



УДК 556.044

**Даниличева Ольга Аркадьевна**, старший лаборант-исследователь отдела радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН

**Ермаков Станислав Александрович**, д.ф.-м.н., зав. отделом радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН, зав.кафедрой ГТКиЭБС ВГУВТ

**Мольков Александр Андреевич**, к.ф.-м.н, научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН, старший научный сотрудник ВГУВТ

**Капустин Иван Александрович**, к.ф.-м.н, старший научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН, старший научный сотрудник ВГУВТ

**Лазарева Татьяна Николаевна**, ведущий программист отдела радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН»  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

---

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 18-45-520004, 17-05-00448 и Русского географического общества (гранта «Экспедиция Плавающий университет Волжского бассейна» № 02/2019-Р) и), а также темы ГЗ Разработка радиофизических методов исследования океана (0035-2019-0006).*

---

## **СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ РЕК ОКА И ВОЛГА, И ИХ ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ**

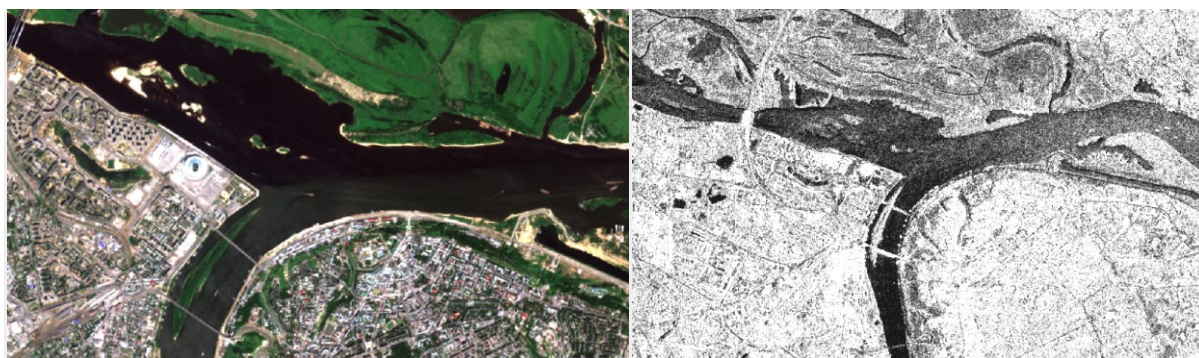
*Ключевые слова:* слияние рек, зона смешения, оптическое и радиолокационное дистанционное зондирование, слики

*Аннотация.* Анализируются спутниковые радиолокационные и оптические изображения двух сливающихся рек - Волги и Оки. Получено, что проявления зоны слияния на оптических изображениях определяются различием в цвете речных потоков. На радиолокационных изображениях зона смешения проявляется как темная область, полученная из-за подавления коротких ветровых волн пленками в сликовой/пенной полосе, расположенной между потоками и образованной в результате накопления здесь поверхностно-активных веществ. Изучены характеристики сликовой полосы, результаты натурных измерений согласуются со спутниковыми наблюдениями.

Процессы слияния рек играют важную роль в динамике рек, формировании русла, перемешивании вод и распространении загрязнений. Зачастую после точки слияния двух речных потоков можно наблюдать, что они продолжают течь как два квазипараллельных потока, в основном сравнительно слабо смешиваясь друг с другом. При этом формируется достаточно тонкая переходная область - зона смешения (ЗС). Типичным примером слияния рек и формированием зоны смешения являются реки Ока и Волга. Поскольку именно характеристики зоны смешения, в частности ее ширина, являются индикаторами интенсивности процессов горизонтального и вертикального турбулентного перемешивания и обмена импульсом и веществом между двумя потоками, крайне важным является изучение физических механизмов, определяющих проявления ЗС в приповерхностных слоях воды, а также на самой водной поверхности. Анализ данных механизмов дает возможность развития дистанционных (оптических и радиолокационных) методов экологического мониторинга речных потоков.

