

ГИДРОФИЗИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ТЕЧЕНИЯ ПЛЮМА РЕКИ КОДОР

© 2021 г. А. А. Осадчиев^{1, *}, А. А. Барымова², Р. О. Седаков^{1, 3}, А. В. Рыбин³,
А. Г. Танурков³, А. А. Крылов^{1, 3}, В. В. Кременецкий¹, С. А. Мошаров^{1, 4}, А. А. Полухин¹,
А. С. Ульянов¹, М. А. Осадчиев¹, Р. С. Дбар⁵

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁵Институт экологии АНА, Сухум, Абхазия

*e-mail: osadchiev@ocean.ru

Поступила в редакцию 10.02.2020 г.

После доработки 05.08.2020 г.

Принята к публикации 15.08.2020 г.

Данная работа посвящена исследованию плюма реки Кодор, крупнейшей реки Абхазии и всего северо-восточного побережья Черного моря. На основе натурных гидрологических данных, квадрокоптерной аэрофотосъемки и спутниковых наблюдений изучены гидрофизическая структура и циркуляция в плюме реки Кодор при различных условиях речного стока. Сток реки Кодор, поступающий в море из нескольких дельтовых рукавов, формирует плюм сравнительно небольшой толщины, но большой площади по сравнению с Мзымтой, крупнейшей эстуарной рекой этого региона, при схожих гидрологических, метеорологических и океанографических условиях. Из-за своих малых вертикальных размеров и значительного градиента солености на границе с нижележащими морскими водами плюм Кодора характеризуется быстрым откликом на изменчивость ветровых условий. Плюм Кодора также отличается значительной пространственной неоднородностью, вызванной как условиями его формирования (несколько близкорасположенных источников пресноводного стока, подверженных резким колебаниям расхода воды), так и региональной донной топографией (взаимодействием плюма с мелководными банками). В период низкого стока впадающая в море струя реки Кодор имеет сравнительно малую кинетическую энергию, что приводит к быстрому замедлению потока в приустьевой зоне моря. В результате этого инерция впадающей речной струи резко уменьшается, и в приустьевой зоне формируется значительный градиент скорости и градиент давления, который препятствует формированию приустьевой антициклонической циркуляции в плюме. Этот эффект способствует выносу пресноводного стока от речного устья и его аккумуляции во внешней части малого речного плюма под воздействием умеренных ветровых условий, что нетипично для больших речных плюмов. Полученные результаты важны для понимания общих аспектов динамики речных плюмов, сформированных дельтовыми реками с небольшим стоком.

Ключевые слова: речной плюм, прибрежная циркуляция, материковый сток, ветровое воздействие, Черное море, река Кодор

DOI: 10.31857/S0030157421010159

1. ВВЕДЕНИЕ

В Черное море с территории республики Абхазия поступает значительный материковый сток, составляющий около 30 км³ в год [3]. Из этого количества менее половины приходится на долю нескольких крупных рек: Кодор (4.2 км³), Бзыбь (3.8 км³), отводящий канал Ингурской ГЭС (3.2 км³), Ингур (1.2 км³) и Гумиста (1.1 км³) (рис. 1). Большая же часть общего материкового стока с территории Абхазии поступает в Черное море из более

чем 30-ти малых рек, чьи водосборные бассейны расположены в многочисленных ущельях южной части Главного Кавказского хребта и по площади не превышают 500 км².

Абхазия занимает всего 5% от общей длины черноморской береговой линии, в то время как пресноводный сток с территории Абхазии составляет 8–10% суммарного пресноводного стока в Черное море [2, 3]. Таким образом, роль пресноводного стока в формировании гидрологической структуры и динамических процессов в прибреж-

