# О динамике искусственной сликовой полосы в прибрежной зоне Чёрного моря

# О.В. Шомина<sup>1</sup>, И.А. Капустин<sup>1,2</sup>, А.В. Ермошкин<sup>1</sup>, С.А. Ермаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия <sup>2</sup> Волжский государственный университет водного транспорта Нижний Новгород, 603950, Россия E-mails: seamka@yandex.ru, kapustin-i@yandex.ru

Известно, что плёночные слики на морской поверхности могут отражать различные геофизические процессы в верхнем слое океана и в атмосфере. Полосовые сликовые структуры, проявляющиеся на радиолокационных изображениях морской поверхности при слабых и умеренных скоростях ветра, обычно ассоциируют с морскими течениями. В настоящей работе представлены результаты первых экспериментов по исследованию динамики искусственной сликовой полосы в поле морского течения и ветра. Показано, что вклад ветра в направление распространения сликовой полосы может быть существенным, а на определённых этапах динамики полосы влиянием эффектов растекания поверхностно-активных веществ можно пренебречь. Для этих квазистационарных участков сликовой полосы исследовано эмпирическое соотношение между шириной полосы и расчётной скоростью поверхности. Преимуществом развиваемого подхода является возможность получения информации о пространственной структуре скорости поверхности вдоль сликовой полосы на основе данных о её форме и гидрометеорологических измерений в любой её точке. Предлагаемый метод может оказаться эффективным при верификации данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: морские течения, сликовая полоса, морская поверхность, поверхностно-активные вещества

Одобрена к печати: 05.06.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-222-232

### Введение

Использование методов дистанционного, в том числе спутникового, зондирования океана открывает большие возможности как для мониторинга экологического состояния акваторий, так и для обнаружения и исследования различных океанических процессов. Начиная с середины 1990-х гг., когда был описан эффект концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ) в областях струйных течений (Ochadlick et al., 1992), локализация ПАВ, наблюдаемая на изображениях морской поверхности в виде тёмных полос, часто априорно связывается со структурой приповерхностных течений. В частности, при анализе динамики мезомасштабных и субмезомасштабных вихревых структур заранее полагается, что полосы ПАВ маркируют тонкую внутреннюю структуру течений в вихре (Ivanov, Ginzburg, 2002; Lavrova et al., 2012). Несмотря на широкое распространение в литературе этого предположения, однозначная связь геометрии плёночных сликов со структурой течений в приповерхностном слое пока не может считаться надёжно обоснованной экспериментально. Так, исследования структуры поверхностных течений на основе последовательных изображений радиолокатора с синтезированной апертурой (PCA) одного и того же участка морской поверхности (Marmorino et al., 2008) выявили, наряду со схожими особенностями, также и ряд расхождений поля скорости течений и геометрии сликов. Это позволяет заключить, что физические процессы формирования сликовых полос пока до конца не изучены и требуются, в частности, данные новых специальных наблюдений.

В этой связи можно отметить работы (Лаврова и др., 2015, 2016; Lavrova, Sabinin, 2016; Lavrova et al., 2012, 2013), где в ходе натурных измерений пространственной структуры течений, квазисинхронных со спутниковыми радиолокационными (РЛ) наблюдениями морской поверхности, выявлено образование сликовой полосы на границе противоположно

направленных течений. В исследованиях (Ermakov et al., 2011; Espedal et al., 1998) описаны случаи увеличения концентрации ПАВ на морской поверхности из-за их компрессии конвергентными течениями.

Ряд работ указывает на необходимость учёта влияния ветроволнового дрейфа на динамику сликов (Малиновский и др., 2007; Fingas, 2017; Wu, 1983), а также вязкоупругих свойств плёнок биогенных ПАВ, которые в общем случае неизвестны (Ермаков, 2010). Несмотря на это, особенности геометрии и дрейфа плёночных сликов, тесно связанные со структурой приповерхностного течения и гидродинамическими условиями в области наблюдения, могут служить источником информации для систем дистанционного зондирования (Ермаков и др., 2016, 2017; Ермошкин, Капустин, 2015; Капустин и др., 2019; Егmakov et al., 2018).

