оценки поля скоростей приводного ветра путем корреляционной обработки временной последовательности панорамных изображений. Кроме этого, использование данной системы позволяет нацеливать научно-исследовательские суда на гидродинамические объекты исследований в прибрежной зоне (вихри, внутренние волны, загрязнения и т.д.) в режиме реального времени при наличии мобильного Интернета.

Ключевые слова: поверхностное загрязнение пленки нефтепродуктов, приводный ветер, слики, панорамное изображение; sea surface pollution, near-surface wind, slicks, panoramic image.

Введение

Одной из актуальных проблем прибрежных индустриальных регионов является проблема борьбы с загрязнением прилегающих акваторий. Оптические методы хорошо зарекомендовали и широко используются в оперативном экологическом контроле морских акваторий [1–3]. Большинство дистанционных методов обнаружения различного рода загрязнений основано на выявлении контраста между чистой и загрязненной морской поверхностью в видимом, инфракрасном и радиодиапазонах длин волн. В видимом диапазоне длин волн эффективным средством оперативного мониторинга акваторий может служить видеокомплекс контроля состояния морской поверхности. Характерным проявлением поверхностных загрязнений являются сликовые образования — области морской поверхности с отсутствием мелкомасштабного волнения [4–13].

В основе физических процессов, позволяющих в видимом диапазоне длин волн проводить регистрацию органических пленок на морской поверхности, лежит явление «выглаживания» морской поверхности за счет изменения коэффициента натяжения ор-

ганическими пленками и гашения ими мелкомасштабной ветровой ряби. Длины поверхностных волн, на которые оказывают существенное сглаживающее влияние пленки нефтепродуктов, приходятся на область от 1,5 до 70 см [14].

Изображение морской поверхности в современных цифровых видеосистемах состоит из матрицы пикселей. Каждый пиксель изображения несет информацию о цвете и яркости элемента морской поверхности. На цвет и яркость элемента морской поверхности оказывают влияние две компоненты — диффузно рассеянное морской толщей солнечное излучение и зеркально отраженное элементарной площадкой морской поверхности излучение неба. Вклад этих компонентов в цвет и яркость пикселя изображения зависит от наклона элемента морской поверхности по отношению к углу визирования. Выглаживание морской поверхности органическими пленками приводит к уменьшению видимых уклонов, увеличению доли зеркальной составляющей поверхности моря и уменьшению доли диффузной компоненты восходящего излучения, что вызывает цветовой и яркостный контраст покрытых пленкой областей по отношению к чистой морской поверхности. Дополнительно цветовой и яркостный контраст загрязненной и чистой поверхности усиливается светоотражающими и поглощательными свойствами самой

* Олег Григорьевич Константинов (olegkon@poi.dvo.ru);
Андрей Николаевич Павлов (anpavlov@iacp.dvo.ru).

органической пленки. Так, например, в случае тонких нефтяных пленок в месте их нахождения могут появляться цвета побежалости, объясняемые интерференционными эффектами внутри самой пленки.

Таким образом, цветовой и яркостный контраст изображения морской поверхности может служить одним из идентификационных признаков возможного наличия на ней органических пленок. Следует особенно подчеркнуть, что слик на морской поверхности — всего лишь один из признаков присутствия органической пленки антропогенного происхождения, поскольку природа образования сликов более многообразна. Гашение мелкомасштабного морского волнения может быть вызвано целым рядом причин: поверхностно-активными веществами природного происхождения; поверхностным проявлением внутренних волн; атмосферной циркуляцией; зоной распреснения морских вод прибрежными стоками, градиентами потоков водных масс [15].

Однако наблюдение за динамикой сликового образования в режиме мониторинга позволяет в большинстве случаев либо определить источник загрязнения по связи слика с конкретным объектом (например, судно, оставляющее за собой след в виде слика), либо идентифицировать природу слика по эволюции его формы с учетом течений и характеристик ветра.

1. Аппаратура и методы

Панорамная поляризационная видеосистема контроля состояния прибрежной акватории представляет собой безкорпусную видеокамеру в термостабилизированном защитном корпусе (рис. 1), установленном на оси шагового двигателя.

