

Об оценке вклада приводного ветра в кинематику сликов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения

И. А. Капустин, А. В. Ермошкин, Н. А. Богатов, А. А. Мольков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

Исследование распространения плёночных загрязнений (сликов) на поверхности водоёмов представляет особый интерес для обеспечения экологической безопасности районов интенсивного судоходства, в первую очередь прибрежных акваторий морей и внутренних водных путей. Диагностика загрязнений на ранних стадиях и их оперативный мониторинг позволяют существенно сократить затраты на ликвидацию последствий разлива и снизить возможные экологические риски. В настоящей статье исследуется кинематика искусственных плёночных сликов на взволнованной водной поверхности по данным натурных измерений на Горьковском водохранилище и в прибрежной зоне Чёрного моря. Наблюдения проводились с использованием цифровой когерентной радиолокационной станции кругового обзора, обладающей высоким пространственным разрешением. В работе предложен алгоритм обработки радиолокационных панорам и статистически проанализирован процесс движения сликов в измеренном поле приводного ветра и течения при различных гидрометеорологических условиях. В экспериментах для создания сликов использовались различные экологически безопасные поверхностно-активные вещества: олеиновая кислота и растительные масла, обладающие известными характеристиками и имитирующие небольшие судовые разливы загрязняющих веществ с судов. На основе анализа пространственной динамики сликов показано, что они в основном движутся по течению, а наиболее вероятный вклад ветрового дрейфа в скорость их движения составляет от 2,5 до 3 % от скорости приводного ветра. Данный результат находится в соответствии с общепринятыми представлениями о распространении поверхностно-активных плёнок морской поверхности, хотя и имеет несколько меньшие значения, что, предположительно, обусловлено влиянием на дрейф ограниченных ветровых разгонов в прибрежной зоне моря и во внутренних водоёмах, где были проведены измерения. С помощью полученных результатов продемонстрирована возможность оценки скорости приповерхностных течений на основе наблюдений движения сликов панорамными радиолокаторами.

Ключевые слова: плёночные слики, радиолокационное зондирование, течения

Одобрена к печати: 20.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172

Введение

Исследование распространения плёночных загрязнений (сликов) на поверхности водоёмов представляет особый интерес для обеспечения экологической безопасности районов интенсивного судоходства, в первую очередь прибрежных акваторий морей и внутренних водных путей. Диагностика загрязнений на ранних стадиях и их оперативный мониторинг позволяют существенно сократить затраты на ликвидацию последствий разлива и снизить возможные экологические риски.

Хотя определение толщины и состава плёнки загрязняющего вещества преимущественно осуществляется с помощью контактных методов, обнаружение факта загрязнения, оценка пространственных масштабов разлива, его перемещения в пространстве наиболее эффективны с помощью методов дистанционного зондирования, в том числе спутниковых (Лаврова и др., 2016).

Определёнными преимуществами среди множества приборов дистанционного зондирования для решения данной задачи обладает радиолокатор кругового обзора, работающий в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне и установленный на свайном основании: на судне в море или на возвышении на берегу. Благодаря высокому пространственному и временному

разрешению радиолокационных панорам водной поверхности удаётся обнаруживать плёночные слики на ранних стадиях и отслеживать их изменчивость во времени и пространстве (Ермошкин, Капустин, 2015).

В частности, ранее использование данного подхода позволило обнаружить и описать новый эффект трансформации формы плёночного слика: остановку процесса растекания пятна, последующее его сжатие и переход к стационарному состоянию (Ермаков и др., 2017). В указанном эксперименте изучалась эволюция пятна плёнки поверхностно-активного вещества (ПАВ) с заранее исследованными в лабораторном эксперименте характеристиками (плёнка олеиновой кислоты).

В настоящей работе внимание уделяется не катастрофическим разливам, как, например, при авариях на нефтяных платформах или танкерах, а локальным сбросам льяльных вод с судов, поскольку, с одной стороны, их обнаружение зачастую затруднительно в силу малости масштабов пятен, с другой, такие загрязнения имеют массовый характер как в прибрежной зоне моря, так и на внутренних водных путях, а экологические риски, сопряжённые с такими загрязнениями, могут быть весьма значительными (Лаврова и др., 2016). В свою очередь, судовые сбросы можно условно разделить на два класса: сбросы во время движения судов и точечные сбросы с неподвижных судов (кратковременные сбросы с движущихся). В обоих случаях при не слишком сильных ветрах на радиолокационных изображениях пятна проявляются как аномалии на фоне общей структуры изображения. При протяжённом во времени сбросе с движущегося судна разлив загрязняющего вещества в отсутствие сильного ветра, волнения и течений проявляется на радиолокационных изображениях в виде узкой сликовой полосы с пониженной интенсивностью радиолокационного сигнала, обусловленной гашением коротковолновой части спектра ветрового волнения, повторяющей маршрут движения судна. В случае же точечного разлива растекание нефтяной плёнки в указанных выше условиях происходит более или менее равномерно во все стороны, поэтому пятно принимает округлую форму. Наличие ветра, волнения и неоднородных течений будет оказывать существенное влияние на форму и структуру слика (Лаврова, Митягина, 2012).

