

## Натурные подспутниковые наблюдения конвергентных течений в приповерхностном слое воды по их пенным образам

И. А. Капустин<sup>1,2</sup>, Д. В. Вострякова<sup>1,3</sup>, А. А. Мольков<sup>1,2</sup>,  
О. А. Даниличева<sup>1</sup>, Г. В. Лещев<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*

<sup>3</sup> *Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского  
Нижний Новгород, 603950, Россия  
E-mail: kapustin-i@yandex.ru*

При умеренных и сильных ветрах на поверхности водоёма формируются пенные полосы. Возможны несколько причин появления пенных структур на поверхности водоёма. Например, пена может образовываться в процессе обрушения ветровых волн или при всплытии растворённых в толще воды пузырьков с адсорбированными на их поверхность поверхностно-активными веществами (ПАВ), а на форму пенной структуры оказывает влияние приповерхностное течение, приводящее к переносу и компрессии ПАВ на поверхности воды. Пенные структуры могут регистрироваться на оптических изображениях и за счёт цветового контраста. В настоящей работе представлены результаты исследования структуры пенных полос на водной поверхности. В ходе натурных экспериментов в акватории Горьковского вдхр. одновременно с получением оптического спутникового изображения Sentinel-2A были проведены квазисинхронные измерения полей течения и ветра. В месте расположения зарегистрированной на оптическом спутниковом изображении полосы была обнаружена область конвергенции течений, связанная, предположительно, с температурным градиентом водных масс и нестационарным характером течений в водохранилище. Рассмотрены возможные механизмы образования пенной полосы и предложено их физическое объяснение.

**Ключевые слова:** пена на морской поверхности, поверхностно-активные плёнки, слики, ADCP-измерения, спутниковые изображения, конвергенция течений

Одобрена к печати: 07.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-188-196

### Введение

Формирование пенных полос на поверхности водоёмов — распространённое явление, происходящее в условиях умеренного и сильного ветра. Пенные структуры могут наблюдаться на спутниковых оптических изображениях, так как обладают цветовым контрастом, а также давать значительные контрасты на радиолокационных изображениях, поскольку поверхностно-активные вещества (ПАВ), содержащиеся в пене, приводят к образованию сликов и «выглаживанию» коротких ветровых волн (Ермаков, 2010; Монин, Красицкий, 1985).

Существует несколько причин появления пены на поверхности водоёмов и механизмов образования полос из этой пены. В частности, появление пены может быть связано с химическим составом воды и биологической активностью морской среды, поскольку морская вода всегда содержит некоторое количество растворённых ПАВ как биогенного, так и антропогенного происхождения (Шарков, 2009). В процессе обрушения ветровых волн из захваченного с поверхности воды воздуха порождаются пузырьки, на которых адсорбируются растворённые в воде ПАВ, препятствующие выходу газа из полости пузырька и его растворению (Deane, Stokes, 2002). Источником образования пены могут также быть и растворённые в толще воды газы (Смирнова, Капустин, 2018). Кроме того, пена может образовываться естественным путём при всплытии метановых пузырьков из осадочных донных слоёв водоёмов и искусственно в различных гидротехнических системах. При всплытии пузырька газа рас-

творённые в воде ПАВ «налипают» на него и выносятся на поверхность, образуя устойчивый пенный слой.

Известно, что при определённых условиях по форме пенных структур, также как и сликов на водной поверхности, можно получить представление о структуре течений в приповерхностном слое водоёмов (см., например, работы (Шомина и др., 2019; Kapustin et al., 2019)). Такая возможность определяется тем, что на форму и масштабы структур оказывает влияние приповерхностное течение, приводящее к переносу и компрессии ПАВ на морской поверхности. Так, под действием индуцированных ветровым волнением напряжений слики могут переходить из режима растекания в режим сжатия в поперечном к ветру направлении и вытягиваться по направлению ветра на больших временах. При этом может происходить установление стационарных масштабов сликового пятна (Ермаков и др., 2017). Далее рассмотрим некоторые аспекты перераспределения ПАВ в поле приповерхностных течений с различными масштабами.