Угол поворота камеры при формировании отдельных кадров и количество кадров, определяющее угловые размеры панорамы, задаются в качестве входных параметров программы управления камерой. В конструкции видеосистемы предусмотрены юстировочные узлы для установки оси шагового двигателя в вертикальное положение и позиционирования матрицы камеры, такого, чтобы горизонтальные стороны видеоматрицы лежали в плоскости, перпендикулярной оси вращения шагового двигателя. Применение шагового двигателя позволяет использовать метод дискретного углового позиционирования видеосистемы, при котором каждый кадр панорамы захватывается при однозначно определенном направлении визирования. Преимущества такого метода проявляются как при формировании общей панорамы из составляющих ее кадров, так и в процедуре привязки изображения к географическим координатам. Технические характеристики видеосистемы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики видеосистемы

Угол поля зрения в вертикальной плоскости	9°
Угол поля зрения в фрагменте панорамы по азимуту	7,7°
Угловой шаг сканирования	7,2°
Высота расположения над уровнем моря	92 м
Расстояние до кромки моря	500 м
Ориентация поляризатора-анализатора	P
Время формирования одной панорамы (270°)	18 с

Результирующее панорамное изображение представляет собой матрицу пикселей, значения которых отражает яркость элемента поверхности, а расположение пикселя в плоскости матрицы изображения

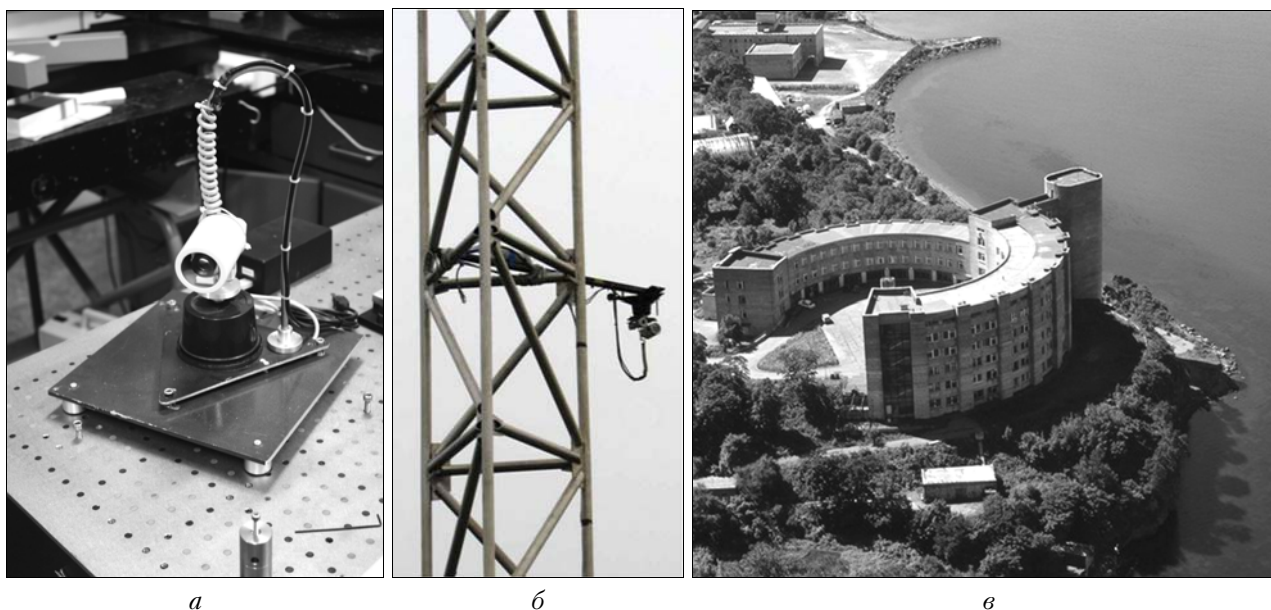


Рис. 1. Вид видеосистемы и ее расположения: *а* — панорамная камера; *б* — на экспериментальной базе ТОИ в бухте «Витязь»; *в* — на здании Института биологии моря на берегу Амурского залива (высота расположения — 40 м над ур.м.) (фото из <http://photovladivostok.ru/gallery/vladivostok/panorama/3705.htm>)