На радиолокационных изображениях взволнованной водной поверхности слики видны из-за гашения веществом плёнки коротковолновой части спектра ветрового волнения (Ермаков, 2010), а форма сликов может являться одним из информативных признаков при их идентификации. Отдельные работы посвящены анализу формы плёночных сликов на основе данных спутниковых радиолокационных изображений сбросов загрязняющих веществ с судов (Ермаков и др., 2016). Установлено, что слики характеризуются вытянутой формой, причём отношение продольного по отношению к направлению ветра и поперечного размеров пятен оказывается довольно близким для различных сликов, т.е. слабо зависит от характеристик плёнок и времени их растекания, и значительно возрастает с ростом скорости ветра (Ермаков и др., 2010).

В настоящей работе представлены результаты анализа данных выполненных ранее экспериментов с искусственными сликами. В продолжение экспериментов по исследованию процесса растекания плёночных сликов (Ермошкин, Капустин, 2015) были одновременно получены яркостные и скоростные панорамы водной поверхности, которые содержали пятна разной формы и масштаба, состоящие из различных экологически безопасных веществ, имитирующие плёночные загрязнения, и проведены синхронные измерения скорости и направления приповерхностного течения и приводного ветра, температуры воды и воздуха. В ходе анализа радиолокационных панорам рассмотрен процесс перемещения сликов под действием приповерхностного течения и ветрового дрейфа при различных скоростях приводного ветра. Проведён статистический анализ данных наблюдений движения сликов в поле ветра и течения.

Эксперименты

Серии натуральных экспериментов с искусственными сликами были проведены на Черноморском гидрофизическом полигоне Российской академии наук (ЧГП РАН) в 2017–2018 гг. и на Горьковском водохранилище в 2018 г. Последовательные радиолокационные панорамы были получены с использованием цифровой когерентной радиолокационной станции (РЛС) MRS-1000 (производство НПО «Микран», Томск), установленной на маяке аванпорта Горьковского водохранилища или на крыше стационарной океанографической платформы ЧГП РАН (СОП). РЛС работает в X-диапазоне на горизонтальной поляризации на излучение и приём. Метеорологическая обстановка фиксировалась при помощи метеостанции Vantage Pro 2 Davis Instruments или с использованием ультразвукового анемометра WindSonic. Измерения скорости ветра в разных экспериментах производились на высоте 10, 17 и 25 м с последующим пересчётом на стандартную высоту 10 м. Скорость и направление течения по глубине на горизонтах от 1 до 25 м с шагом 0,5 м восстанавливались по данным акустического доплеровского профилографа ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz, установленного на СОП или на моторной лодке. Разлив поверхностно-активных веществ (ПАВ) с известными характеристиками плёнки (Ермаков, 2010), которыми являлись чистая олеиновая кислота (OLE), спиртовой раствор олеиновой кислоты (OLE + C₂H₅OH в объёмных долях) или растительное масло (VO), осуществлялся на расстоянии до 1 км от места установки РЛС с моторной лодки или плавучей лаборатории «Геофизик», в отдельных экспериментах разлив ПАВ проводился непосредственно с СОП. Номер эксперимента, тип разлитого вещества и его объём, а также усреднённые гидрометеорологические данные в момент проведения эксперимента приведены в *таблице*.