Обратим особое внимание на то, что в цитированных выше работах описываются эволюция и дрейф одиночных плёночных пятен (исключая разве что работу (Marmorino et al., 2008)), в то время как динамика именно полосовых сликовых структур, часто встречающихся на морской поверхности, практически не исследовалась в ходе контролируемых натурных экспериментов. В работе (Kapustin et al., 2019) впервые была предложена методика восстановления структуры неоднородных морских течений на основе характеристик искусственно созданной сликовой полосы. Настоящая статья является продолжением исследования динамики искусственной сликовой полосы в поле течений и ветра. В ней представлены результаты натурного эксперимента, проведённого в шельфовой зоне Чёрного моря, и выполнен дополнительный статистический анализ данных эксперимента, позволивший уточнить условия применимости предложенной методики.

#### Эксперимент

Натурный эксперимент по исследованию динамики искусственной сликовой полосы проводился на стационарной океанографической платформе (СОП) Черноморского гидрофизического полигона Российской академии наук. СОП расположена в шельфовой зоне на расстоянии 600 м от берега, глубина моря в области измерения составляет 25–30 м. Создание искусственной сликовой полосы проводилось путём непрерывного нанесения ПАВ на морскую поверхность при медленном его истечении из резервуара с отверстием в дне диаметром 1,5 мм в течение длительного времени.

В отличие от экспериментов по изучению динамики естественных полосовых сликов использование искусственных полос даёт ряд преимуществ. В частности, для искусственных сликовых полос могут быть заранее измерены вязкоупругие характеристики плёнок используемых ПАВ. Для создания искусственных сликов, не представляющих экологической угрозы для окружающей среды, обычно используются растительные масла (VO) или жирные органические кислоты, например чистая олеиновая кислота (OLE), органические спирты, например додеканол, полиалкиленгликоль, а также растворы указанных веществ в этаноле (Ермаков, 2010; Ермошкин, Капустин, 2015). В данном эксперименте использовались OLE и VO, характеризуемые близкими величинами упругости плёнки и коэффициента поверхностного натяжения (Ермаков, 2010). Эксперимент проводился в течение 8 ч, средний расход ПАВ составлял 8–10 мл/мин.

Схема эксперимента, показывающая процесс формирования полосы, приведена на *рис. 1* (см. с. 224). Вытекая из резервуара, капли ПАВ попадают на морскую поверхность и растекаются, образуя область, в которой мелкомасштабная часть спектра поверхностного волнения подавляется плёнкой ПАВ (слик). С течением времени на некотором расстоянии от резервуара с ПАВ формируется сликовая полоса, которая сносится поверхностным течением. В ходе визуального наблюдения за процессом формирования сликовой полосы, подкреплённо-го последующей обработкой экспериментальных данных, было замечено, что на некотором расстоянии от СОП полосовая структура практически перестаёт расширяться в поперечном направлении (стадия I) и процесс распространения полосы становится квазистационарным (стадия II).



*Рис. 1.* Схема натурного эксперимента со сликовой полосой: І — стадия растекания, ІІ — квазистационарная сликовая полоса

Как известно из литературы, отдельные плёночные слики в процессе растекания вытягиваются по ветру, а движение их центра масс происходит в направлении результирующего поверхностного течения (Капустин и др., 2019; Малиновский и др., 2007). Аналогичный процесс должен происходить при формировании полосы, с той лишь разницей, что вместо перемещения центра масс у полосовой структуры будет меняться направление распространения и ширина в каждой точке. В зависимости от направлений ветра и течения, а также от соотношения их скоростей возможно формирование полос с различными масштабами и геометрией.

Последовательные РЛ-панорамы водной поверхности, содержащие искусственную сликовую полосу, регистрировались с использованием цифровой когерентной радиолокационной станции (РЛС) MRS-1000 (НПО «Микран», Томск), установленной на высоте 17 м над уровнем моря. РЛС работала в режиме линейно-частотно-модулированного непрерывного излучения на частоте 9,4 ГГц (Х-диапазон) с полосой модуляции 191 МГц на горизонтальной поляризации. Период вращения антенны РЛС составлял четыре оборота в минуту; в ходе последующей обработки с целью устранения флуктуации отражённого РЛ-сигнала и сглаживания спекл-шума производилось некогерентное усреднение изображений за 2 мин.