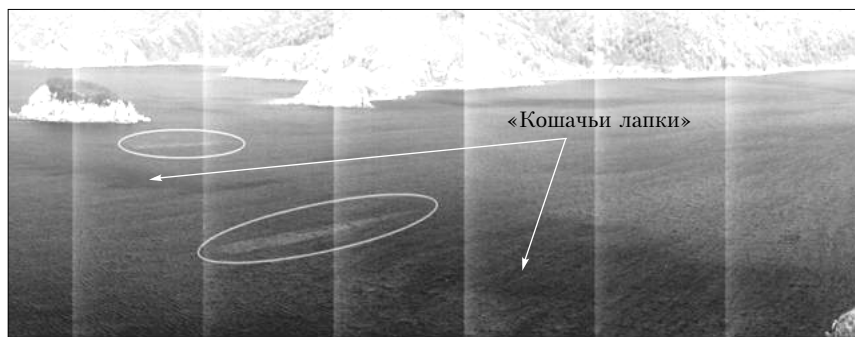
однозначно характеризует угловые координаты этого элемента в системе отсчета, связанной с видеосистемой. При этом зенитный угол отсчитывается относительно оптической оси видеосистемы, а азимутальный угол — относительно географического направления на север. Поскольку в каждый момент захвата изображения известны пространственная ориентация видеосистемы и высота расположения камеры, то не представляет труда трансформировать панорамное изображение на уровенную поверхность моря, осуществив его привязку к географической системе координат. Для совершения такой операции дополнительно необходимо определить угловое разрешение видеосистемы, которое может быть рассчитано по известному размеру пикселя матрицы и фокусному расстоянию объектива.

Для привязки к географическим координатам необходимо пользоваться реперными точками на изо-

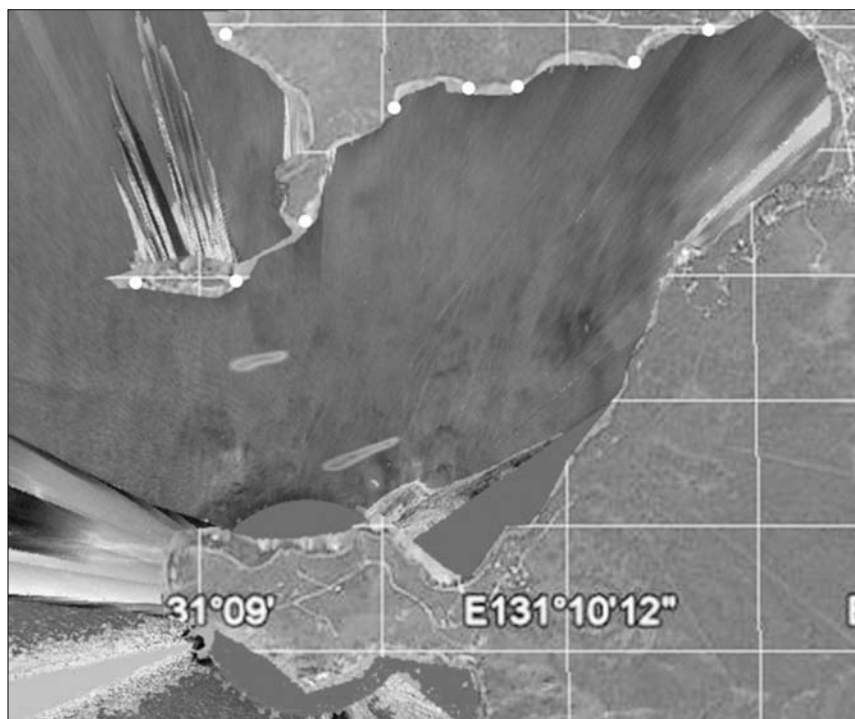
бражении береговой черты с известными координатами, которые используются для расчета ориентации видеосистемы. Поскольку система сканирования основана на методе дискретного позиционирования камеры, который предполагает жесткую фиксацию камеры в определенном для каждого кадра панорамы положении, параметры трансформирования рассчитываются один раз после монтажа системы. Такой подход позволяет экономить счетные ресурсы и получать привязанные к географическим координатам изображения объектов на морской поверхности в реальном масштабе времени.

На рис. 2, *a* приведен фрагмент панорамы бухты Витязь в период проведения эксперимента по регистрации снимков от искусственной органической пленки.