Наиболее известным даже из повседневных наблюдений индикатором процессов смешения рек является цвет воды, который может существенно различаться у сливающихся потоков из-за переносимых минеральных частиц или органической взвеси, в частности, фитопланктона. Цветовые различия могут хорошо проявляться и на оптических изображениях [1], и размытие области перехода от потока одного цвета к другому характеризует интенсивность процессов смешения вод. Цветовой контраст сливающихся речных потоков – не единственная характеристика зоны слияния рек. Область, разделяющая два потока, может проявиться на водной поверхности за счёт slickовой полосы или системы полос, образованных при скоплении поверхностно-активных веществ в ЗС. Такие полосы проявляются как на фотографиях (см [2]), так и на радиолокационных изображениях из-за сильного подавления коротких ветровых волн плёнкой и могут использоваться как маркеры зоны смешения.

Некоторые примеры спутниковых изображений слияния рек Ока и Волга представлены на рис.1. На рис.1а показано спутниковое изображение, полученное по данным оптического сканера Sentinel-2B MSI 03.07.2018 в 08:25:59 по UTC. Оптическое изображение демонстрирует достаточно большое различие в цвете между реками Волга и Ока: Ока более мутная и выглядит более зелёной. Кроме того, хорошо видна граница раздела двух потоков. Резкая граница между потоками разного цвета сохраняется вниз по течению на расстояниях, по крайней мере, порядка нескольких масштабов ширины реки Волги. На рис 1б представлено радиолокационное изображение, полученное 23.08.2018 в 03:29:01 по UTC с помощью Sentinel-1A SAR (рис.1б).



(а)

(б)

*Рис 1. Слияние рек Ока и Волга на изображениях, полученных с помощью Sentinel-2B MSI (а) и Sentinel-1A SAR (б)*

На радиолокационном изображении (рис. 1б) можно увидеть тёмную полосу, которая соответствует slickовой полосе, визуализирующей зону смешения рек.

Для исследования характеристик slickовой полосы, были отобраны пробы с поверхности воды в зоне смешения рек Ока и Волга. Отбор проб происходил с моторной лодки поперек течения, а образцы поверхности брались с помощью пластиковых сеток

диаметром около 6 см. Взятые пробы помещались на поверхность воды в специальной кювете, установленной на вибростенде, затем измерялись характеристики параметрически возбуждаемой ряби в присутствии пленки и по ним определялись коэффициент поверхностного натяжения и упругость (см. [3]). Зависимости коэффициента поверхностного натяжения и упругости от расстояния от левого берега представлены на рис.2.

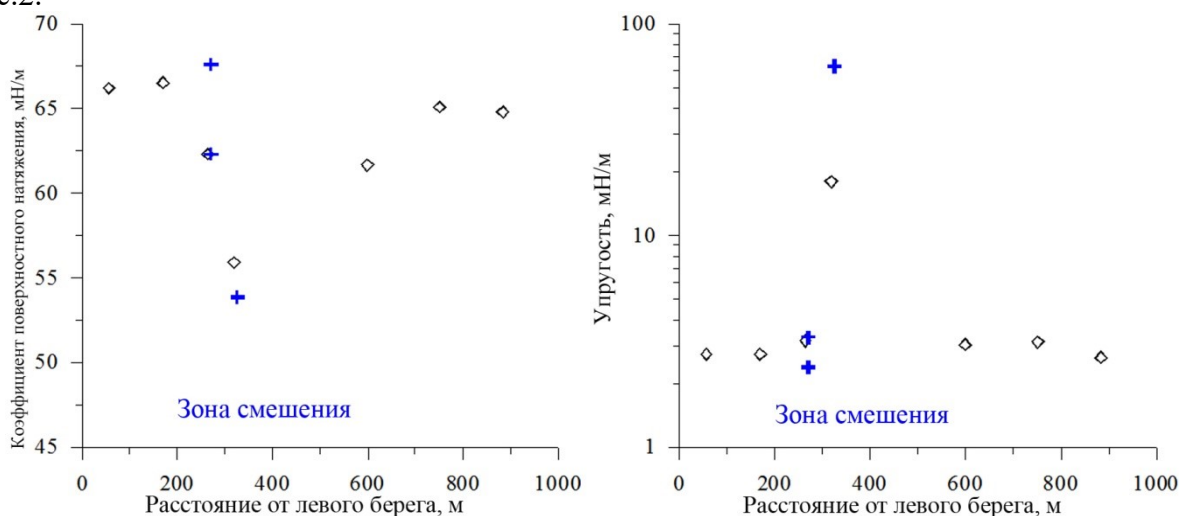


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициента поверхностного натяжения и упругости плёнок в поперечном сечении Волги ниже по течению после точки ее слияния с Окой.