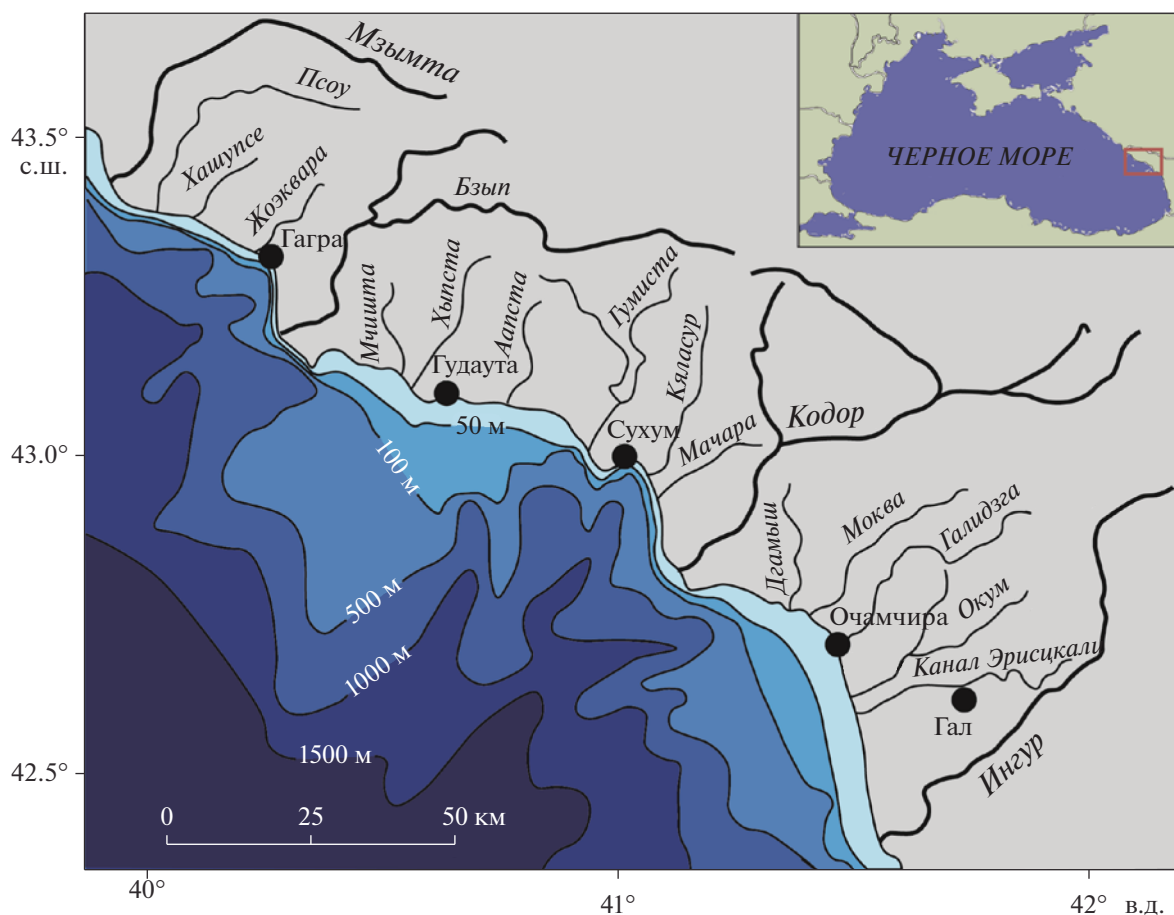


Рис. 1. Основные реки, города и донная топография абхазского участка побережья Черного моря. Название реки Кодор выделено жирным шрифтом.

ной зоне моря в этом регионе существенно выше, чем в среднем в Черном море. Эти процессы особенно сильно выражены во время периодов весенне-летнего половодья и краткосрочных осенних дождевых паводков, когда в результате повышенного расхода многочисленных рек вдоль протяженных участков абхазского побережья формируются опресненные водные массы, существенно влияющие на структуру и динамику прибрежной зоны (рис. 2).

Регулярные океанографические измерения в прибрежной зоне моря Абхазии активно велись вплоть до начала 1990-х годов, результатом чего стала относительно хорошая по меркам тех лет изученность общей структуры прибрежной зоны в районах поступления материкового стока. Тем не менее, измерения с применением современных методик и приборов в этом регионе практически не проводились, так как на протяжении почти 30-ти последних лет исследования в прибрежной зоне моря Абхазии сводились к эпизодическим мониторинговым измерениям. За этот период произошли значительные изменения тем-

пературного режима и годового количества осадков, зафиксированные на метеорологических станциях республики Абхазия, по сравнению с состоянием в 1950-х–1980-х годах. В результате этого современное влияние стока рек Абхазии на структуру и динамику прибрежной зоны моря является практически не изученным. В современной научной литературе имеются лишь единичные и довольно ограниченные по объему данные об этих процессах [8, 11, 12], которые имеют важное социально-экономическое и рекреационное значение для республики Абхазия.

Проведенные исследования плюмов, сформированных малыми реками Абхазии, имеют также важное фундаментальное значение в контексте изучения общих аспектов динамики малых речных плюмов. Процессы трансформации пресноводного материкового стока в результате его взаимодействия с морскими водами можно рассматривать и анализировать на различных пространственных и временных масштабах. Изначально речной сток поступает в море из речного устья и формирует субмезомасштабную или мезомас-



Рис. 2. Многочисленные речные плумы вдоль побережья Абхазии и участки вдольберегового опреснения 6 апреля 2018 года во время весеннего половодья, видимые на спутниковом снимке оптического диапазона Landsat 8.

штабную водную массу, называемую речным плумом, чья соленость существенно меньше солености окружающей морской воды. Сила плавучести играет важную роль в распространении и перемешивании этой опресненной водной массы, поэтому динамика речных плумов и окружающих вод моря различна из-за различий в их солености [40, 43]. Таким образом, соленость является основной характеристикой, используемой для разделения речных плумов и морской воды, т.е. для определения зоны смешения, где заканчивается речной плум и начинается морская вода.

Речной плум в общем случае формируется одним или несколькими разделенными источниками пресноводного стока. Структура и динамические характеристики внутри речного плума существенно неоднородны. В частности, поля солености и скорости течения в плуме вблизи источника/источников пресноводного стока и во внешней части плума значительно отличаются [16, 21, 27, 33, 34]. Речной плум распространяется

и перемешивается с окружающей морской водой, что, с одной стороны, приводит к его трансформации, а, с другой стороны, влияет на физические, биологические и геохимические характеристики окружающих вод моря. Степень и пространственный масштаб этого влияния в основном зависят от объема пресноводного стока и варьируются от незначительного воздействия малых речных плумов, формируемых реками с небольшим объемом стока [5, 24, 42–45, 49, 53], до формирования опресненных водных масс в поверхностном слое моря на обширных прибрежных и шельфовых территориях [9, 14, 17, 35, 38, 39, 41, 47, 48, 52]. Эти водные массы, называемые также опресненными линзами, характеризуются более однородной структурой, существенно большими пространственными масштабами и меньшей временной изменчивостью по сравнению с речными плумами.

Мы рассматриваем речные плумы как водные массы, получающиеся в результате трансформа-

ции пресноводного стока в прибрежной зоне моря на временных масштабах от суточного до синоптического, а опресненные линзы — в результате трансформации пресноводного стока на временных масштабах от сезонного до годового. Речные плюмы, вложенные в опресненные линзы, представляют собой непрерывный процесс трансформации пресноводного стока и, тем самым, не могут быть четким образом отделены друг от друга. С другой стороны, у речных плумов и опресненных линз очень разные термohалинные и динамические свойства. Поэтому взаимодействие речных плумов и окружающих их опресненных линз существенно влияет на динамику распространения и перемешивания речных плумов на синоптических временных масштабах [23, 34, 36, 37, 46].

В этой статье мы рассматриваем малые речные плюмы, поэтому необходимо задать характеристики малых речных плумов, которые отличают их от больших речных плумов. Мы определяем малые речные плюмы как плюмы, которые не формируют опресненные линзы, т.е. время существования опресненной воды в малом речном плюме имеет масштаб от часов до дней [43]. Диссипация опресненной воды в результате перемешивания малого плюма с нижележащими морскими водами практически не влияет на окружающие воды моря и не приводит к аккумуляции пресноводного стока в прилегающих районах моря. В результате этого малые плюмы характеризуются значительными градиентами солености и, тем самым, плотности на их границах с окружающими морскими водами. Эти градиенты плотности препятствуют вертикальному обмену энергии между малым плюмом и нижележащим слоем моря.