Видеосистема располагалась на высоте 92 м над ур.м. в 450 м от береговой черты и в автоматическом



a



b

Рис. 2. Снимки на морской поверхности: *a* — фрагмент панорамы акватории бухты Витязь (эллипсами выделены области снимков от искусственной органической пленки); *b* — трансформированный на уровенную поверхность моря фрагмент панорамы бухты Витязь (белыми метками обозначены реперные точки, используемые в процедуре обработки)

режиме осуществляла обзор морской акватории в пределах сектора 270°. Стрелками указаны области с повышенным мелкомасштабным волнением — так называемые «кошачьи лапки» (cat's paw в англоязычной литературе), которое усиливается вследствие воздействия на морскую поверхность турбулентно возмущенных воздушных потоков. Наиболее часто такие области возникают в подветренной прибрежной части водоемов с высокими крутыми берегами, где воздушные потоки резко меняют высоту при выходе на морскую поверхность и приобретают турбулентный характер. На временной последовательности снимков морской поверхности они проявляются в виде темных полос, перемещающихся по направлению ветра. На рис. 2, б показан результат преобразования фрагмента панорамы с привязкой изображения морской акватории к географическим координатам.

2. Динамика снимков от нефтепродуктов и искусственных органических пленок

Начиная с 2007 г. панорамная система видеоконтроля морской поверхности работала в режиме мониторинга на морской экспериментальной станции Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН на мысе Шульца п-ова Гамова на берегу залива Петра Великого (МЭС «м. Шульца»). Один из наиболее крупных разливов загрязняющих веществ был зарегистрирован 21.10.2007 при прохождении вблизи бухты Витязь десантного корабля. На рис. 3, а, б показаны изображения морской поверхности, полученные с интервалом 1 ч.

Темная область в левой части изображения морской поверхности на рис. 3, а, б, в затенена береговым рельефом, растительностью и другими препятствиями, находящимися в поле зрения камеры. Наиболее светлый сектор в нижней части рис. 3, а, б, в — зона солнечного блика. Белой линией обозначен мар-

шрут судна, а в верхнем левом углу рис. 3, а показано само судно. Светлая область на изображениях морской поверхности вблизи маршрутной линии — слик от органической пленки, образованной либо при сбросе льяльных вод судном, либо при утечке масла или дизельного топлива. «Разностное» изображение морской поверхности, полученное путем попиксельной разности яркости изображений рис. 3, б и 3, а (рис. 3, в), позволяет оценить изменение площади слика за определенный интервал времени (интервал между изображениями) и более контрастно выделить границы сликовых образований. Визуальная оценка изменения площади органической пленки по изображению (рис. 3, в) показывает, что за 1 ч площадь загрязненной морской поверхности, по крайней мере, удвоилась.

Подобная разностная схема анализа изображений морской поверхности позволяет выделить и фронтальные области перемещения «кошачьих лапок». На рис. 3, г и д приведены два последовательных, с интервалом 18 с, «разностных» изображения фронтальных областей «кошачьих лапок». По изменению их местоположения за известный межкадровый период может быть выполнена оценка скорости ветра. Для расчета перемещения фронтальных областей мы использовали технику корреляционного анализа двух последовательных «разностных» изображений, позволяющую по корреляционной матрице определить направление и сдвиг изображения фронтальной области «кошачьих лапок». Для того чтобы убедиться, насколько хорошо скорость перемещения «кошачьих лапок» соответствует скорости приводного ветра, были сопоставлены данные измерения скорости ветра с помощью метеостанции, размещенной на заякоренной моторной лодке, и результаты оценки скорости приводного ветра по скорости перемещения «кошачьих лапок». Результаты сопоставления показали, что при скорости ветра от 3 до 7 м/с погрешность измерений средних скоростей приводного ветра по «кошачьим лапкам» не превышает 10%. На рис. 4 приведены результаты