Параметры эксперимента

Номер эксперимента	Вещество слика / объём вещества, л	Скорость ветра U , м/с / направление ветра	Скорость течения u , см/с / направление течения	Температура воздуха T_a , °C / температура воды T_w , °C
1	OLE/0,2 + C ₂ H ₅ OH/0,3	4–5/ЮЗЗ	5/ЮЮВ	17,5/16,5
2	OLE/0,3	3/СЗЗ	10/ЮЗЗ	13,2/12,2
3	OLE/0,3	3/В	20/3	15,8/16,6
4	OLE/0,25	9/В	20/ЮЗЗ	19/16,7
5	OLE/0,25	5/СВВ	25/ЮЗЗ	20,6/17
6	OLE/0,25	5/СВВ	25/ЮЗЗ	20,8/17
7	OLE/0,25	4/СВВ	25/ЮЗЗ	21/17
8	OLE/0,5 + C ₂ H ₅ OH/0,5	10–11/3	5/ЮВ	17/13
9	VO/1	10–11/3	5/ЮВ	17/14
10	OLE/0,5 + C ₂ H ₅ OH/0,5	6–10/В	5/СЗЗ – 15/Ю	21/22
11	OLE/1	8/СЗЗ	20/ЮЗЗ	–/17,6
12	OLE/1	8/СЗЗ	20/ЮЗЗ	–/18
13	OLE/0,075 + C ₂ H ₅ OH/0,2	2/СВВ	27/ЮЗЗ	–/19,7
14	OLE/0,25 + C ₂ H ₅ OH/0,75	3/СВВ	27/ЮЗЗ	–/19,7
15	OLE/0,25 + C ₂ H ₅ OH/0,75	6/С	27/ЮЗЗ	–/19,8
16	OLE/0,5 + C ₂ H ₅ OH/0,5	3/ЮВВ	20/ЮЗЗ	–/20,3
17	OLE/0,5 + C ₂ H ₅ OH/0,5	3/ЮВВ	18/ЮЗЗ	–/20,2
18	VO ₂ /0,3	12/В	10–20/ЮЗЗ	–/19
19	OLE/0,3	9/В	10–20/ЮЗЗ	–/19
20	VO ₂ /0,3	6/СВВ	10–20/ЮЗЗ	–/19

Было проведено более 10 экспериментов с разливом 20 сликов различных типов. В частности, использовались три типа спиртовых растворов OLE с разным объёмным содержанием олеиновой кислоты (25–75 %), три марки растительного масла и чистая OLE. Объём разливаемого на водную поверхность ПАВ составлял до 1,5 л на один слик. Скорость ветра варьировалась в пределах 3–12 м/с, скорость течения на глубине 0,5–1,5 м составляла 5–27 см/с.

В зависимости от поставленной в конкретном эксперименте задачи, гидрометеорологических условий и объёма разливаемого вещества применялось несколько методик нанесения ПАВ на морскую поверхность. Для исследования процесса растекания слики создавались точечным одномоментным выливанием фиксированного объёма вещества, составляющего 0,25–0,3 л. Для изучения влияния течений на слик создавались пятна большего масштаба путём растянутого по времени разлива вещества при движении лодки по спирали или сликовые полосы при движении лодки по прямой, объём ПАВ составлял 0,5–1,5 л. При этом удавалось минимизировать стадию растекания и получить слик в «стационарном» состоянии.

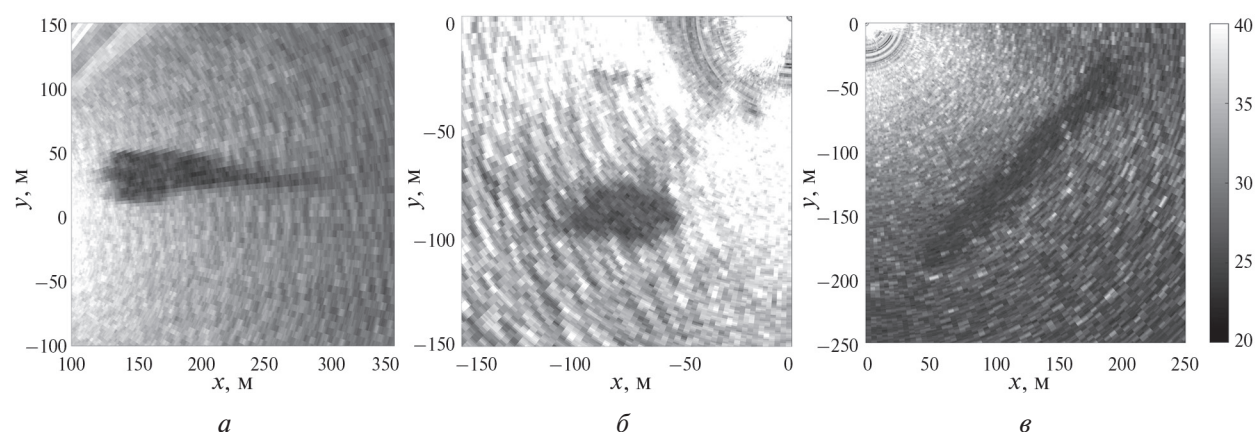


Рис. 1. Радиолокационные изображения морской поверхности с искусственными сликами: *a* — точечный разлив (эксперимент № 4); *б* — разлив по спиральной траектории лодки (эксперимент № 12); *в* — разлив полосы (эксперимент № 17)