Подобное свойство сильно влияет на динамику распространения малого плюма в силу следующих причин. Во-первых, большая часть ветровой энергии, передаваемой в море, остается в малом плюме, так как вертикальный поток импульса значительно уменьшается на градиенте плотности между плюмом и нижележащим слоем моря. Таким образом, напряжение трения ветра концентрируется в узком опресненном поверхностном слое, что приводит к более высоким скоростям движения и более быстрому отклику динамики малого плюма на изменчивость ветрового воздействия по сравнению с окружающими водами [6, 7]. Во-вторых, циркуляция в окружающих морских водах слабо влияет на динамику малого плюма из-за того, что градиент плотности препятствует вертикальному потоку энергии от нижележащего слоя моря к малому плюму [42]. В результате этих факторов динамика малых плумов определяется в первую очередь ветром, что приводит к очень высокой временной изменчивости их расположений, форм и площадей [31, 32, 40, 53]. Тип распространения малого плюма может кар-

динально измениться в течение нескольких часов, что регулярно регистрируется натурными измерениями и спутниковыми наблюдениями. Высокая пространственно-временная изменчивость малых плумов и их малые вертикальные размеры часто приводят к большой неоднородности их горизонтальной структуры.

2. РАЙОН РАБОТ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Кодор — крупнейшая река Абхазии и всего северо-восточного побережья Черного моря. Река Кодор впадает в Черное море в 20 км к югу от г. Сухум на выступающем в море участке побережья, расположенном между Сухумским и Скурчинским заливами. При впадении в море река Кодор образует дельту площадью 10 км² с несколькими рукавами, искусственно созданную в последние годы в результате строительства дополнительных дельтовых русел, берегозащитных и гидротехнических сооружений. Водный режим реки Кодор имеет ярко выраженное весенне-летнее половодье и осенне-зимнюю межень [1]. Кроме того, на реке ежегодно формируются более десятка интенсивных, но краткосрочных дождевых паводков, большинство из них происходит в осенне-зимний период. Резкие подъемы и спады уровня воды во время паводков вызваны большим уклоном водосбора реки Кодор (до 40°–60°), занимающего горные ущелья южной части Главного Кавказского хребта, и высокой густотой речной сети, что приводит к быстрому поступлению дождевой воды в речные русла. В силу сравнительно небольшой площади водосбора (около 2000 км²) и малой длины реки (84 км), расход воды в низовьях реки Кодор и, тем самым, объем речного стока в море может резко увеличиваться в течение нескольких часов после начала интенсивных осадков.

Работа по изучению плюма Кодора основана на натурных данных, собранных в ходе двух прибрежных экспедиций в придельтовую зону реки Кодор, которые проводились при различных условиях речного стока: в период краткосрочного дождевого паводка 29 августа–2 сентября 2018 года и в период зимне-весенней межени 1–4 апреля 2019 года. Экспедиционные работы велись на малых рыболовецких судах “Владимир” и “Адыгеец” и включали в себя гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические исследования. В этой статье мы рассматриваем и интерпретируем результаты гидрофизических измерений, в то время как гидрохимическим исследованиям посвящена сопутствующая статья [10].

Используемые натурные данные включают непрерывные измерения температуры и солености в поверхностном слое (на глубине 1 м) вдоль

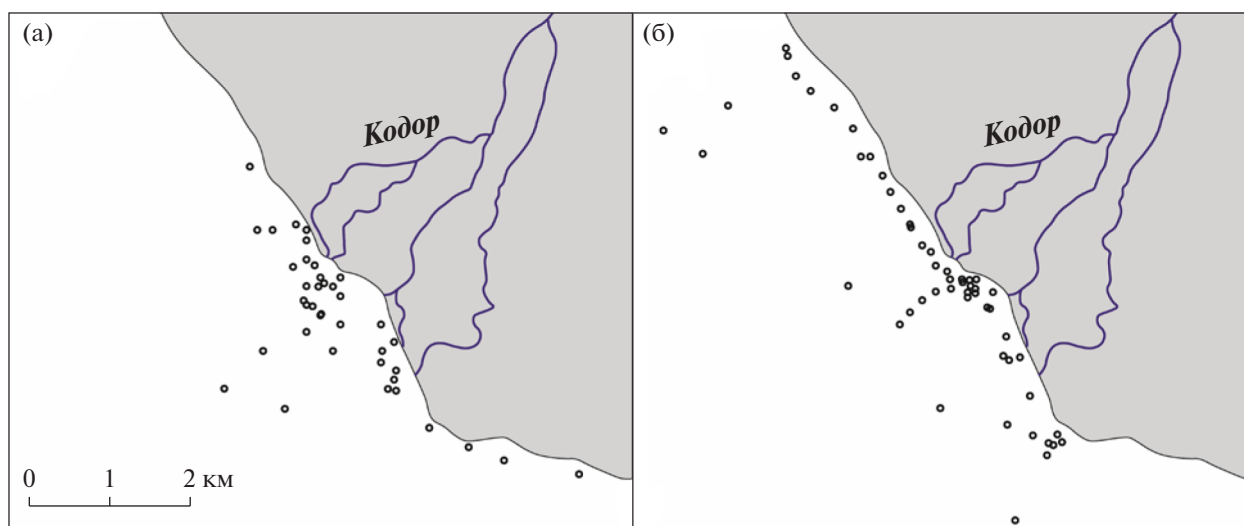


Рис. 3. Расположение гидрологических станций в зоне распространения плюма Кодора 29 августа – 2 сентября 2018 года (а) и 1–4 апреля 2019 года (б).

хода движения судна с помощью проточной системы, оборудованной CTD-зондом (*Yellow Springs Instrument 6600 V2*) [4, 5], и измерения вертикальных профилей температуры, солёности и скорости течения на гидрологических станциях, полученные с помощью CTD-ADCP-зонда (*Aanderaa SeaGuard RCM*) с 29 августа по 2 сентября 2018 года и CTD-зонда (*Sea-Bird Electronics 19plus*) с 1 по 4 апреля 2019 года (рис. 3).