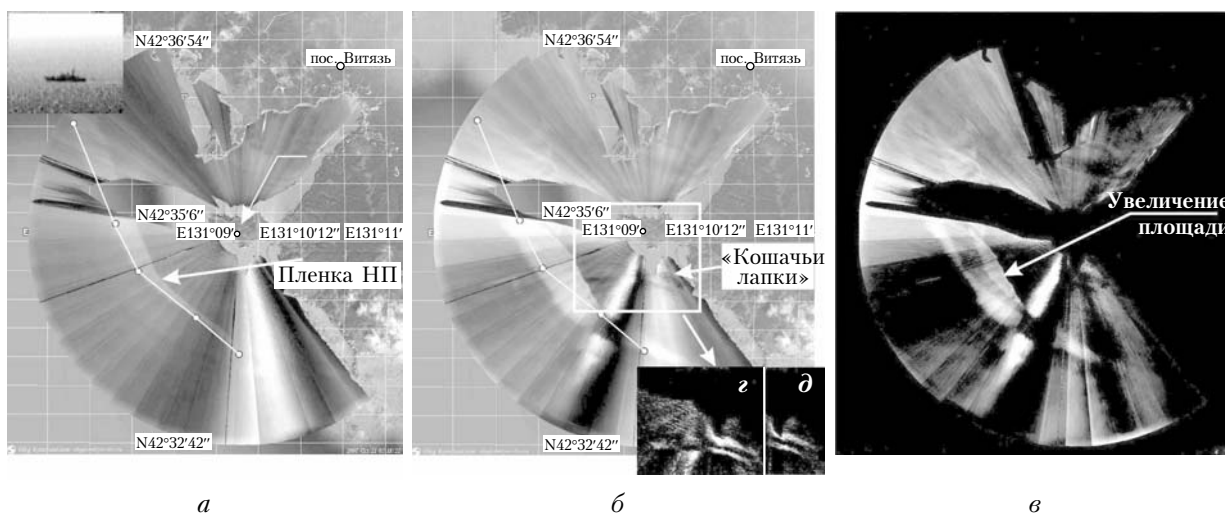


Рис. 3. Регистрация загрязнения 21.10.2007 и результаты обработки

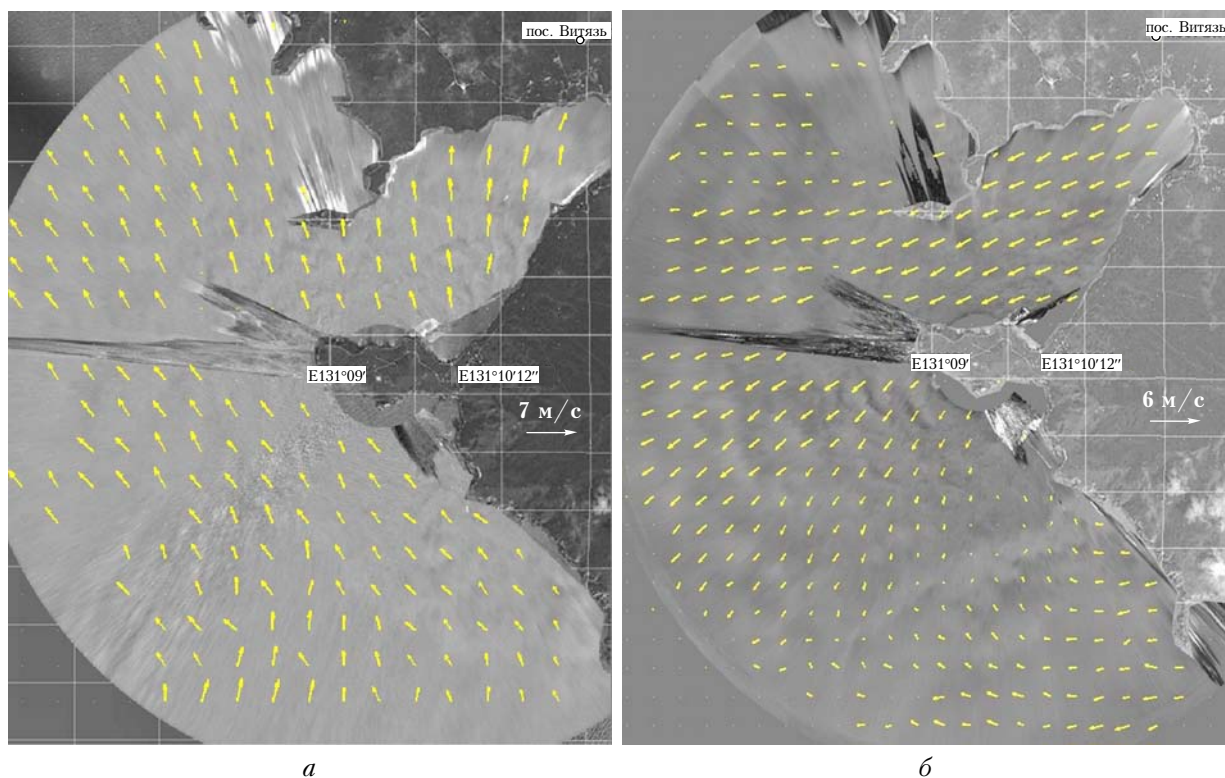


Рис. 4. Результаты восстановления поля ветра над поверхностью моря: *а* – при юго-западном ветре; *б* – при северо-западном ветре

восстановления поля ветра над поверхностью моря при юго-западном (рис. 4, *а*) и северо-западном (рис. 4, *б*) ветре.