Типичные радиолокационные снимки искусственных сликов, снятые с помощью MRS-1000, представлены на рис. 1. Для получения этих изображений проводилось усреднение радиолокационных данных за 1 мин при скорости вращения антенны 25 об/мин с помощью метода геометрического среднего (Кориненко и др., 2017). При такой обработке снижается «шумовая» характеристика изображения: уменьшается спекл-шум и сглаживается волнение, в результате чего область слика становится хорошо различима. Снимки представлены в декартовой системе координат, радиолокационная станция MRS-1000 находится в точке с координатами (0, 0), по осям отложено расстояние в метрах. Область слика характеризуется пониженным уровнем радиолокационного рассеяния на взволнованной водной поверхности по сравнению с фоновым уровнем. Приведённые изображения отвечают различным методикам нанесения ПАВ на морскую поверхность, а именно: рис. 1а — точечный разлив, рис. 1б — разлив по спирали, рис. 1в — разлив полосы в поперечном к ветру направлении. Временные серии имеющихся в базе данных последовательных радиолокационных изображений предоставляют возможность изучать временную динамику геометрических размеров сликов, исследовать особенности формы сликовых пятен и анализировать параметры перемещения сликовых структур и радиолокационные контрасты в них. Высокое пространственное разрешение радиолокационных панорам позволяет анализировать особенности тонкой структуры искусственных разливов, например образование гребенчатой структуры на подветренной границе слика при сравнительно сильных ветрах (Ермаков и др., 2018). Полученные радиолокационные изображения сликов, а также сопутствующая гидрометеорологическая информация были объединены в общую базу данных.

Обработка и анализ данных

В настоящей работе для определения параметров движения пятна ПАВ проводилась следующая обработка данных:

- 1) формировались временные серии радиолокационных изображений взволнованной водной поверхности с искусственными сликами (см. *рис. 1*) за время наблюдения каждого из 20 сликов (см. *таблицу*) в декартовой системе координат с центром в месте расположения радиолокатора;
- 2) в результате обработки радиолокационных изображений создавалась база данных контуров сликов в декартовой системе координат (*рис. 2*, см. с. 168);
- 3) при обработке массива контуров определялись координаты центра тяжести пятна (x, y) и компоненты скорости перемещения его центра масс в различные моменты времени.

На *рис. 2a* представлен пример обработки данных эксперимента с точечным разливом ПАВ (см. *рис. 1a*). Ось абсцисс совпадает с направлением на восток, ось ординат — на север. Наблюдается движение пятна ПАВ в течение 40 мин со средней скоростью около 40 см/с (слева направо). Видно, что слик вытянут по ветру, который дует с восточного направления, а движение центра тяжести пятна происходит в западном направлении с небольшим отклонением к югу. Скорость и направление ветра, температура воды и воздуха за время наблюдения слика с 11:00 до 12:00 приведены на *рис. 2б*. Профили скорости и направления течения по глубине за этот же период представлены на *рис. 2в*.

Для определения характера зависимости скорости дрейфа слика от скоростей ветра и течения в приповерхностном слое 0,5–1,5 м и в слое на глубине 4–5 м был подготовлен массив данных, содержащий (x, y) компоненты скорости дрейфа слика u_s , скорости течения u_c и скорости ветра u_w . Глубины слоёв, в которых усреднялись течения, выбраны из следующих соображений. В приповерхностном слое ADCP измеряет суммарный вклад части ветроволнового дрейфа и фоновой скорости течения, в то время как на глубине 4–5 м вкладом ветроволнового дрейфа обычно пренебрегают. Это позволяет оценивать «чистый» вклад ветра в скорость дрейфа слика. На *рис. 3a, б* (см. с. 169) приведены двумерные гистограммы, по оси абсцисс которых отложена компонента скорости ветра, по оси ординат — разность скорости дрейфа слика и скорости течения по компонентам в приповерхностном слое 0,5–1,5 м и в слое на глубине 4–5 м соответственно. Приведённые данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью $y = nx$ с коэффициентом пропорциональности $n = 0,025$ (для 95%-го доверительного интервала n лежит в диапазоне 0,022–0,028) при измерении течения в приповерхностном слое до 1,5 м и $n = 0,03$ (для 95%-го доверительного интервала n лежит в диапазоне 0,025–0,035) при измерении течения на глубине 4–5 м. При этом достигается наибольший коэффициент корреляции $r = 0,85$ при среднеквадратичной ошибке (СКО) 6 см/с (см. *рис. 3a*) и коэффициент корреляции $r = 0,79$ при СКО 9 см/с (см. *рис. 3б*). Таким образом, скорость

дрейфа слика можно описать следующей зависимостью: $u_s^{x,y} = \begin{pmatrix} 0,025u_w^{x,y} + u_c^{x,y(1)} \\ 0,03u_w^{x,y} + u_c^{x,y(5)} \end{pmatrix}$, где $u_c^{x,y(1)}$ и $u_c^{x,y(5)}$ — компоненты скорости течения на глубине 0,5–1,5 и 4–5 м соответственно, $u_w^{x,y}$ — компоненты скорости ветра.