Из результатов измерений на рис.2 следует, что коэффициент поверхностного натяжения значительно уменьшается, а коэффициент упругость пленки возрастает в области смешения рек Ока и Волга, что свидетельствует о повышенной концентрации поверхностно-активных веществ в ЗС. Это подтверждает гипотезу о том, что ПАВ накапливаются в переходной области сдвигового течения между двумя речными потоками с отличными друг от друга скоростями. Концентрирование ПАВ, очевидно, связано с наличием поперечных конвергентных компонент скоростей в области сдвигового течения. Приведенные результаты наблюдений пленок 'in situ' согласуются с данными спутниковых радиолокационных наблюдений, а именно, с существованием сликовой полосы на радиолокационных изображениях. Следует отметить, однако, что характеристики сликовой полосы, как и само ее существование, сильно зависят от метеорологических условий, таких как скорость ветра и интенсивность волнения. Как правило, плёнка в области ЗС хорошо регистрируется при слабом ветре, тогда как при скоростях ветра порядка 6-7 м/с и более она отсутствует. Следует отметить еще одну особенность проявления ЗС на поверхности, а именно, наличие, наряду с пленкой, пены в сликовой полосе в условиях не слишком малых скоростей ветра. Образование пены предположительно связано с обрушениями ветровых волн, интенсификация которых в ЗС может быть связана с горизонтальным сдвигом скорости течения в переходной области сдвигового течения (см. выше). При этом с ростом скорости ветра и интенсивности ветрового волнения, вместо сликовой полосы в зоне смешения наблюдается полоса пены.

Таким образом, в результате выполненных исследований подтвержден механизм проявления зоны слияния рек на спутниковых оптических изображениях (на примере Sentinel-2B MSI) за счёт разницы в цвете водных масс рек. На радиолокационных изображениях зона смешения может проявляться как сликовая полоса, образованная при аккумуляции поверхностно-активных веществ в области сливающихся речных потоков. Анализ плёнок в зоне смешения показал, что коэффициент поверхностного натяжения падает, а упругость увеличивается, что соответствует повышенной концентрации ПАВ в данной области и отвечает механизму отображения зоны слияния на радиолокационных изображениях за счет подавления коротких ветровых волн в слике.

### Список литературы:

[1] Слияние двух рек. <https://www.yaplakal.com/forum2/topic1940655.html>

[2] Ermakov, S.A., Molkov, A.A., Kapustin, I.A., Lazareva, T.N., Danilicheva, O.A., Shomina, O.V., Smirnova, M.V., and Lavrova, O.Y. Satellite and in-situ observations of a river confluence zone. // Proc. SPIE 11150, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. – 2019. - 111501S.

[3] Ermakov, S. A., Kijashko, S. V. Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films // Marine surface films. Springer. – 2006. – С. 113-128 .

## SATELLITE OBSERVATIONS OF THE VOLGA-OKA MIXING ZONE AND THEIR PHYSICAL INTERPRETATION

*Olga A. Danilicheva, Stanislav A. Ermakov, Aleksandr A. Molkov, Ivan A. Kapustin, Tatiana N. Lazareva*

*Keywords: confluence zone, mixing zone, optical and radar remote sensing, slicks*

*Satellite radar and optical images of two merging rivers- the Volga and the Oka are analyzed. It is obtained that manifestations of the confluence zone in optical images are determined by different colors of water for the rivers. The confluence zone appears in radar images due to suppression of short wind waves is a slick /foam band located between the flows and formed due to surfactant accumulation. Characteristics of the slick/foam band have been studied, the results of 'in situ' measurements are consistent with satellite observations.*