Бухта Витязь, где проводились эксперименты, упирается своей кутовой частью в узкий и невысокий перешеек, соединяющий п-ов Гамова с континентом. Крутые берега береговой черты и склоны сопки Туманной (530 м) п-ова Гамова оказывают значительное влияние на ветровой режим прилегающей местности и циркуляцию поверхностных вод. Встречные воздушные потоки с подветренной стороны сопки нередко приводят к разнонаправленному движению поверхностных течений, а в области их конвергенции – к скоплению пленки поверхностно активных веществ (ПАВ), которая на изображении морской поверхности проявляется в виде сликка.

Считается, что наиболее благоприятные условия для регистрации сликков реализуются при ориентации оптической оси камеры 45° (угол визирования) относительно плоскости морской поверхности [8]. При уменьшении угла визирования наблюдается ослабление контраста сликка относительно фоновой морской поверхности вплоть до полного его исчезновения при малых углах вблизи горизонта. Видеосъемка морской акватории под углом 45° к поверхности вполне возможна при проведении работ с борта самолета и практически невозможна при расположении видеосистемы на берегу.

Вполне естественно, что при решении задач мониторинга морских акваторий даже небольших бухт и морских портов панорамная видеосъемка может

проводиться только при значительно меньших углах визирования. Мы провели несколько экспериментов регистрации сликков от искусственных пленок при разливе незначительного количества растительного оливкового масла, которое содержит в себе более 50% олеиновой кислоты, обычно используемой в натуральных экспериментах для имитации пленок ПАВ.

В эксперименте в бухте Витязь были проведены два разлива масла по 50 мл в каждом на расстоянии от места расположения видеосистемы 750 и 1640 м, что соответствует углам визирования 7 и 3° .

В Амурском заливе подобные разливы были выполнены по 100 мл масла на расстояниях 530 и 920 м, что соответствует углам визирования 4,5 и $2,6^\circ$.

Определение яркостного контраста k между пленкой и фоном осуществлялось по формуле

$$k = (\bar{I}_S - \bar{I}_W) / (\bar{I}_S + \bar{I}_W),$$

где \bar{I}_S и \bar{I}_W – средние по ансамблю пикселей значения яркости в области сликка и в его окрестности, равной по площади сликка участка «чистой» водной поверхности соответственно. В единичном измерении контраста k для выделения множества пикселей S , принадлежащих сликку, средствами пакета программ в среде Matlab в интерактивном режиме на изображение сликка накладывалась маска. Применение к бинарному изображению маски ряда простейших морфологических операций увеличения площади (до ее удвоения) без изменения формы

маски позволяет получить новую маску, определяющую множество $S + W$, где W – множество пикселей, принадлежащих фону. Для множеств S и W проводился расчет средних значений яркости пикселей, которые и использовались для расчета контраста. Контраст между сликотом, образованным масляной пленкой, и «чистой» водной поверхностью зависит не только от свойств масляной пленки, но и от состояния морской поверхности, которое определяется в основном скоростью ветра. Скорость ветра в бухте Витязь и Амурском заливе во время регистрации сликотов составляла 6 и 7 м/с соответственно.

Из табл. 2, в которой приведены величины яркостного контраста сликотов при различных углах визирования, видно, что при малых углах визирования контраст падает при уменьшении угла визирования со скоростью 1,2%/град. При сохранении этой тенденции значение нулевой величины контраста достигается при угле визирования 1,5°.

Таблица 2

Зависимость контраста сликот/фон от угла визирования

Место проведения эксперимента	Угол визирования, град	Контраст, %
Бухта Витязь	7	6,6 ± 0,3
	4,2	3,4 ± 0,2
Амурский залив	4,5	3,6
	2,6	1,2

Анализ временной последовательности изображений сликотов ПАВ позволяет проследить эволюцию масляной пленки на морской поверхности и оценить скорости ее перемещения и изменения площади. На рис. 5 приведены изображения сликотов на морской поверхности через интервал времени порядка 45 мин после разлива масла. Крестом обозначено место разлива, а треугольниками – траектории движения передних фронтов сликотов. Цифры над треугольниками указывают время в минутах после разлива.