В рамках экспедиционных работ использовался беспилотный летательный аппарат (квадрокоптер *DJI Phantom 4Pro*). Габариты этого квадрокоптера позволяют осуществлять взлет и посадку с палубы маломерного судна. Во время полета осуществлялась фото- и видеосъемка ключевых морфологических зон и динамических особенностей речного плюма для рекогносцировки, наблюдений за динамикой речного плюма, выбора точек гидрофизических работ и позиционирования судна. Также для исследования структуры поверхностных течений в приустьевой зоне речного плюма был проведен эксперимент с использованием плавучих дрейфтеров. В реку Кодор были запущены две серии дрейфтеров. Перемещение дрейфтеров в прибрежной зоне с момента их попадания в море отслеживалось с помощью видеосъемки с квадрокоптера. На основе компьютерной обработки полученных видеозаписей были восстановлены скорости и траектории течений в приустьевой части плюма.

Основные метеорологические характеристики (скорость и направление ветра, температура, влажность, атмосферное давление) измерялись при помощи портативной метеорологической станции *Gill GMX200*. Метеостанция была установлена на высоте 10 м на пирсе в районе м. Крас-

ный маяк (г. Сухум) на расстоянии 30 метров от берега вдали от возвышений рельефа, высоких деревьев и сооружений. Дискретность измерений метеорологических характеристик составляла 1 минуту. Кроме натурных данных, в работе использовались спутниковые изображения исследуемого региона, полученные сенсорами Landsat 8 OLI (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) и Sentinel-2 MSI (<https://scihub.copernicus.eu/>).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Гидрологическая структура плюма Кодора.

Гидрологическая структура плюма реки Кодор изучалась на основе натурных данных, спутниковых снимков и коптерной съемки. На основе натурных измерений были построены карты распределения солёности в поверхностном слое моря в области влияния стока реки Кодор, которые дают представление о термохалинной структуре и пространственных масштабах плюма. На рис. 4 показаны карты поверхностного распределения солёности за 31 августа, 1 и 2 сентября 2018 г., построенные по данным измерений проточной системы. Коптерная аэрофотосъемка плюма, проведенная в рамках экспедиционных работ, позволила уточнить пространственные масштабы плюма, исследовать его мелкомасштабную внутреннюю структуру и короткопериодную временную изменчивость (рис. 5). Спутниковые снимки Landsat 8 и Sentinel-2 исследуемого региона, полученные в период экспедиционных работ, позволяют сопоставить изображения плюма Кодора в оптическом диапазоне с распределениями поверхностной солёности и сравнить солёностную и мутностную структуры поверхностного слоя моря в области влияния стока реки Кодор (рис. 6).

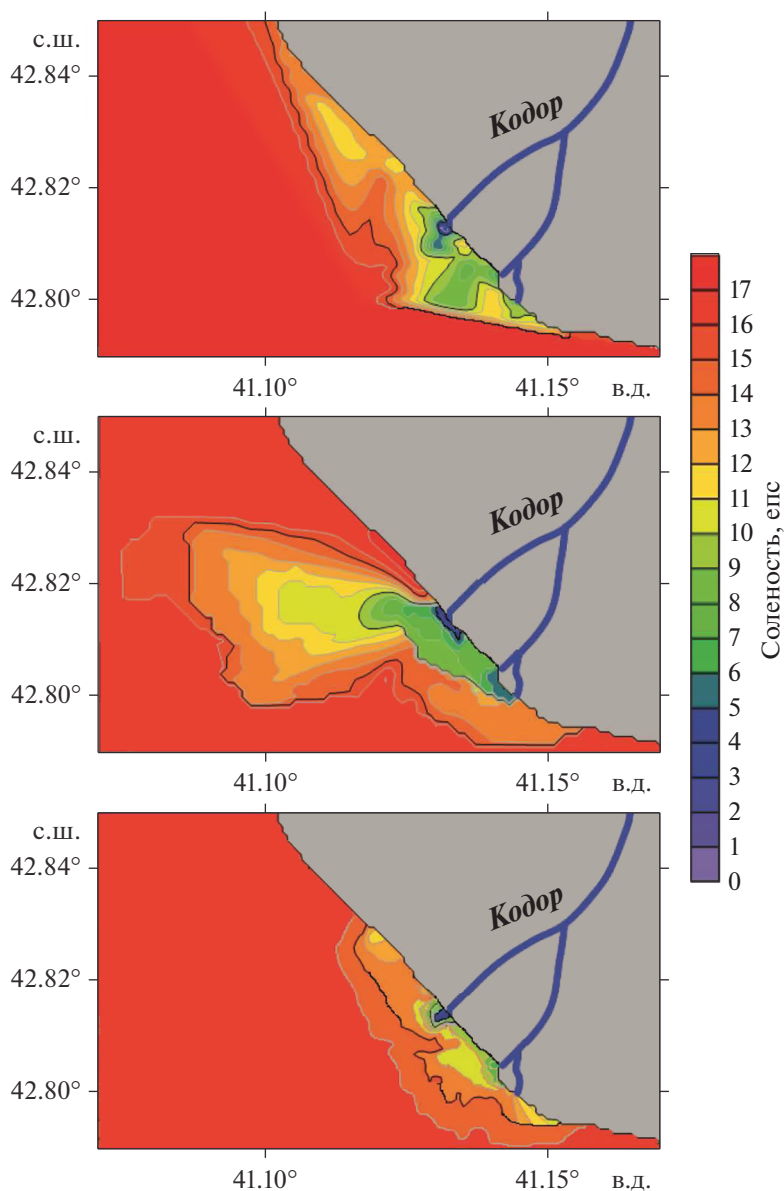


Рис. 4. Поверхностное распределение солёности в области влияния стока реки Кодор 31 августа (а), 1 сентября (б) и 2 сентября (в) 2018 года.

Последующий анализ оптических спутниковых снимков Landsat 8 и Sentinel-2 исследуемого региона, сделанных в 2013–2019 годах, позволяет изучить синоптическую и сезонную изменчивость плюма Кодора, в частности, оценить его отклик на колебания стока во время весеннего половодья – летней межени, а также краткосрочных осенне-зимних паводков.