Приповерхностные циркуляционные течения, например ленгмюровские, оси которых ориентированы вдоль ветра, приводят к перераспределению ПАВ на морской поверхности (Wetter et al., 1985). Соседние ячейки вращаются в противоположных направлениях, между ними образуются области дивергенции и конвергенции горизонтальной компоненты течения. В областях конвергенции скапливаются плёнки ПАВ, пена и водоросли. Гребенчатые структуры, схожие с ленгмюровскими полосами и, по-видимому, являющиеся начальными стадиями образования последних, могут наблюдаться и в искусственных сликах (Ермаков и др., 2018). К компрессии плёнки ПАВ также приводит и наличие средних циркуляционных течений в турбулентных следах, образованных после прохождения надводных судов (Ермаков et al., 2014; Peltzer et al., 1992). Эти так называемые «рельсовые следы» могут являться потенциальным источником информации для систем навигации и автоматизированного контроля акваторий.

О структуре относительно крупномасштабных течений в субмезомасштабных вихревых структурах зачастую судят по картине сликов, формирующихся в поле этих течений (Лаврова, 2005). При этом полагают, что слики являются пассивными маркерами течений и применяют методику Maximum Cross Correlation (МСС) для оценки характеристик таких течений по смещению сликовых структур на последовательных спутниковых изображениях (см., например, работу (Даниличева и др., 2020)). Однако, как показывают результаты моделирования (Shomina et al., 2019), при некоторых условиях реальная структура течения в вихрях может существенно отличаться от их образа, что указывает на высокую ценность квазисинхронных подспутниковых экспериментов с одновременным проведением измерений полей течения и ветра на заданной акватории.

В настоящей работе представлены результаты натурального эксперимента, в котором одновременно с получением оптического спутникового изображения Sentinel-2A были проведены квазисинхронные измерения полей течения и ветра с использованием комплекса оборудования, установленного на плавучей лаборатории «Геофизик» Института прикладной физики РАН (Мольков, 2019). Было показано, что наблюдаемые пенные полосы могут быть связаны с наличием конвергентных потоков, вызванных разницей температур и суточным регулированием стока Нижегородской ГЭС. Было предложено физическое объяснение наблюдаемой формы полосы, связанное с вытягиванием пены в направлении ветра и её компрессией двумя встречными потоками.

## Натурный эксперимент

Эксперимент был проведён 16 мая 2018 г. в южной части Горьковского вдхр. От р. Белой до р. Троцы было сделано несколько поперечных разрезов водохранилища. В ходе эксперимента наблюдалась незначительная облачность (дымка), которая, однако, позволила определить на спутниковом изображении пенные структуры на поверхности водохранилища (рис. 1, см. с. 190). Как можно видеть из рисунка, вся южная часть водохранилища покрыта пенными структурами. Эти структуры проявляются на изображении ввиду оптического контраста

белой пены относительно речной воды, содержащей в весенний период большое количество взвеси и растворённого органического вещества, и хорошо идентифицируются на фоне незначительной дымки в атмосфере. Полосовые пенные структуры на поверхности воды наблюдались визуально в ходе всего дня проведения эксперимента.