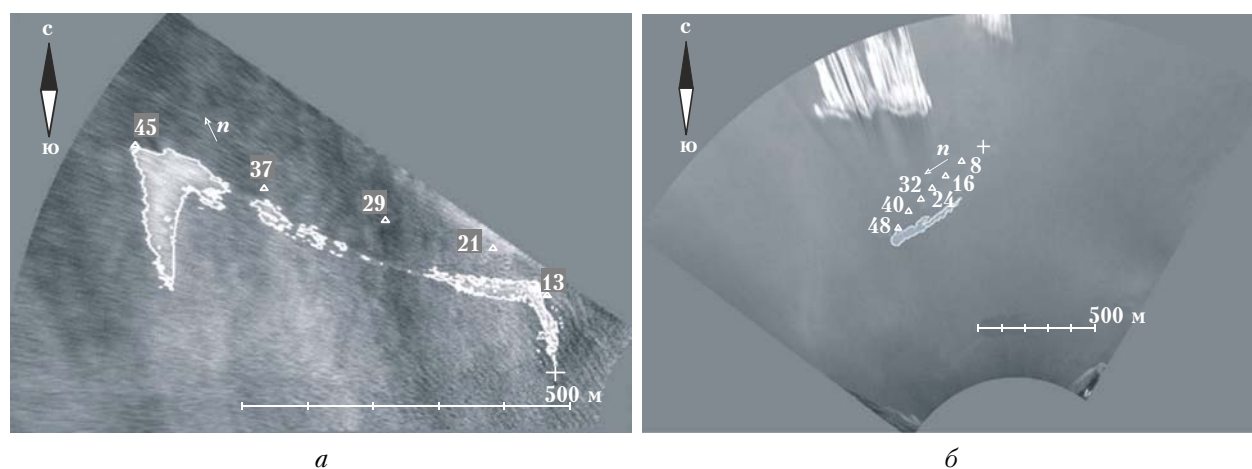


Рис. 5. Изображения сликотов на морской поверхности через 45 мин после разлива масла: *а* – в Амурском заливе (100 мл); *б* – в бухте Витязь (50 мл); *n* – единичный вектор направления ветра; Δ – местонахождение переднего фронта сликота в момент времени, обозначенный цифрами над треугольником (в минутах после разлива)

На рис. 6 приведены графики изменения площади сликота во времени, а в табл. 3 даны основные характеристики проведения эксперимента и параметры, характеризующие динамику сликотных образований.

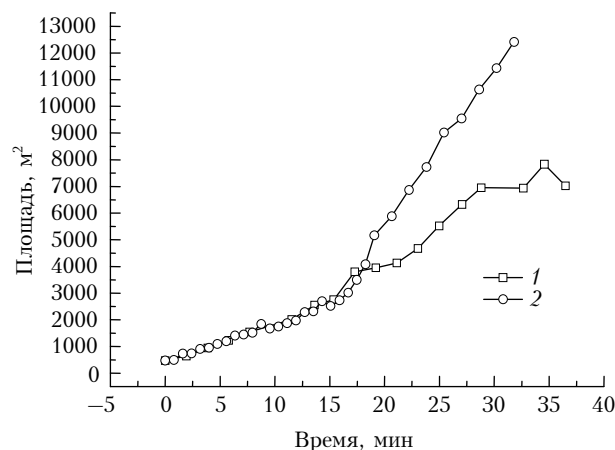


Рис. 6. Динамика изменения площади пятна органической пленки: 1 – бухта Витязь; 2 – Амурский залив

Таблица 3

Характеристика проведения эксперимента

Место проведения эксперимента	Амурский залив	Бухта Витязь
Угол визирования точки разлива, град	6,5	3,2
Скорость ветра, м/с	7	6
Направление ветра, град	168	40
Угол перемещения сликота относительно направления ветра, град	37	18
Скорость изменения площади в первые 15 мин, м²/с	2,25	2,4
Протяженность сликота на 45-й минуте, м	758	350
Всего перемещение переднего фронта на 45-й минуте, м	758	500

Заклучение

Пятилетний срок эксплуатации видеoinформационного комплекса для контроля и оценки состояния поверхности моря на МЭС «м. Шульца» Тихоокеанского океанологического института показал, что панорамная поляризационная видеосистема полезна не только как самостоятельный прибор, позволяющий изучать гидродинамические процессы в верхнем слое океана по их поверхностным проявлениям, но и как средство наведения научных судов на местоположение океанических вихрей и внутренних волн для их детального изучения гидрологической и акустической аппаратурой.