Натурные термохалинные измерения показали, что плюм Кодора четко характеризуется пониженными значениями солёности (<15 ‰) по сравнению с солёностью (16–18 ‰) окружающих морских вод (рис. 4). Температура в плюме также была меньше температуры морской воды

из-за снежно-ледникового типа водного питания реки Кодор [1]. Разница между температурой поверхностного слоя моря и плюма была сравнительно невелика в период полевых работ в конце холодного периода года в апреле 2019 года (0.5°C), но в августе–сентябре 2018 года в условиях прогретого моря она составляла существенные 3–4°C. Внешние границы областей пониженной температуры, пониженной солёности и повышенной мутности в поверхностном слое хорошо коррелируют между собой. При пересечении четкого фронта между морем и плюмом солёность поверхностного слоя резко падала с 16–18 ‰ до 13–15 ‰ на расстоянии менее 5 м, что сопровождалось



Рис. 5. Аэрофотоснимки южной части плюма Кодора, сделанные 1 сентября 2018 года (а), 2 сентября 2018 года (б), 3 апреля 2019 года (в). Стрелкой показано расположение мыса Кодор.



Рис. 6. Спутниковые снимки Sentinel-2 исследуемого полигона в оптическом диапазоне, сделанные 27 июня (а), 31 августа (б) и 5 октября (в) 2018 года. Стрелкой показано расположение мыса Кодор.

лось падением температуры и повышением мутности. Подобные резкие градиенты свидетельствуют о малом влиянии процесса перемешивания речного плюма с солеными морскими водами на термохалинные и оптические свойства окружающих вод моря. Подобная ситуация характерна для плюмов, формируемых малыми реками на открытых участках побережья, в частности, для плюмов малых рек российского участка побережья Черного моря [5, 31, 42].

Мы провели сравнение гидрологической структуры плюма реки Кодор и плюма реки Мзымты, крупнейшей эстуарной реки российского участка побережья Черного моря, чье устье расположено в 120 км к северо-западу от дельты реки Кодор. Плюмы рек Кодор и Мзымта формируются в схожих гидрологических, метеорологических и океанографических условиях. Натурные измерения в этих плюмах проводились в периоды схожего уровня расхода воды ($100\text{--}150\text{ м}^3/\text{с}$) и схожего атмосферного воздействия (ветер $< 5\text{ м/с}$). Тем не менее, пространственные масштабы и аномалия солености плюма реки Кодор оказались существенно выше, чем у плюма реки Мзымты. Так, вдольбереговая протяженность плюма Кодора составляла $10\text{--}15\text{ км}$, в то время как простран-

ственные масштабы плюма Мзымты при аналогичных внешних условиях не превышали $3\text{--}5\text{ км}$ [5, 31, 37]. Поверхностная соленость в плюме Кодора изменялась от $0\text{--}1\text{ епс}$ на расстоянии 100 м до $8\text{--}10\text{ епс}$ на расстоянии 2 км от устьев дельтовых рукавов (рис. 4). Поверхностная соленость в плюме Мзымты при аналогичных условиях превышала 6 епс на расстоянии 100 м от речного устья и 14 епс на расстоянии 2 км от устья [5, 42].

Вертикальные масштабы плюмов Кодора и Мзымты также имеют значительные различия. Толщина плюма Кодора составляла $1.5\text{--}2.5\text{ м}$ на всей площади плюма (рис. 7а) за исключением узких (десятки метров) областей вдоль внешних границ плюма (рис. 7б). Измерения 3 апреля 2019 года показали, что толщина плюма резко увеличивается до $4\text{--}6\text{ м}$ на расстоянии $15\text{--}20\text{ м}$ от четкой границы плюма и окружающих вод моря (профили 6 и 7 на рис. 7б). При этом толщина плюма на расстоянии 100 м от границы плюма (профиль 5 на рис. 7б) составляла всего 2 м . Подобный эффект, по-видимому, вызван конвергенцией и даунвеллингом плюма на четкой фронтальной границе между плюмом и морем [25, 26, 30]. Толщина плюма Мзымты, по данным измерений различных лет, была в среднем почти в два

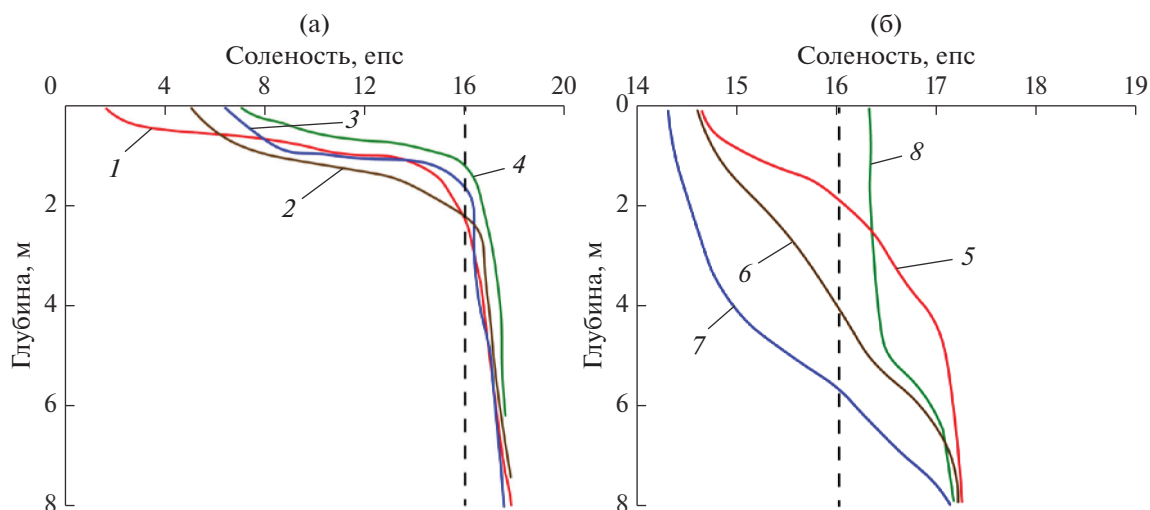


Рис. 7. Вертикальные профили солености в плюме Кодора, измеренные 31 августа 2018 года (а): на расстоянии в 200 м (1, красный), 300 м (2, коричневый), 500 м (3, синий) и 1100 м (4, зеленый) от устья дельтовой протоки; 3 апреля 2019 года (б): в плюме на расстоянии 100 м (5, красный), 15 м (6, коричневый) и 1 м (7, синий) от границы плюма и в окружающих водах моря на расстоянии 4 м от границы плюма (8, зеленый). Пунктирными линиями показано расположение условной границы плюма (изохалина 16 епс).