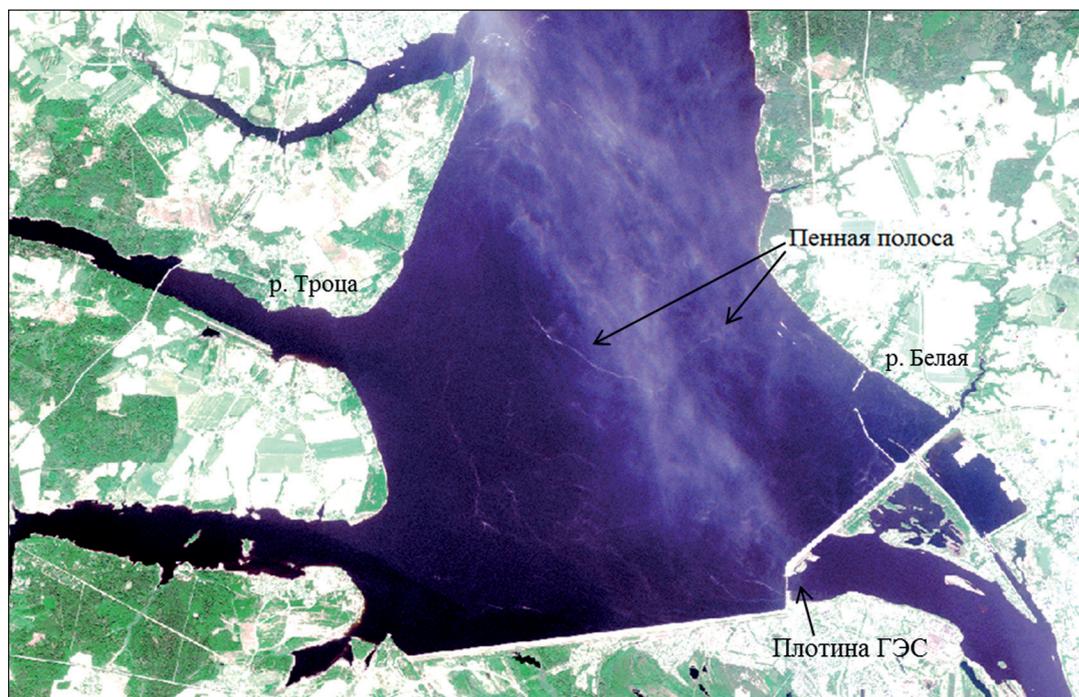


Рис. 1. Оптическое спутниковое изображение Sentinel-2A южной части Горьковского вдхр. за 16 мая 2018 г.

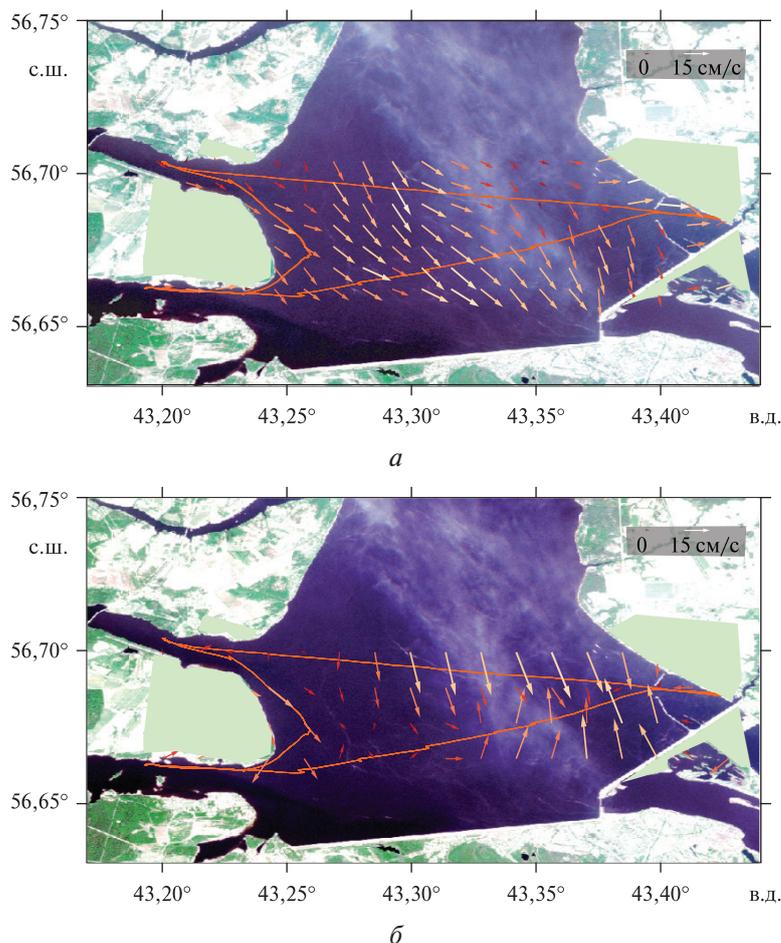
Для измерения профилей течения по глубине, начиная с 1 м с шагом 0,5 м, и температуры верхнего слоя воды использовался акустический доплеровский профилограф течений (ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz), установленный в шахте между баллонами тримарана «Геофизик». Измерения скорости и направления приводного ветра осуществлялись с использованием ультразвукового анемометра WindSonic, установленного на мачте на высоте 8 м от поверхности воды. Для осуществления навигации и последующего построения двумерных полей течений и ветра с дальнейшим наложением их на карту использовались данные GPS-приёмников (Global Positioning System, система глобального позиционирования).

Для обработки данных ADCP использовались специализированные программы Winriver I (анализ, усреднение и вывод данных), GPS MapEdit 2.1.78.8 (обработка навигационной информации). Проводилось усреднение данных по 100 полученным на разрезе профилям скорости (около 1 мин измерений), соответствующим измерительным зондирующим импульсам ADCP (пингам). Для удобства представления данных и привязки координат и скоростей в разных проекциях, а также дальнейшей работы с ними использовался программный пакет MS Excel (2010), а для построения карт скоростей течений и поля температур — Surfer 7.0 (13.0.383). Получение и предварительная обработка спутникового изображения осуществлялись через систему See the Sea (STS) Института космических исследований РАН (Лаврова и др., 2019).