Разработанная поляризационная видеосистема может служить в качестве первого уровня системы мониторинга загрязнений морской поверхности органическими пленками. Она позволяет обнаруживать слики, оценивать их динамические характеристики (изменение пространственных координат, площади, скорости и направления перемещения). Второй уровень оперативного контроля, в задачу которого входит идентификация органических соединений в пленке ПАВ, обеспечивает мобильный флуоресцентный лидар, который способен в радиусе до 100 м уверенно зафиксировать спектр флуоресценции органического вещества, по которому при наличии базы данных эталонных спектров возможна идентификация органических соединений (например, тип нефтепродукта) [16].

Исследования выполнялись с использованием разработанного в ТОИ ДВО РАН видеoinформационного комплекса для контроля и оценки состояния поверхности моря и оборудования, уникальных стендов и установок Центра коллективного пользования «Лазерные методы исследования конденсированных сред, биологических объектов и мониторинга окружающей среды» Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и грантов РФФИ № 10-05-00770а, 11-05-00025а, 11-05-10024к, 11-05-98505-р_восток_а.

1. Букин О.А., Павлов А.Н., Салюк П.А., Голик С.С., Ильин А.А., Бубновский А.Ю. Лазерные технологии исследования океана // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 926–934.
2. Белов М.Л., Белов А.М., Городничев В.А., Козинцев В.И. Лазерный метод контроля тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на измерении первой и второй производных коэффициента отражения // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 568–571.

3. Кульчин Ю.Н., Букин О.А., Константинов О.Г., Вознесенский С.С., Павлов А.Н., Гамаюнов Е.Л., Майор А.Ю., Столярчук С.Ю., Коротенко А.А., Потник А.Ю. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Часть 1. Концепция построения многоуровневых измерительных систем для экологического мониторинга прибрежных акваторий // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 633–637.
4. Нельсон-Смит А. Загрязнение моря нефтью. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 50 с.
5. Обзор результатов мониторинга морского нефтяного месторождения «Кравцовское» (Д-6). Калининград: Изд-во ООО «Лукойл-Калининградморнефть», 2005. 48 с.
6. Спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря. Отчет 2004. Калининград: Изд-во ООО «Лукойл-Калининградморнефть», 2005. 36 с.
7. Жуков Б.С. Поляризационная съемка нефтяных загрязнений водной поверхности // Многозональные аэрокосмические съемки Земли. М.: Наука, 1981. С. 175–188.
8. Филатов В.Н. Выбор параметров визирования телевизионной системы контроля загрязнения водной поверхности // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 43–47.
9. Обухова Н.А. Алгоритмы оценки загрязнения акватории // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 28–34.
10. Вилесов Л.Д. Инвариантное обнаружение нефтяных пленок на водной поверхности по спектральным признакам в системе ТВ-наблюдений // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 56–60.
11. Тимофеев Б.С. Алгоритмы сегментации ТВ-изображений водной поверхности // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 18–27.
12. Астратов О.С. Обнаружение сликов телевизионными методами // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 48–55.
13. Mitnik L., Dubina V., Konstantinov O., Fischenko V., Darkin D. Remote Sensing of Surface Films as a Tool for the Study of Oceanic Dynamic Process // Ocean and Polar Research. 2009. V. 31, N 1. P. 111–119.
14. Смирнов В.М. Обзор методов мониторинга водных поверхностей // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 35–42.
15. Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Гуцин Л.А. Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование // Четвертая Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. тезисов конф. М.: ИКИ РАН, 13–17 ноября 2006 г.
16. Patsayeva S., Yuzhakov V., Varlamov V., Barbini R., Fantoni R., Frassanito C., Palucci A. Laser spectroscopy of mineral oils on the water surface // Proc. EARSel-SIG-Workshop LIDAR. Dresden/FRG, June 16–17, 2000.

O.G. Konstantinov, A.N. Pavlov. Complex monitoring of sea areas by optical methods. Part 2. The sea surface pollution registration.

Optical equipment and methods for operational and comprehensive monitoring of coastal waters are analyzed. The possibility of using shore-based optical systems for mapping and estimating the dynamic characteristics of sea surface pollution is shown. The possibility of near-surface wind velocity evaluation by temporal sequence of panoramic images processing is demonstrated. In addition, the video system can be used for real time direction with the help of mobile Internet of research vessels to coastal zone for studying hydrologic objects of interest (vortices, internal waves, sea surface pollution, etc.).