Естественно связать скорость движения слика с дрейфовыми течениями, генерируемыми ветроволновым полем. В работе (Wu, 1975) в результате лабораторного эксперимента было установлено, что ветер генерирует дрейфовые течения величиной 3,5–5 % от значения скорости ветра. В исследовании (Fingas, 2017) указывается, что при распространении нефтяного загрязнения на поверхности моря ветер добавляет 3 % своей величины к скорости движения нефтяного пятна. Такие соотношения используются при моделировании динамики пятна ПАВ в натуральных условиях (см. также (Журбас, 1978)). Результаты настоящей работы демонстрируют несколько меньший, хотя и близкий, вклад ветра в скорость дрейфа слика. Из *рис. 3б* получено значение $n = 3$ %. Следует отметить, что данный результат выведен для прибрежных районов морей и внутренних водоёмов, для которых характерен ограниченный

разгон ветрового волнения и, предположительно, меньший вклад генерируемого волнами поверхностного дрейфа (Wu, 1975). Также выяснено, что скорость дрейфа слика явно не зависит от типа разлива — точечного или полосового, характеристик плёнки и объёма ПАВ при используемых малых объёмах вещества.

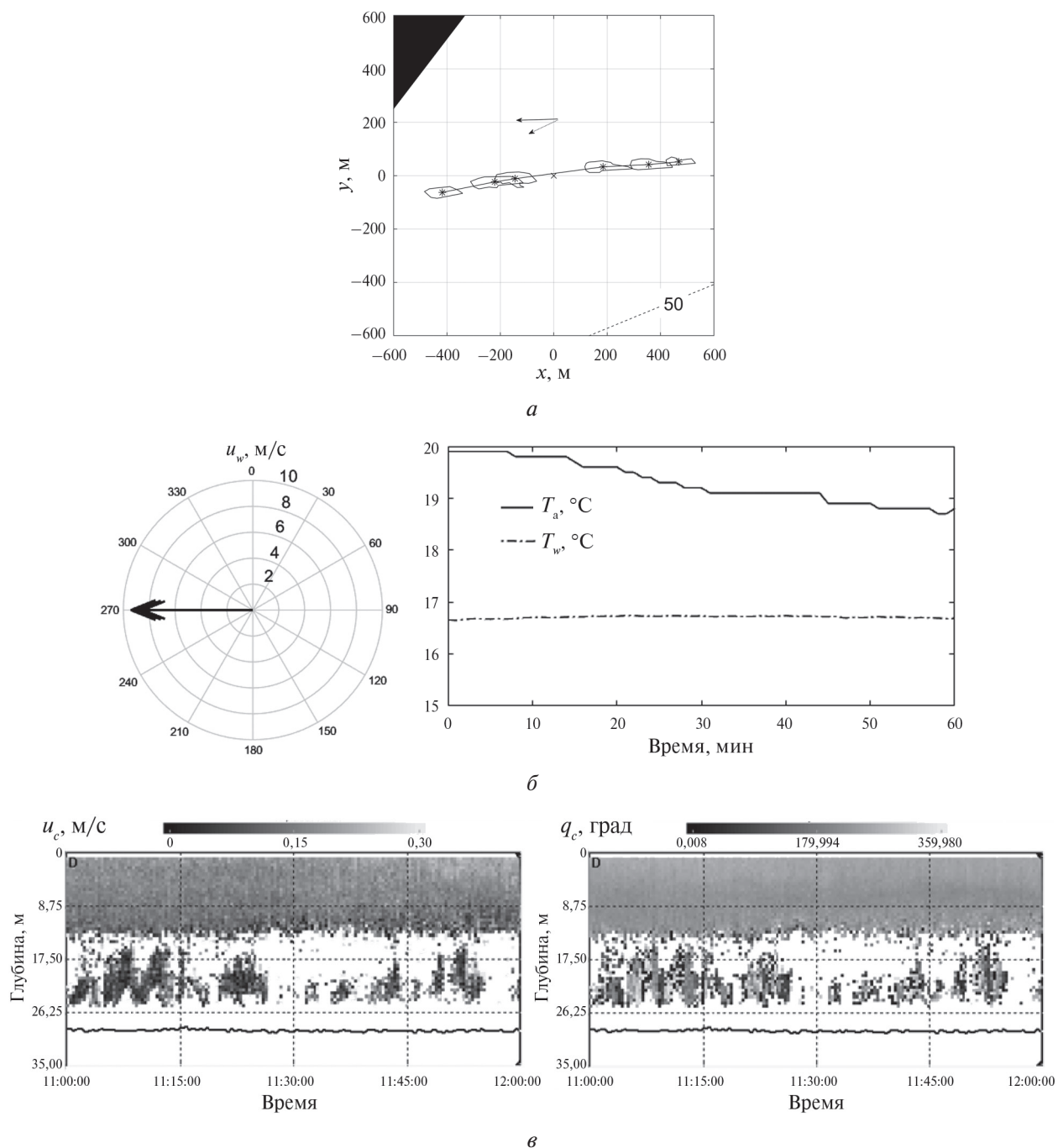


Рис. 2. Элемент базы данных эксперимента № 4: *a* — пример обработки радиолокационных панорам: сплошные замкнутые линии — контуры слика в моменты времени 11:21, 11:27, 11:34, 11:49, 11:53, 12:00 (слева направо), * — положение центра масс слика, сплошная линия — траектория движения центра масс слика, сплошная стрелка — направление ветра, пунктирная стрелка — направление поверхностного течения, пунктир в нижнем правом углу — изобата 50 м, сплошная заливка в верхнем левом углу — берег; *b* — скорость и направления ветра u_w (слева), температура воды T_w и воздуха T_a (справа); *c* — контуры скорости течения u_c (слева) и направления течения q_c (справа)