## Анализ результатов

С целью исследования связи наблюдаемых пенных полос со структурой приповерхностных течений векторные поля течений были наложены на спутниковое изображение (Sentinel-2,

16.05.2019, 09:13). На *рис. 2* сплошными линиями обозначены треки, на которых производились измерения. Вектора между треками — результат интерполяции данных.



*Рис. 2.* Векторное поле течений в тонком поверхностном слое (*а*) и на глубине 1,05 м (*б*)

Для анализа корреляции была использована методика построения течения в тонком приповерхностном слое, описанная, например, в работе (Капустин и др., 2019), когда к полям течений, считаемых невозмущёнными (на глубине 4 м), прибавляется ветро-волновой дрейф, в среднем составляющий 3 % от скорости приводного ветра (см. *рис. 2а*). В ходе эксперимента фиксировался преимущественно западный ветер со скоростью около 2–2,5 м/с. Анализ полей показал, что пенные полосы вытянуты по направлению течения в тонком поверхностном слое, но построенное по такому принципу векторное поле скоростей в тонком приповерхностном слое не коррелировало с полем течений на глубине 1,05 м (см. *рис. 2б*). Поэтому для дальнейшего совместного анализа особенностей на оптическом спутниковом изображении и полей течений были использованы данные ADCP на горизонте 1,05 м.

На *рис. 1* видно, что пенные полосы в юго-западной части водохранилища вытянуты по направлению к плотине ГЭС, что коррелирует с векторным полем течения на глубине 1,05 м (см. *рис. 2б*). В юго-восточной части водохранилища имеется система двух сталкивающихся потоков (течение на север и течение на юг) (см. *рис. 2б*), что указывает на наличие области конвергенции течений. На *рис. 3а, б* (см. с. 192) представлены профили горизонтальной скорости в области конвергенции течения: нижний разрез на *рис. 2б* — течение на север и верхний разрез — течение на юг. Видно, что на первом из графиков (см. *рис. 3а*) при увеличении глубины меняется направление течения (с северного на южное). Разнонаправленные потоки в качестве соседних циркуляционных ячеек образуют зону конвергенции. Это подтверждает построенное поле вертикальной скорости на разрезах (см. *рис. 3в*): в верхнем слое

в области конвергенции горизонтальной компоненты скорости вертикальная составляющая скорости направлена вниз. В среднем жидкость опускается в области конвергенции со скоростью около 3 см/с.