*Рис. 2.* РЛ-панорама: 1 — сликовая полоса; 2 — буи устричной плантации; 3 — береговая линия; 4 — область РЛ-переотражений; 5 — зона РЛ-тени

Типичная РЛ-панорама, содержащая искусственную сликовую полосу, показана на *рис. 2* (см. с. 224). На нём наблюдаются следующие особенности: 1 — сликовая полоса, представляющая собой вытянутую область пониженного уровня РЛ-рассеяния; 2 — яркие РЛотметки, являющиеся буями устричной фермы; 3 — береговая линия; 4 — область РЛ-переотражений, связанная с близко расположенной металлической конструкцией; 1 — зона РЛ-тени. РЛС обладает высоким пространственным разрешением, составляющим 0,79 м по дальности, что позволяет регистрировать тонкую структуру полосы и поверхностного волнения.

Скорость и направление приводного ветра регистрировались с частотой 1 Гц ультразвуковым анемометром WindSonic, установленным на высоте 20 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 течений (ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz), вывешиваемого со средней палубы СОП на тросах. Профилограф ориентировался вертикально вниз и заглублялся на 0,3 м, частота следования зондирующих импульсов составляла около 1 Гц.

#### Результаты и их обсуждение

#### Гидрометеорологические условия

Ветроволновые условия накладывают определённые ограничения на возможность проведения экспериментов с искусственными сликами: в условиях полного штиля слик не отличим от гладкой морской поверхности вокруг, а при сильном ветре будет быстро разрушаться (Ермаков и др., 2015). Тем не менее диапазон рабочих скоростей ветра достаточно широк и находится в интервале от 2 до 10 м/с. На *рис. 3* представлены результаты измерения скорости ветра и течения во время проведения эксперимента, данные приведены по компонентам (x, y) с усреднением 5 мин. Прямоугольник обозначает период времени, в который измерения течений не проводились.



*Рис. 3.* Компоненты скорости ветра (*a*) и течения на горизонте 4 м ( $\delta$ ) в период проведения эксперимента; серый цвет — восточные (*X*), чёрный — северные (*Y*) компоненты ветра *V*<sub>i</sub> и течения *u*<sub>i</sub>, где *i* = *X*, *Y* 

Как можно видеть на *рис. За*, во время проведения эксперимента скорость ветра варьировалась в пределах 2-10 м/с и он имел преимущественно восточное направление. В заключительной фазе эксперимента средняя скорость ветра упала до 2 м/с, а направление сильно изменилось. Скорость приповерхностного течения на глубине 4 м составляла от 8 до 16 см/с, его направление в точке нахождения СОП варьировалось в секторе  $215-255^{\circ}$ . Средние различия в величине скорости течения на глубинах до 8 м составляли 0,5-1 см/с, различия в направлениях течений также были несущественны и составляли в среднем  $2^{\circ}$  со стандартным отклонением  $6^{\circ}$ . В период с 19:00 до 20:00 данные по течениям отсутствовали.

Известно, что одним из механизмов образования морского течения является воздействие ветра на водную поверхность, приводящее к сгонно-нагонному эффекту в морской толще. Такое движение жидкости может характеризоваться как инерционное, кроме самого верхнего слоя, быстро реагирующего на изменение гидрометеорологических условий и поверхностного волнения. Согласно оценкам, в условиях шельфовой зоны этот верхний слой составляет порядка 1–2 м (Rohrs, Christensen, 2015). В дальнейшем под «морским течением» мы будем подразумевать движение морской толщи на глубинах, превышающих толщину верхнего, быстро реагирующего на ветер слоя; в рамках данной работы выбрана глубина 4 м.