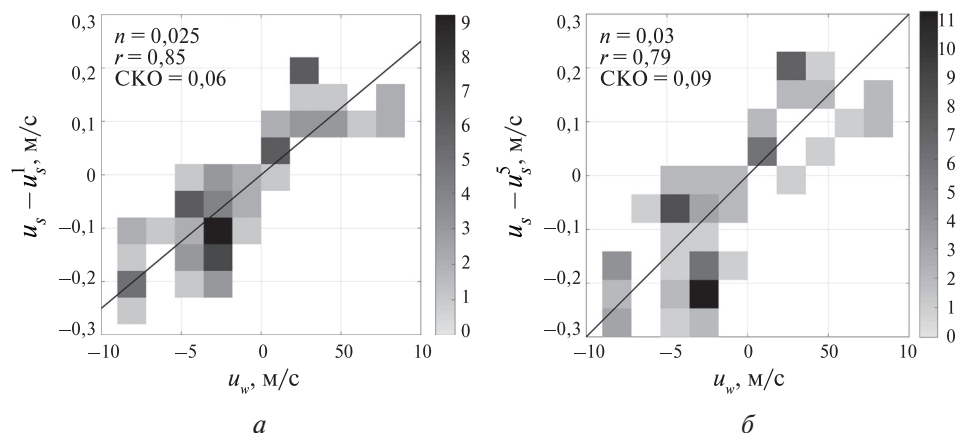


Рис. 3. Статистический анализ данных: двумерные гистограммы разности скоростей дрейфа слика и течения на глубине 0,5–1,5 м (а) и 4–5 м (б) от скорости ветра. Градации серого соответствует количество наблюдаемых случаев. Прямая линия — линейная интерполяция

Хотелось бы отдельно отметить статью (Малиновский и др., 2007), посвящённую натурным экспериментам, проведённым в районе СОП, которая нацелена в том числе на исследование дрейфа плёночных сликов. В описанных экспериментах «глубоководное» течение измерялось на горизонте 5 м с использованием плавучих дрейфтеров, а данные о приповерхностных течениях не анализировались. Результаты измерений, также как и в данной работе, показывают меньший вклад приводного ветра в скорость дрейфа тонких поверхностных плёнок, хотя и несколько другие значения: $n \approx 1,3\%$. Как продемонстрировано в настоящей работе, величина вклада ветра в скорость дрейфа слика n существенно зависит от горизонта, на котором проводились измерения скорости течения, и чем больше в измеряемое течение вносит вклад ветроволновой дрейф, тем меньше оказывается n . Полученные результаты указывают на возможность оценки скорости и направления приповерхностного течения по движению плёночных сликов, при этом с учётом среднеквадратичных ошибок, полученных по экспериментальным данным, ошибка оценки скорости течения составляет порядка 6 см/с на глубине 1 м и 9 см/с на глубине 5 м. Анализ экспериментальных данных показал необходимость измерения течения в тонком приповерхностном слое, что предполагается сделать в последующих экспериментах со сликами.