раза больше и уменьшалась от 4–5 м в приустьевой зоне до 2–3 м у границы плюма [5, 37].

Анализ спутниковых снимков Landsat 8 и Sentinel-2 за 2013–2019 годы подтвердил, что площадь плюма Кодора в среднем в несколько раз больше площади плюма Мзымты. На 184-х спутниковых снимках плюма Мзымты и 235-ти спутниковых снимках плюма Кодора, сделанных в различные дни, были определены границы этих плюмов, исходя из соответствия градиентов мутности и солености на внешних границах этих плюмов [31, 42]. На основе полученных данных были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые значения площадей плюмов Мзымты и Кодора (рис. 8). Годовой сток реки Кодор (4.2 км^3) примерно в 2.5 раза больше годового стока реки Мзымты (1.6 км^3) [3]. Тем не менее, по данным спутниковых снимков, среднегодовая площадь плюма Кодора (53.9 км^2) более чем в 4 раза превышает среднегодовую площадь плюма Мзымты (12.9 км^2). Средние значения площадей плюмов Кодора и Мзымты во время весеннего половодья (апрель – июнь), рассчитанные по доступным безоблачным спутниковым снимкам, составили 98.7 км^2 и 21.2 км^2 соответственно. Влияние краткосрочных осенних дождевых паводков также более ярко выражено у плюма Кодора, чем у плюма Мзымты. Средняя площадь плюма Кодора в сезон паводков (сентябрь – ноябрь) составляет 32.3 км^2 , а средняя площадь плюма Мзымты – всего 11.7 км^2 .

В рамках экспедиционных работ был изучен отклик поверхностной структуры плюма Кодора на краткосрочное паводковое событие, вызван-

ное сильным ливнем в ночь с 31 августа на 1 сентября 2018 года. Дождевой паводок на реке Кодор продолжался не более 6 часов, однако он оказал существенное влияние на речной плум, что было зафиксировано данными контактных измерений и аэрофотосъемкой. Паводок вызвал не только увеличение речного расхода, но и сопровождался резким увеличением концентрации терригенной взвеси в речном стоке. В результате этого мутность плюма Кодора сразу после паводка 1 сентября была существенно выше, чем накануне 31 августа (рис. 9). Пространственные размеры плюма также увеличились более чем в два раза по сравнению с состоянием до паводка (рис. 4), в то время как толщина и аномалия солености в придельтовой части плюма практически не изменились. Измерения, проведенные 2 сентября, показали, что через сутки после краткосрочного паводка мутность в плюме Кодора понизилась до допаводковых значений (рис. 9), но площадь плюма оставалась гораздо больше своего допаводкового состояния (рис. 4).

В отличие от большинства малых речных плюмов [44, 45, 53], в том числе плюмов малых рек российского участка побережья Черного моря, горизонтальное распределение солености в плюме Кодора крайне неоднородно и не имеет прямой связи с расстоянием до ближайшего источника пресноводного стока, т.е. устья ближайшей дельтовой протоки. Подобный эффект, по-видимому, является следствием сразу нескольких особенностей формирования и распространения плюма Кодора. Во-первых, как было сказано выше, во время кратковременных дождевых павод-

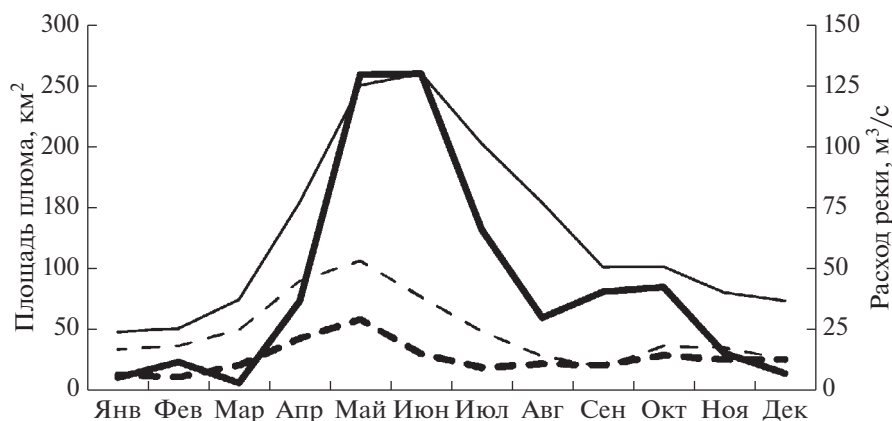


Рис. 8. Среднесуточные значения расходов (тонкие линии) и площадей (толстые линии) плумов рек Кодор (сплошные линии) и Мзымта (пунктирные линии). Площади плумов рассчитаны по доступным безоблачным спутниковым снимкам Landsat 8 и Sentinel-2 за 2013–2019 годы.



Рис. 9. Аэрофотоснимки придельтовой части плума Кодора, сделанные 31 августа (а), 1 сентября (б), 2 сентября (в) 2018 года.

ков площадь исследуемых плумов может изменяться в несколько раз менее чем за сутки. Из-за этого плум, сформировавшийся ранее и не успевший диссипировать в результате перемешивания с морскими водами, имеет существенно различные термохалинные и динамические характеристики с плумом, формируемым в момент измерений. Остаточный и новый плумы, таким образом, создают сложную систему внутренних фронтов и взаимодействуют как отдельные водные массы.