Слабая зависимость течения от глубины в условиях эксперимента объясняется тем, что до его начала в течение 10 ч дул умеренный ветер восточного направления (до 10 м/с), который привёл в движение верхний слой до глубины залегания термоклина (около 8 м согласно положению звукорассеивающего слоя по показаниям ADCP).

#### Направление распространения сликовой полосы (азимут)

При последующем анализе каждый участок полосовой сликовой структуры будем характеризовать направлением распространения (азимутом) Ds(r, t) и шириной W(r, t). Указанные величины определялись с помощью порогового метода обработки РЛ-изображений, на которых предварительно устранялась зависимость интенсивности отражённого РЛ-сигнала от дальности. С использованием специально разработанного программного обеспечения в полярной системе координат автоматически определялись угловые границы сликовой полосы  $Ds^1(r, t)$ и  $Ds^2(r, t)$ , при этом направление её распространения вычислялось как среднее арифметическое между ними, а ширина W — по формуле:

$$W(r,t) = 2r \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{Ds^2(r,t) - Ds^1(r,t)}{2}\right),\tag{1}$$

где r — расстояние от СОП; t — время наблюдения.

Теперь рассмотрим зависимость азимутального угла распространения полосовой сликовой структуры от скорости поверхности. Для анализа азимута полосы был выбран период времени 18:30–0:20, характеризующийся относительно стабильным направлением ветра (см. *рис. 3a*). Оценка вклада ветра в характеристики распространения полосы проводилась методом минимизации среднеквадратичного отклонения (СКО) азимута полосы от направления вектора  $\vec{u} + n\vec{V}$ , где  $\vec{u}$  — скорость морского течения в верхнем слое;  $\vec{V}$  — скорость ветра; *n* — эмпирический коэффициент.

Наименьшее СКО наблюдается при выборе *n*, равного 3 %. Таким образом, распространение полосы описывается вектором суммы морского течения и 3 % скорости ветра; далее модуль этого вектора для простоты будем обозначать термином «скорость поверхности» —  $V_{\text{пов}}$ . Вклад ветра может оказывать существенное влияние на динамику сликовой полосы. Так, в условиях описанного эксперимента на фоне слабо меняющейся скорости морского течения (12–15 см/с) он составлял 18–30 см/с в начале эксперимента и 7–5 см/с в конце. Коэффициент корреляции между направлениями полосы и вектора скорости поверхности составляет около 0,86, СКО — 4,9°. Соответствующие статистическому анализу двумерная гистограмма и диаграмма рассеяния для различных расстояний от СОП приведены на *рис. 4* (см. с. 227).



*Рис. 4.* Зависимость азимута полосы от направления вектора скорости поверхности: *а* — двумерная гистограмма для 1530 случаев; *б* — диаграмма рассеяния на различных расстояниях от СОП

Рисунок 46 показывает относительную статистическую однородность данных на расстояниях от СОП, превышающих 100 м. Из общего числа несколько выбивается случай для расстояния от СОП 80 м («звёзды» на *рис. 46*), для которого определяется меньший коэффициент корреляции (0,8). Отличия, наблюдаемые на расстоянии 80 м, объясняются проявлением эффектов растекания плёнки (стадия I). Оценки, сделанные на основании модели (Ermakov et al., 2018), дают схожие значения расстояний, на которых растекание уже не вносит существенного вклада в кинематику полосовой сликовой структуры (порядка 100 м) (Kapustin et al., 2019).

#### Ширина сликовой полосы

Далее было исследовано поведение ширины полосовой структуры в зависимости от величины скорости поверхности на фиксированных расстояниях от источника ПАВ (80–200 м). На *рис.* 5 показаны примеры РЛ-панорам, характерные для относительно высокой (см. *рис.* 5*a*) и низкой (см. *рис.* 5*б*) скоростей поверхности.



*Рис. 5.* Изображения сликовой полосы при различных скоростях поверхности: *a* — 0,4 м/с; *б* — 0,13 м/с

Зависимость ширины полосовой структуры от модуля скорости поверхности показана на *рис. ба.* Можно заключить, что увеличение скорости поверхности приводит к уменьшению ширины полосы, при этом зависимость близка к обратно пропорциональной (на *рис. ба* для демонстрации приведена кривая вида 10/x).