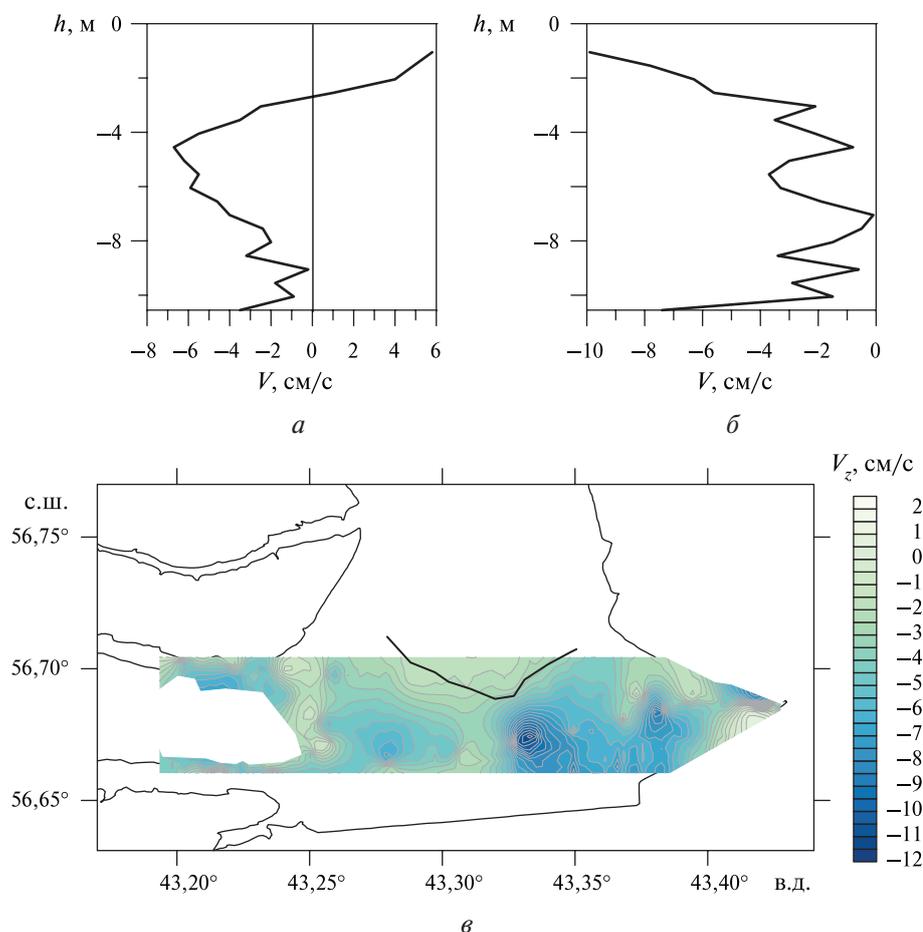


Рис. 3. Профили горизонтальной скорости в области конвергенции течений: *а* — на нижнем разрезе; *б* — на верхнем разрезе; *в* — поле вертикальных скоростей (горизонтальной дивергенции)

Для дальнейшего анализа была выбрана одна из полос, находящихся вблизи зоны конвергенции (схематически изображена на рис. 3в). Данная пенная полоса показывает концентрирование поверхностно-активных веществ и пены в зоне конвергенции течений. Форма пенной полосы объясняется, с одной стороны, вытягиванием по направлению ветра, и с другой — поджатием соседними циркуляционными ячейками по краям.

### Физическое объяснение эффекта

Возможны несколько механизмов, объясняющих формирование конвергентных потоков в данном случае.

При построении поля температуры на поверхности (рис. 4, см. с. 193) была обнаружена разница в значениях температуры между встречными потоками около 2°. Поток, направленный на север, несёт более холодную воду большей плотности и при встрече с тёплым потоком опускается, образуя циркуляционную ячейку (происходит даунвеллинг). С глубиной температура, предположительно, выравнивается, и потоки становятся сонаправленными (течение на обоих профилях (см. рис. 3а, б) направлено в одну сторону в соответствии с основным русловым потоком (Капустин, Мольков, 2019)).

Механизм образования зоны конвергенции, связанной с температурным градиентом, схематично изображён на *рис. 5*. Направление ветра, вдоль которого происходит вытягивание пенной полосы, на *рис. 5a* обозначено символом *W*. Другой возможный механизм формирования встречных потоков может быть связан с режимом работы Горьковской ГЭС. Из статистических данных по расходам, предоставленных ПАО «Русгидро» (<http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/>), известно, что расход воды в течение дня неравномерен (суточное регулирование стока). В момент измерения расход через ГЭС был уменьшен. Движущаяся по инерции масса воды встречает препятствие (дамбу Нижегородской ГЭС) и разворачивается в верхнем слое воды в северном направлении, формируя встречное течение (*рис. 6a*). Поскольку сброс воды производится существенно ниже уровня, в толще вода продолжает течь в соответствии с русловым потоком, а в верхнем слое разворачивается (*рис. 6б, в*).