Во-вторых, плум дельтовой реки Кодор формируется несколькими разнесенными в пространстве источниками пресной воды. В результате этого прибрежная часть плума Кодора характеризуется существенной неоднородностью термохалинных характеристик, ярко выраженной как на полученных картах температуры и солёности (рис. 4), так и на спутниковых и аэрофотоснимках (рис. 10). Области плума Кодора, прилегающие к устьям дельтовых рукавов, имеют разные гидрофизическую структуру и динамику и взаимодействуют между собой как различные водные массы. На аэрофотоснимках видны чет-

кие фронтальные зоны между этими водными массами (рис. 4). Измерения, проведенные 2 сентября 2018 года, показали существенные отличия в солёности и температуре на расстоянии менее 5 метров к северу (14 и 27°C) и к югу (8–10 и 26°C) от подобной фронтальной зоны. Измерения течений зафиксировали существенно различные динамические характеристики в этих водных массах.

Третья причина горизонтальной неоднородности гидрофизической структуры плума Кодора заключается во взаимодействии поступающего материкового стока с особенностями донной топографии в прибрежной зоне. Так, в плуме Кодора наблюдалась область пониженной мутности, формировавшаяся за мелководной банкой, расположенной напротив одного из дельтовых рукавов (рис. 11). Особенно ярко этот эффект был выражен в день после дождевого паводка, сопровождавшегося увеличением мутности вод плума. Эта область также характеризовалась повышенными значениями солёности, которая на 3 епс превышала солёность прилегающей мутной области плума. Формирование этой области, по-видимому, вызвано динамическим эффектом обте-



Рис. 10. Аэрофотоснимки фронтальной зоны (показана красными стрелками) между водными массами плюма Кодора, сформированными соседними дельтовыми рукавами, сделанные 1 сентября 2018 года (а), 2 сентября 2018 года (б) и 3 апреля 2019 года (в).

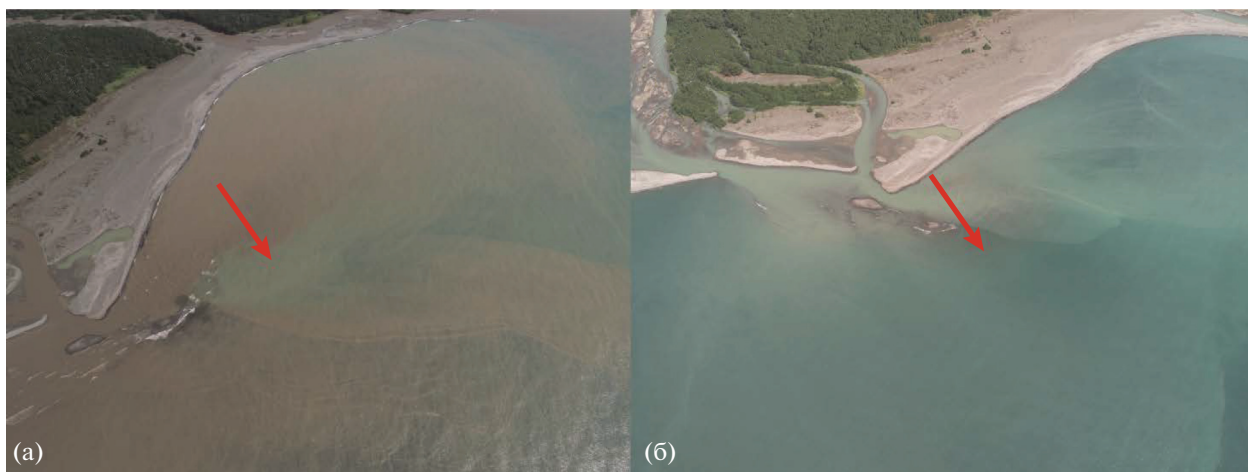


Рис. 11. Аэрофотоснимки области пониженной мутности и повышенной солености (показана красными стрелками), формировавшейся при обтекании плюмом Кодора мелководной банки, сделанные 1 сентября (а) и 2 сентября (б) 2018 года.

кания струей реки препятствия и малой глубиной моря за косой, замедляющей скорость речного плюма.

3.2. Циркуляция в плюме Кодора. В рамках экспедиционных работ были изучены некоторые особенности циркуляции плюма Кодора. Измерения вертикальных профилей течений в плюме Кодора с помощью ADCP-зонда показали, что скорость и направление течения в плюме, как правило, отличаются от скорости и направления течения в нижележащем слое моря. Так, 31 августа 2018 года на одной из станций в плюме (на глубине 1.5–2.5 м) наблюдалось течение в восточном направлении со скоростью 0.2 м/с, а в нижележащем слое моря (на глубине 3.5–4.5 м) — течение в южном направлении со скоростью 0.1 м/с. Наличие своей собственной динамики, отличной от динамики окружающих вод моря, характерно для речных плюмов [21], в том числе и для плюмов малых рек российского участка побережья Черного моря [6, 7, 40].

Во время экспедиционных работ 1 сентября 2018 года с помощью коптерной съемки в плюме Кодора был зафиксирован антициклонический вихрь на внешней границе плюма (рис. 12). Вихрь составлял в диаметре около 500 метров, он двигался в северном направлении со скоростью порядка 0.9 м/с и закручивался со скоростью порядка 0.4 м/с. Формирование вихря, по-видимому, было вызвано обтеканием вдольбереговым течением мыса Искурия, расположенного к северу от дельты Кодора. Вихрь существовал в течение около часа, после чего он слился с внешней границей плюма и прекратил свое существование. После диссипации вихря от внешней границы плюма Кодора на этом участке фронтальной зоны отделился пакет внутренних волн, зафиксированный аэрофотосъемкой (рис. 12в, 12г). Скорость распространения внутренних волн в направлении открытого моря составляла около 0.3 м/с, а расстояние между волнами — 2–4 м. В центральной части цуга длиной около 50 м было 12 волн, на его



Рис. 12. Аэрофотоснимки южной части плюма Кодора за 2.5 часа до (а) и во время (б) формирования вихря (показан красной стрелкой), аэрофотоснимки вихря (в) и отделившегося от его внешней границы пакета внутренних волн (г) (показан красными стрелками), сделанные 1 сентября 2018 года.