Рис. 6. Ширина полосы ПАВ (*a*) и её поверхностная концентрация (б) в зависимости от модуля скорости поверхности

После окончания стадии растекания можно предположить, что плёнка распределена в полосе равномерно, и использовать понятие поверхностной концентрации ПАВ аналогично тому, как это было сделано в работе (Kapustin et al., 2019). При постоянных плотности  $\rho$  и расходе ПАВ *f* из закона сохранения массы можно оценить концентрацию ПАВ на морской поверхности *C* как:

$$C = \frac{\rho f}{W V_{\text{пов}}}.$$
(1)

Рассчитанные концентрации ПАВ в полосе на различных расстояниях от источника ПАВ представлены на *рис. 6б.* В работе (Kapustin et al., 2019) было выдвинуто предположение о постоянстве концентрации ПАВ в полосе после завершения процессов растекания. Более детальный анализ данных эксперимента показывает, что это предположение выполняется в широком диапазоне скоростей поверхности, исключая случаи малых величин последних (менее 0,15 м/с).

Концентрация ПАВ в полосе после выхода на стационарный уровень оценивается как 15,7 мг/м<sup>2</sup> (СКО = 5,4 мг/м<sup>2</sup>, количество точек — 1340). Единичные выбросы, по-видимому, связаны с несовершенством автоматической обработки изображений, а также со сложной геометрией сликовой полосы после резкой смены направления ветра.

Для того чтобы интерпретировать скорость поверхности, после достижения которой концентрацию можно считать постоянной, оценим скорость растекания ПАВ  $u_s$  на основании модели (Ermakov et al., 2018) в условиях отсутствия индуцированной силы:

$$u_s = \sqrt{\frac{\Delta\sigma}{\alpha\mu}} \left(\frac{\nu}{t}\right)^{1/4},\tag{2}$$

где  $\Delta \sigma$  — давление плёнки, равное разнице КПН на чистой воде и в слике, 40 мН/м;  $\mu$  — динамическая вязкость воды,  $10^{-3}$  Па·с;  $\nu$  — кинематическая вязкость воды,  $10^{-6}$  м<sup>2</sup>·c<sup>-1</sup>;  $\alpha$  — эмпирический коэффициент порядка 3; t — время. На временах порядка частоты капания ПАВ из канистры в условиях эксперимента  $u_s$  может быть оценена как 0,1—0,15 м/с. По-видимому, увеличение концентрации в условиях низкой скорости поверхности связано с тем, что каждая следующая капля ПАВ в этом случае попадает в слик, образованный предыдущей каплей. Согласно модели (Ermakov et al., 2018), растеканию полосы в поперечном направлении препятствуют вязкие напряжения и индуцированные волнами силы. Совокупность этих условий приводит к увеличению концентрации ПАВ в полосе при малой поверхностной скорости.

Постоянство же концентрации вещества в широком диапазоне скоростей поверхности (после достижения ими скорости растекания слика) приводит к постоянству произведения ширины полосы W на скорости поверхности V<sub>пов</sub> при постоянном истечении ПАВ из источника. Отметим, что многие наблюдаемые случаи образования сликовых полос и распространения их на большие расстояния связаны с продолжительными и относительно постоянными источниками загрязнения: стоками коллекторных вод, речными стоками, несанкционированными судовыми сбросами в открытом море. Вывод о сохранении WV<sub>пов</sub> даёт возможность восстанавливать тонкую структуру скорости поверхности вдоль полосы. Для таких полосовых структур, наблюдаемых с помощью методов дистанционного зондирования, в том числе радиолокационных, в каждой точке локальная скорость поверхности будет направлена по касательной к полосовой структуре, а её модуль можно восстановить как функцию ширины. Проведение гидрометеорологических измерений в любой точке полосы позволит оценить модуль скорости поверхности в этой точке, что в совокупности с измерением ширины полосы даст возможность оценить величину  $WV_{\text{пов}}$ , постоянную вдоль всей полосы. Совмещение подобного эксперимента с получением спутникового радиолокационного изображения акватории с высоким пространственным разрешением позволит восстанавливать тонкую структуру скорости поверхности (как модуль, так и направление) вдоль сликовой полосы на больших расстояниях от источника ПАВ.