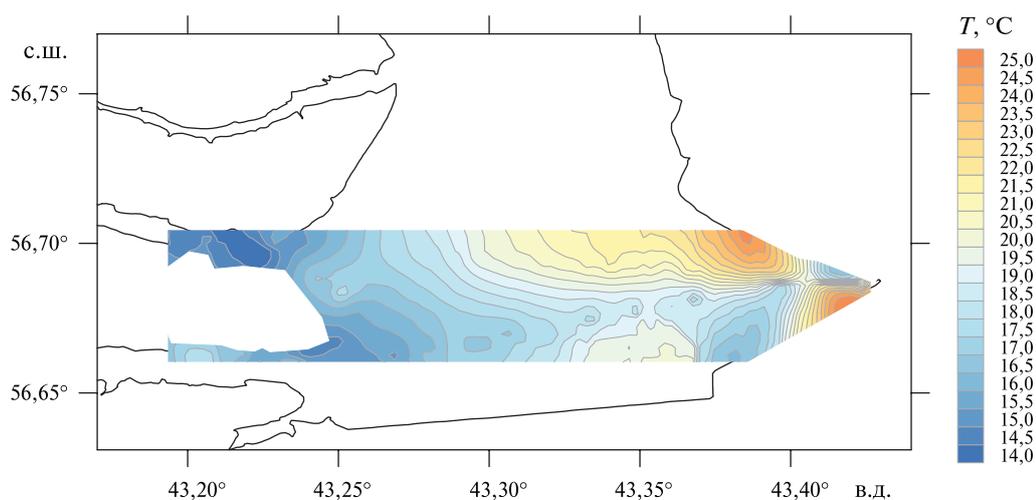


Рис. 4. Распределение поля температуры на поверхности

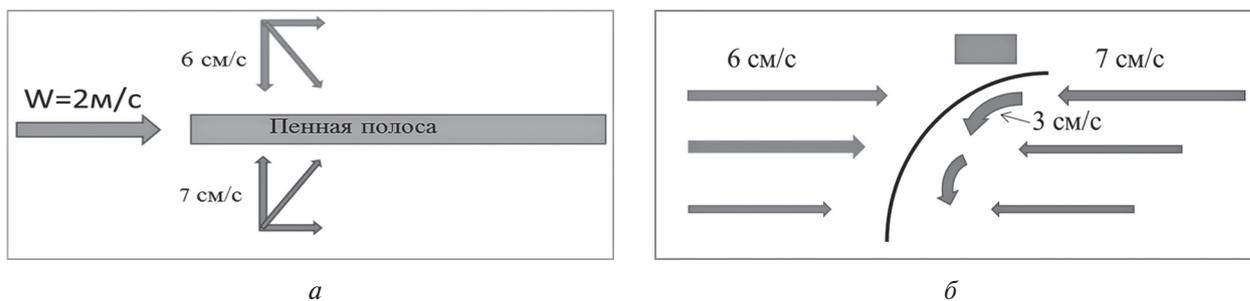


Рис. 5. Течение на границе раздела более тёплой и более холодной воды (горизонтальные температурные неоднородности): *a* — вид сверху; *б* — вид сбоку

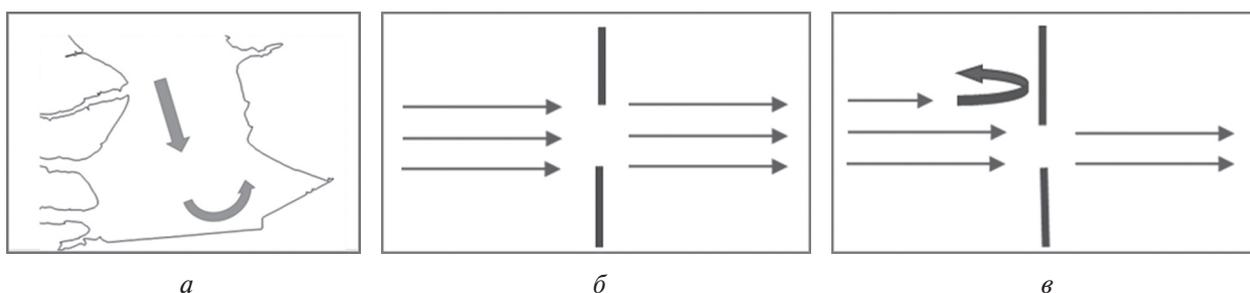


Рис. 6. Схема формирования встречного течения из-за уменьшения расхода жидкости через ГЭС (*a*). Схема течения воды вблизи затвора (водоприёмника), вид сбоку: *б* — открытый затвор; *в* — полуоткрытый затвор для уменьшения расхода через ГЭС

## Заключение

Проведён подспутниковый эксперимент, в ходе которого исследовались пенные структуры на водной поверхности, одновременно наблюдавшиеся визуально и зафиксированные на оптическом спутниковом изображении. В ходе измерений течений была обнаружена система двух конвергентных («встречных») потоков, предположительно связанных с температурными градиентами в верхнем слое воды, а также с суточным регулированием стока ГЭС. Форма полосы на изображении приблизительно соответствует изолиниям конвергенции горизонтальной скорости. В области конвергенции происходит локализация поверхностно-активных веществ и пены, маркирующей эту область. Предложены физические механизмы формирования полос: плёнки ПАВ поджимаются двумя встречными потоками и вытягиваются преимущественно в направлении ветра. Наблюдаемые на спутниковых изображениях пенные структуры могут использоваться для получения информации о структуре течения в верхнем слое водоёма.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-77-10066).