Заключение

На основе имеющихся архивных данных измерений и результатов новых экспериментов исследованы некоторые аспекты динамики искусственных плёночных образований на радиолокационных панорамах взволнованной водной поверхности. Произведена обработка и систематизация имеющихся данных, а также дополнение радиолокационных панорам сопутствующей гидрометеорологической информацией и оптическими изображениями.

В результате анализа экспериментальных данных показано, что движение слика определяется совокупностью влияния течения и ветроволнового дрейфа, составляющей в условиях ограниченных разгонов 2,5–3 % от величины скорости приводного ветра. Полученный результат находится в согласии с имеющимися представлениями, используемыми для анализа спутниковой информации. Несколько меньший вклад ветроволнового дрейфа в скорость движения слика по сравнению с рекомендуемыми для расчётов значениями, однако, может существенно сказаться на прогнозировании распространения загрязнений, что как раз особенно важно в условиях прибрежной зоны и во внутренних водоёмах, где вынос загрязнения на берег представляет основную опасность.

Полученные результаты указывают на возможность оценки скорости и направления приповерхностного течения на основе анализа кинематики сликовых образований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-45-520018 p_a (экспериментальные исследования динамики плёночных загрязнений в акватории Горьковского водохранилища в мае – июле 2018 г.) и проекта РНФ № 18-77-10066 (обработка и теоретический анализ выполненных ранее наблюдений сликовых структур в прибрежной зоне Чёрного моря в части анализа проявления приповерхностных течений в динамике искусственных сликов).

Литература

1. *Ермаков С. А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 163 с.
2. *Ермаков С. А., Сергиевская И. А., Капустин И. А., Макаров Е. В., Малиновский В. В., Кориненко А. Е.* Растекание и дрейф пленок в поле ветра и течений. Натурные эксперименты с океанографической платформы МГИ НАНУ // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 21. С. 117–123.
3. *Ермаков С. А., Лаврова О. Ю., Капустин И. А., Макаров Е. В., Сергиевская И. А.* Исследование особенностей геометрии пленочных сликов на морской поверхности по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 97–105.
4. *Ермаков С. А., Ермошкин А. В., Капустин И. А.* Об эффекте сжатия пленочного слика // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 288–294.
5. *Ермаков С. А., Лаврова О. Ю., Капустин И. А., Ермошкин А. В., Мольков А. А., Даниличева О. А.* О гребенчатой структуре границ сликов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 208–217.
6. *Ермошкин А. В., Капустин И. А.* Исследование особенностей растекания пленок поверхностно-активных веществ на поверхности внутренних водоемов морским навигационным радиолокатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 136–142.
7. *Журбас В. М.* Основные механизмы распространения нефти в море // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. 1978. Т. 12. С. 144–159.
8. *Кориненко А. Е., Малиновский В. В., Кудрявцев В. Н.* Радиолокационные контрасты искусственных сликов при скользящих углах зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 185–194.
9. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
10. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.
11. *Малиновский В. В., Дулов В. А., Кориненко А. Е., Большаков А. Н., Смолов В. Е.* Натурные исследования дрейфа искусственных тонких пленок на морской поверхности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 117–127.
12. *Fingas M.* Introduction to Oil Spill Modeling // Oil Spill Science and Technology. 2nd ed. Ch. 8. Gulf Publishing Company, 2017. P. 419–454. DOI: 10.1016/B978-0-12-809413-6.00008-4.
13. *Wi J.* Wind-induced drift currents // J. Fluid Mechanics. 1975. V. 68. Iss. 1. P. 49–70.

On the estimation of the contribution of near-surface wind to the kinematics of slicks on the sea surface under conditions of finite wave fetch