#### Заключение

В ходе натурного эксперимента исследована динамика искусственной сликовой полосы и получены эмпирические соотношения между её геометрическими характеристиками и характеристиками скорости поверхности.

Полученные результаты указывают на необходимость учёта вклада ветра в направление распространения сликовой полосы. Несмотря на то, что чаще всего наблюдение полосовых структур происходит при относительно слабых ветрах (скорости порядка 3–6 м/с), векторный вклад ветровой компоненты, составляющий 3 % от скорости ветра, может быть сопоставим со скоростью течения. Этот фактор в конечном итоге может привести к неверной оценке геометрии и масштабов вихревых структур, проявляющихся на РЛ-изображениях вследствие сликового механизма.

Показано, что на некотором расстоянии от источника влиянием эффектов растекания ПАВ можно пренебречь, а ширина полосы становится стационарной на масштабах порядка 100 м и более. Получены зависимости ширины полосы от величины скорости поверхности. Также продемонстрировано, что при постоянном источнике ПАВ произведение скорости поверхности на ширину полосы можно считать постоянным вдоль полосы в широком диапазоне скоростей поверхности, а именно при превышении скоростью поверхности скорости растекания ПАВ. Показана возможность получения информации о пространственной структуре скоростей поверхности вдоль сликовой полосы на основе данных о её форме и по гидрометеорологическим измерениям в любой её точке, что особенно важно для верификации спутниковых данных.

Дальнейшие исследования будут направлены на проведение комплексных, в том числе подспутниковых, экспериментов, которые позволят наблюдать динамику полосовых структур на существенно больших масштабах и восстанавливать скорости поверхности вдали от источника ПАВ, а также провести верификацию предложенного подхода в условиях пространственно-неоднородных приповерхностных течений и в существенно более широком диапазоне наблюдаемых скоростей поверхности.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10066).

# Литература

- 1. *Ермаков С.А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. ИПФ РАН, 2010. С. 163.
- 2. *Ермаков С.А., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Шомина О.В.* Экспериментальное исследование разрушения поверхностных пленок обрушивающимися гравитационными волнами. Предварительные результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 72–79.
- 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 радиолокационных 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. *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.
- 6. *Капустин И.А., Ермошкин А.В., Богатов Н.А., Мольков А.А.* Об оценке вклада приводного ветра в кинематику сликов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 163–172.
- 7. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К.Д., Серебряный А. Н. Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 98–123.
- 8. 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.
- 9. *Малиновский В. В., Дулов В. А., Кориненко А. Е., Большаков А. Н., Смолов В. Е.* Натурные исследования дрейфа искусственных тонких пленок на морской поверхности // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 117–127.
- Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I. Remote sensing and in situ observations of marine slicks associated with inhomogeneous coastal currents // Proc. SPIE Intern. Society for Optical Engineering. 2011. V. 8175. No. 81750R.
- 11. Ermakov S., Kapustin I., Molkov A., Leshev G., Danilicheva O., Sergievskaya I. Remote sensing of evolution of oil spills on the water surface // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE, 2018. V. 10784. No. 107840L.
- Espedal H.A., Johannessen O. M., Johannessen J.A., Dano E., Lyzenga D. R., Knulst J. C. COASTWATCH'95: ERS 1/2 SAR detection of natural film on the ocean surface // J. Geophysical Research: Oceans. 1998. V. 103. No. C11. P. 24969–24982.
- 13. *Fingas M*. Introduction to Oil Spill Modeling // Oil Spill Science and Technology, 2nd ed. Elsevier: Gulf professional publishing, 2017. Ch. 8. P. 419–454.
- 14. *Ivanov A. Y., Ginzburg A. I.* Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // J. Earth System Science. 2002. V. 111. No. 3. P. 281–295.
- Kapustin I.A., Shomina O.V., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Kupaev A.V., Molkov A.A., Ermakov S.A. On Capabilities of Tracking Marine Surface Currents Using Artificial Film Slicks // Remote Sensing. 2019. V. 11(7). No. 840.
- 16. *Lavrova O. Yu.*, *Sabinin K. D.* Fine spatial structure of flows on satellite radar image of the Baltic Sea // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 467. No. 2. P. 427–431.
- 17. *Lavrova O.*, *Serebryany A.*, *Bocharova T.*, *Mityagina M.* Investigation of fine spatial structure of currents and submesoscale eddies based on satellite radar data and concurrent acoustic measurements // Proc. SPIE Intern. Society for Optical Engineering. 2012. V. 8532. No. 85320L.
- 18. *Lavrova O.*, *Serebryany A.*, *Bocharova T.* Investigation of small scale hydrodynamic processes using high resolution SAR imagery and ADCP data // 2013 European Space Agency Living Planet Symp. 2013. P. 9–13.