## Литература

1. Даниличева О. А., Ермаков С. А., Капустин И. А. О восстановлении поля поверхностных морских течений с использованием последовательных спутниковых радиолокационных изображений сликовых структур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 206–214.
2. Ермаков С. А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
3. 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.
4. Ермаков С. А., Лаврова О. Ю., Капустин И. А., Ермошкин А. В., Мольков А. А., Даниличева О. А. О гребчатой структуре границ сликов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 208–217.
5. Капустин И. А., Мольков А. А. Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохранилища // Метеорология и Гидрология. 2019. № 7. С. 110–117.
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. Сликы как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Вып. 2. Т. 5. С. 118–123.
8. Лаврова О. Ю., Лупян Е. А., Митягина М. И., Уваров И. А. Информационная система See the Sea: текущие возможности и перспективы развития // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE 2018: сб. ст. 16-й конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 12–16 нояб. 2018, Москва. 2018. С. 367–373.
9. Мольков А. А., Капустин И. А., Ермаков С. А., Сергеевская И. А., Шомина О. В., Лазарева Т. Н., Даниличева О. А., Лещев Г. В. Гидрофизическая лаборатория ИПФ РАН «Геофизик» как эффективный инструмент лимнологического мониторинга // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. ст. конф. 8–14 сент. 2019, Нижний Новгород. 2019. С. 214–218.
10. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
11. Смирнова М. В., Капустин И. А. Развитие нового подхода к исследованию процесса выноса поверхностно-активных веществ всплывающими в жидкости пузырьками газа // Ученые записки физ. фак. Московского ун-та. 2018. № 6. С. 1860302.
12. Шарков Е. А. Обрушающиеся морские волны: структура, геометрия, электродинамика. М.: Науч. мир, 2009. 304 с.
13. Шомина О. В., Капустин И. А., Ермошкин А. В., Ермаков С. А. О динамике искусственной сликовой полосы в прибрежной зоне Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 222–232.
14. Deane G. B., Stokes M. D. Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves // Nature. 2002. V. 418. No. 6900. P. 839–844.

15. Ermakov S., Kapustin I., Lazareva T. Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: observations and physical mechanisms // Proc. SPIE — The Intern. Society for Optical Engineering. 2014. V. 92400N. Art. No. 92400N-6. 7 p. DOI: 10.1117/12.2067367.
16. 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. No. 7. Art. No. 840. 17 p.
17. Peltzer R. D., Griffin O. M., Barger W. D., Kaiser J. A. C. High resolution measurements of surface-active film redistribution in ship wakes // J. Geophysical Research. 1992. V. 97. No. C4. P. 5231–5252.
18. Shomina O. V., Ermoshkin A. V., Danilicheva O. A., Tarasova T. V., Kapustin I. A., Ermakov S. A. Slick bands kinematics due to marine current and wind: study and simulation // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE. 2019. V. 11150. Art. No. 111501J. 6 p.
19. Wetter R. A., Dean P. Jr., Marra J., Price J. F., Francis E. A., Boorman D. C. Three-Dimensional Flow in the Upper Ocean // Science. 1985. V. 227. P. 1552–1556.

## Field observations of convergent currents in the near-surface layer of water using foam patterns in quasi-synchronous satellite optical images

I. A. Kapustin<sup>1,2</sup>, D. V. Vostryakova<sup>1,3</sup>, A. A. Molkov<sup>1,2</sup>,  
O. A. Danilicheva<sup>1</sup>, G. V. Leshchev<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

<sup>3</sup> Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603950, Russia  
E-mail: kapustin-i@yandex.ru

Foam bands are observed on the water surface under the conditions of moderate and strong winds. There are several causes for the appearance of foam structures on the surface of the reservoir. For example, foam can be produced during the process of wave breaking or due to the emersion of dissolved bubbles with surfactants adsorbed on their surface. The shape of foam structure is affected by subsurface current which leads to the transfer and compression of surfactants on the water surface. Foam structures are also characterized by color contrast and can be observed in optical images. The paper presents the results of the investigation of foam band structure on the water surface. Quasi-synchronous measurements of current and wind fields and optical satellite imaging by Sentinel-2A are performed during experiments in the Gorky reservoir. The convergence zone, which is associated with a temperature gradient and an uneven water flow through the hydroelectric power plant, is observed near the location of the foam band. Possible mechanisms of the foam bands formation are considered and their physical explanation are proposed.

**Keywords:** foam on the sea surface, surfactant films, slicks, ADCP measurements, satellite images, convergence of currents

Accepted: 07.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-188-196

## References

1. Danilicheva O. A., Ermakov S. A., Kapustin I. A., O vosstanovlenii polya poverkhnostnykh morskikh techenii s ispol'zovaniem posledovatel'nykh sputnikovyykh radiolokatsionnykh izobrazhenii slikovyykh struktur (On the retrieval of surface marine currents field using sequential satellite SAR images of slick structures), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 206–214.
2. Ermakov S. A., *Vliyaniye plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnyykh voln* (Impact of films on the dynamics of gravity-capillary waves), Nizhny Novgorod: IPF RAN, 2010, 164 p.