I. A. Kapustin, A. V. Ermoshkin, N. A. Bogatov, A. A. Molkov

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

The study of the movement of film pollutions (slicks) on the surface of water bodies is of particular interest for ensuring the environmental safety of intensive navigation areas, primarily the sea coastal zones and inland waterways. Diagnostics of pollution at the early stages and their quick monitoring can significantly reduce the cost of eliminating the consequences of a spill and reduce possible environmental risks. In this article the kinematics of artificial film slicks on wavy water surface during the field experiments on the Gorky Reservoir and in the coastal zone of the Black Sea is explored. The observations were carried out using a digital coherent circular viewing radar with high spatial resolution. The paper proposes an algorithm for processing radar panoramas and statistically analyzes the process of the movement of slick spots in the measured drive wind field and currents under various hydrometeorological conditions. During the experiments, various environmentally friendly surfactants were used to create slicks: oleic acid and vegetable oils, which have known characteristics and simulate small spills of pollutants from ships. In the analysis of the spatial dynamics of the slicks, it was shown that the slicks mainly move downstream, and the most likely contribution of wind drift to their speed is from 2.5 to 3 % of the speed of the driving wind. This result is in accordance with generally accepted ideas about the movement of surface-active films on the sea surface, although it has somewhat smaller values, which is presumably due to the influence on the drift of limited wind fetch in the coastal zone of the sea and in the inland waters where the measurements were made. The slightly smaller contribution of the wind-wave drift to the speed of the slick as compared to the values recommended for the calculations (components of the order of 3–5 % of the wind speed according to various data) can have a significant effect in predicting the motion of oil pollution. This is especially important in the coastal zone and in inland waters, where the carrying of pollution to the shore constitutes the main danger. Based on the obtained results, the possibility of estimating the speed of surface currents on the basis of observations of the slick movement by panoramic radars was analyzed. The obtained results are important for remote monitoring of currents in the sea coastal zones and on inland waters.

Keywords: film slicks, radar probing, currents

Accepted: 20.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172

Reference

1. Ermakov S. A., *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (The effect of films on the dynamics of gravity-capillary waves), Nizhny Novgorod: IPF RAN, 2010, 163 p.
2. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Kapustin I. A., Makarov E. V., Malinovskiy V. V., Korinenko A. E., *Rastekanie i dreif plenok v pole vetra i techenii. Naturnye eksperimenty s okeanograficheskoi platformy MGI NANU* (The spreading and drift of films in the field of wind and currents. Field experiments on the oceanographic platform of the MGI NASU), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2010, No. 21, pp. 117–123.
3. Ermakov S. A., Lavrova O. Yu., Kapustin I. A., Makarov E. V., Sergievskaya I. A., *Issledovaniya osobennosti geometrii plenochnykh slikov na morskoi poverkhnosti po dannym sputnikovyykh nabludenii* (Investigation of geometry of film slicks on the sea surface from satellite radar observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 97–105.
4. Ermakov S. A., Ermoshkin A. V., Kapustin I. A., *Ob effekte szhatiya plenochnogo slika* (On the effect of film slick compression), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 288–294.
5. Ermakov S. A., Lavrova O. Yu., Kapustin I. A., Ermoshkin A. V., Mol'kov A. A., Danilicheva O. A., *O grebenchatoi strukture granits slikov na morskoi poverkhnosti* (On a “comb” structure of the edges of slicks on the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 208–217.

6. Ermoshkin A. V., Kapustin I. A., Issledovanie osobennostei rastekaniya plenok poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na poverkhnosti vnutrennikh vodoemov morskim navigatsionnym radiolokatorom (Investigation of surfactant spreading over the surface of internal fresh-water reservoir using marine navigation radar), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 136–142.
7. Zhurbas V. M., Osnovnye mekhanizmy rasprostraneniya nefi v more (The main mechanisms of the spread of oil in the sea), *Itogi nauki i tekhniki. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1978, Vol. 12, pp. 144–159.
8. Korinenko A. E., Malinovsky V. V., Kudryavtsev V. N., Radiolokatsionnye kontrasty iskusstvennykh slikov pri skol'zyashchikh uglakh zondirovaniya (Radar contrast of artificial slicks at small grazing angles), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 185–194.
9. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sputnikovyi monitoring plenochnykh zagryaznenii poverkhnosti Chernogo morya (Satellite Monitoring of Surface Film Pollution of the Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 48–65.
10. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody vyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 334 p.
11. Malinovsky V. V., Dulov V. A., Korinenko A. E., Bol'shakov A. N., Smolov V. E., Naturnye issledovaniya dreifa iskusstvennykh tonkikh plenok na morskoj poverkhnosti (On-Site Investigations of the Drift of Artificial Thin Films on the Sea Surface), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2007, Vol. 43, No. 1, pp. 117–127.
12. Fingas M., Introduction to Oil Spill Modeling, In: *Oil Spill Science and Technology*, 2nd ed., Chapter 8, Gulf Publishing Company, 2017, pp. 419–454, DOI: 10.1016/B978-0-12-809413-6.00008-4.
13. Wu J., Wind-induced drift currents, *J. Fluid Mechanics*, 1975, Vol. 68, Issue 1, pp. 49–70.