- 19. *Marmorino G.O., Smith G.B., Toporkov J.V., Sletten M.A., Perkovic D., Frasier S.J.* Evolution of ocean slicks under a rising wind // J. Geophysical Research: Oceans. 2008. V. 113. No. C04030.
- Ochadlick J.A.R., Cho P., Evans-Morgis J. Synthetic aperture radar observations of currents colocated with slicks // J. Geophysical Research. 1992. V. 97. No. C4. P. 5325–5330.
- Rohrs J., Christensen K. H. Drift in the uppermost part of the ocean // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. P. 10349–10356.
- 22. *Wu J*. Sea-surface drift currents induced by wind and waves // J. Geophysical Research. 1983. V. 13. No. 8. P. 1441–1451.

## On the dynamics of artificial slick band in the coastal zone of the Black Sea

O. V. Shomina<sup>1</sup>, I. A. Kapustin<sup>1,2</sup>, A. V. Ermoshkin<sup>1</sup>, S. A. Ermakov<sup>1,2</sup>

 <sup>1</sup> Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
 <sup>2</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia E-mails: seamka@yandex.ru, kapustin-i@yandex.ru

It is well known that film slicks on the sea surface can reflect various geophysical processes in the upper layer of the ocean and in the atmosphere. Banded slick structures that appear on SAR images of the sea surface at low and moderate wind speeds are usually associated with sea currents. This paper presents the results of the first experiments to study the dynamics of an artificial slick band in the field of marine current and wind. It is shown that the contribution of wind to the propagation of a slick band can be significant, and at certain stages of the band dynamics the influence of spreading effects can be neglected. For these quasi-stationary sections of the slick band an empirical relationship between the band width and the surface velocity is obtained. An advantage of the proposed approach is based on the possibility of obtaining the spatial structure of the surface velocity along a slick band according to the information regarding the band shape and hydrometeorological measurements at any section of it. The approach may be effective in verifying remote sensing data.

Keywords: marine currents, slick band, sea surface, surfactants

Accepted: 05.06.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-222-232

#### References

- 1. Ermakov S.A., *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (Impact of surfactant films on the dynamics of gravity-capillary waves), Nizhny Novgorod: IPF RAN, 2010, 163 p.
- 2. Ermakov S.A., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Shomina O.V., Eksperimental'noe issledovanie razrusheniya poverkhnostnykh plenok obrushivayushchimisya gravitatsionnymi volnami. Predvaritel'nye rezul'taty (Experimental investigation of the disruption of surface films due to breaking gravity waves. Preliminary results), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 72–79.
- Ermakov S. A., Lavrova O. Yu., Kapustin I. A., Makarov E. V., Sergievskaya I. A., Issledovanie osobennostei geometrii plenochnykh slikov na morskoi poverkhnosti po dannym sputnikovykh radiolokatsionnykh nabludenii (Investigation of peculiarities of the geometry of film slicks on the sea surface based on radar remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 97–105.
- Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Ob effekte szhatiya plenochnogo slika (On the effect of compression of film slick), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 288–294.