3. 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.
4. Ermakov S. A., Lavrova O. Yu., Kapustin I. A., Ermoshkin A. B., Molkov A. A., Danilicheva O. A., O grebenchatoi strukture granits slikov na morskoi poverkhnosti (On the “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.
5. Kapustin I. A., Molkov A. A., Struktura techenii i glubiny v ozernoi chasti Gor’kovskogo vodokhranilishcha (The structure of currents and depths in the lake part of the Gorky reservoir), *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2019, No. 7, No. 2, pp. 206–214.
6. 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 slicks 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.
7. Lavrova O. Yu., Sliki kak indikator y vikhrevoi aktivnosti v pribrezhnoi zone (Slicks as indicators of eddy activity in the coastal zone), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 5, No. 2, pp. 118–123.
8. Lavrova O. Yu., Loupian E. A., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Informatsionnaya sistema See the Sea: tekushchie vozmozhnosti i perspektivy razvitiya (See the Sea Information System. Current Capabilities and Prospects of Development), *Informatsionnye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli — RORSE 2018, Proc.* (Information Technologies in Remote Sensing of the Earth — RORSE 2018), 2018, pp. 367–373.
9. Molkov A. A., Kapustin I. A., Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Shomina O. V., Lazareva T. N., Danilicheva O. A., Leshchev G. V., Gidrofizicheskaya laboratoriya IPF RAN “Geofizik” kak effektivnyi instrument limnologicheskogo monitoringa (Hydrophysical laboratory of IAP RAS “Geophysicist” as an effective tool for limnological monitoring), *Nauchnye problemy ozdorovleniya rossiiskikh rek i puti ikh resheniya, Proc.* (Scientific problems of rehabilitation of Russian rivers and ways to solve them), 2019, pp. 214–218.
10. Monin A. S., Krasitskii V. P., *Yavleniya na poverkhnosti okeana* (Phenomena on the ocean surface), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 376 p.
11. Smirnova M. V., Kapustin I. A., Razvitie novogo podkhoda k issledovaniyu protsessa vynosa poverkhnostno-aktivnykh veshchestv vsplyvayushchimi v zhidkosti puzyr’kami gaza (Development of a new approach to the study of the process of removal of surfactants by floating gas bubbles in fluid), *Uchenye zapiski fizicheskogo fakulteta Moskovskogo universiteta*, 2018, No. 6, p. 1860302.
12. Sharkov E. A., *Obrushayushchiesya morskije volny: struktura, geometriya, elektrodinamika* (Breaking sea waves: structure, geometry, electro-dynamics), Moscow: Nauchnyi mir, 2009, 304 p.
13. Shomina O. V., Kapustin I. A., Ermoshkin A. V., Ermakov S. A., O dinamike iskusstvennoi slikovoi polosy v pribrezhnoi zone chernogo morya (On the dynamics of artificial slick band in the coastal zone of the Black Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 222–232.
14. Deane G. B., Stokes M. D., Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves, *Nature*, 2002, Vol. 418, No. 6900, pp. 839–844.
15. Ermakov S., Kapustin I., Lazareva T., Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: observations and physical mechanisms, *Proc. SPIE — The Intern. Society for Optical Engineering*, 2014, Vol. 92400N, Art. No. 92400N-6, 7 p., DOI: 10.1117/12.2067367.
16. 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. 7, Art. No. 840, 17 p.
17. Peltzer R. D., Griffin O. M., Barger W. D., Kaiser J. A. C., High resolution measurements of surface-active film redistribution in ship wakes, *J. Geophysical Research*, 1992, Vol. 97, No. C4, pp. 5231–5252.
18. Shomina O. V., Ermoshkin A. V., Danilicheva O. A., Tarasova T. V., Kapustin I. A., Ermakov S. A., Slick bands kinematics due to marine current and wind: study and simulation, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. Proc. SPIE*, 2019, Vol. 11150, Art. No. 111501J, 6 p.
19. Wetter R. A., Dean P. Jr., Marra J., Price J. F., Francis E. A., Boarman D. C., Three-Dimensional Flow in the Upper Ocean, *Science*, 1985, Vol. 227, pp. 1552–1556.