- 5. Ermoshkin A. V., Kapustin I. A., Issledovanie osobennostei rastekaniya plenok poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na poverkhnosti vnutrennikh vodoemov morskim navigatsionnym radiolokatorom (Investigation of the peculiarities of surface films spreading on the surface of internal reservoirs on the base of marine navigation radar data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 136–142.
- Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Molkov A.A., Ob otsenke vklada privodnogo vetra v kinematiku slikov na morskoi poverkhnosti v usloviyakh ogranichennykh razgonov volneniya (On the estimation of the contribution of near-surface wind to the kinematics of slick on the sea surface under conditions of finite wave fetch), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 163–172.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Serebryanyi A. N., Izuchenie gidrodinamicheskikh protsessov v shel'fovoi zone na osnove sputnikovoi informatsii i dannykh podsputnikovykh izmerenii (Investigation of hydrodynamic processes in the shelf zone based on the satellite data and subsatellite measurements), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 98–123.
- 8. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoi A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods of registration and monitoring of the marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 334 p.
- 9. Malinovskii V.V., Dulov V.A., Korinenko A.E., Bolshakov A.N., Smolov V.E., Naturnye issledovaniya dreifa iskusstvennykh tonkikh plenok na morskoi poverkhnosti (Field investigation of the drift of artificial thin films on the sea surface), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2007, Vol. 43, No. 1, pp. 117–127.
- Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I., Remote sensing and in situ observations of marine slicks associated with inhomogeneous coastal currents, *Proc. SPIE – Intern. Society for Optical Engineering*, 2011, Vol. 8175, No. 81750R.
- 11. Ermakov S., Kapustin I., Molkov A., Leshev G., Danilicheva O., Sergievskaya I., Remote sensing of evolution of oil spills on the water surface, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, Proc. SPIE*, 2018, Vol. 10784, No. 107840L.
- Espedal H.A., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Dano E., Lyzenga D.R., Knulst J.C., COASTWATCH'95: ERS 1/2 SAR detection of natural film on the ocean surface, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1998, Vol. 103, No. C11, pp. 24969–24982.
- 13. Fingas M., Introduction to Oil Spill Modeling, In: *Oil Spill Science and Technology*, Elsevier: Gulf Professional Publishing, 2017, pp. 419–453.
- 14. Ivanov A.Y., Ginzburg A.I., Oceanic eddies in synthetic aperture radar images, *J. Earth System Science*, 2002, Vol. 111, No. 3, pp. 281–295.
- Kapustin I.A., Shomina O.V., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Kupaev A.V., Molkov A.A., Ermakov S.A., On Capabilities of Tracking Marine Surface Currents Using Artificial Film Slicks, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 840.
- 16. Lavrova O.Yu., Sabinin K.D., Fine spatial structure of flows on satellite radar image of the Baltic Sea, *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 467, No. 2, pp. 427–431.
- 17. Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T., Mityagina M., Investigation of fine spatial structure of currents and submesoscale eddies based on satellite radar data and concurrent acoustic measurements, *Proc. SPIE Intern. Society for Optical Engineering*, 2012, Vol. 8532, No. 85320L.
- Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T., Investigation of small scale hydrodynamic processes using high resolution SAR imagery and ADCP data, 2013 European Space Agency Living Planet Symp., 2013, pp. 9–13.
- 19. Marmorino G. O., Smith G. B., Toporkov J. V., Sletten M. A., Perkovic D., Frasier S. J., Evolution of ocean slicks under a rising wind, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2008, Vol. 113, No. C04030.
- 20. Ochadlick J.A.R., Cho P., Evans-Morgis J., Synthetic aperture radar observations of currents colocated with slicks, *J. Geophysical Research*, 1992, Vol. 97, No. C4, pp. 5325–5330.
- 21. Rohrs J., Christensen K. H., Drift in the uppermost part of the ocean, *Geophysical Research Letters*, 2015, Vol. 42, pp. 10349–10356.
- 22. Wu J., Sea-surface drift currents induced by wind and waves, *J. Geophysical Research*, 1983, Vol. 13, No. 8, pp. 1441–1451.