периферии длиной около 200 м — 3–4 волны. На расстоянии около 500 м от места своего формирования внутренние волны диссипировали, новые внутренние волны ни в этом месте, ни на других участках фронтальной зоны между плюмом и морем не образовывались. Таким образом, мы предполагаем, что источником формирования внутренних волн стала диссипация вихря в плюме и переход энергии вихря в энергию распространения внутренних волн.

4 апреля 2019 года в зоне впадения одного из дельтовых рукавов Кодора в море был проведен дрейфтерный эксперимент для изучения циркуляции в придельтовой части плюма. В реку Кодор на расстоянии 200 м от места впадения в море были запущены 10 дрейфтеров, которые были приурочены к приповерхностному слою. Дрейфтеры были запущены двумя сериями по 5 дрейфтеров, время между запуском дрейфтеров внутри одной серии составляло 2 с, время между двумя сериями составило 10 минут. Перемещение дрейфтеров в прибрежной зоне с момента их попадания в море

отслеживалось с помощью коптерной видеосъемки с высоты 250 метров над уровнем моря (рис. 13).

Восстановленные траектории и скорости движения дрейфтеров позволяют изучить структуру течений в приустьевой зоне плюма Кодора. При впадении реки в море формируется ламинарное течение [18, 19], вызывающее движение дрейфтеров по единой траектории в направлении исходного речного потока. При удалении от устья реки на 50–60 м ламинарное течение начинает замедляться и расширяться, что иллюстрируется расхождением траекторий дрейфтеров. Дальнейшее равномерное замедление этого течения приводит к его исчезновению на расстоянии 150 м от устья реки во время первого запуска и 200 м во время второго запуска. Скорости дрейфтеров во время обоих запусков были практически одинаковы и уменьшались от 2.4–2.6 м/с у устья дельтовой протоки до 0.6–0.8 м/с в зоне диссипации ламинарного течения. Таким образом, при слабом ветровом воздействии пространственный масштаб приустьевой части плюма, т.е. части, где сохраня-

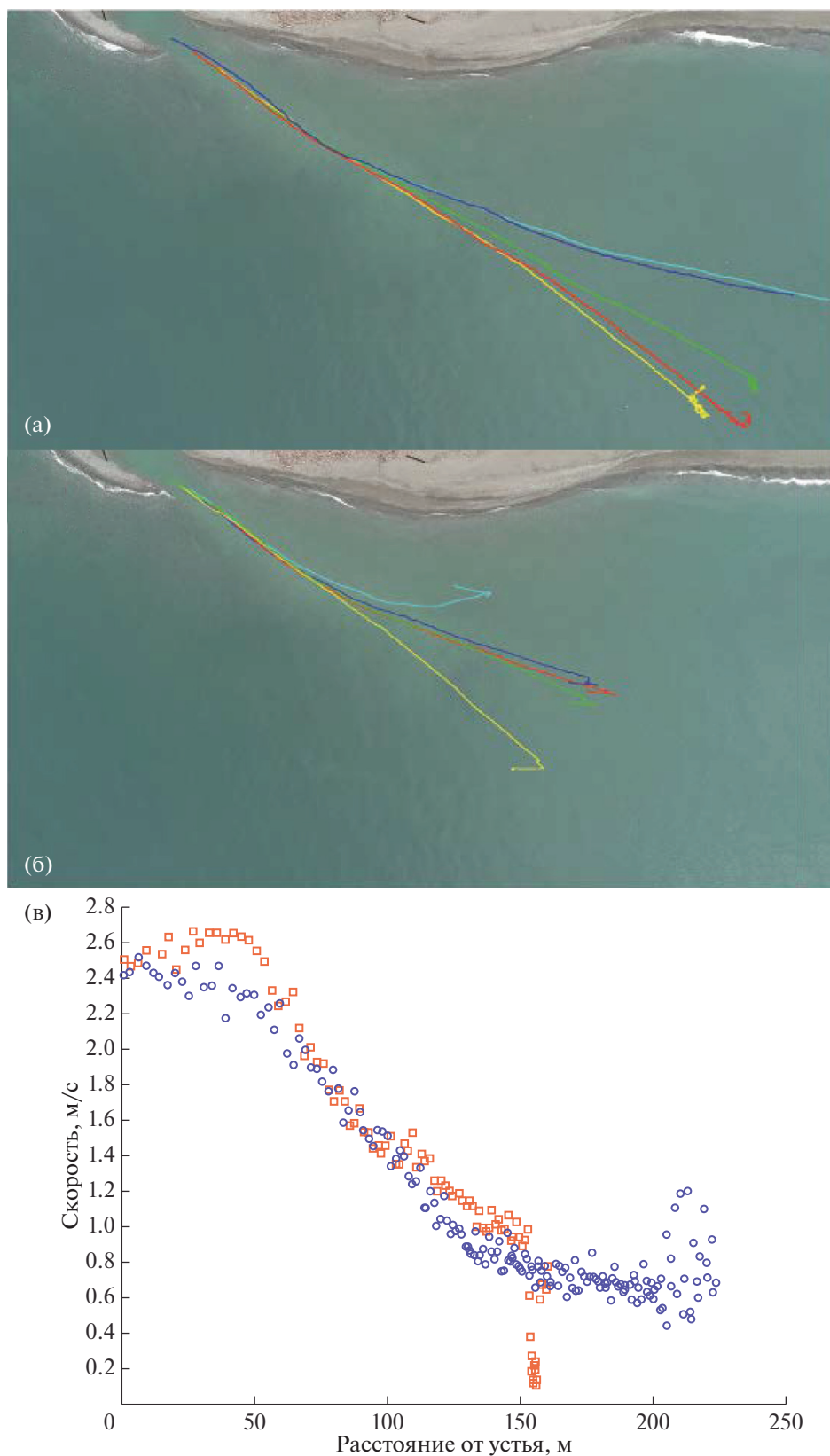


Рис. 13. Траектории дрейфтеров в придельтовой части плюма Кодор при первом (а) и втором (б) запусках 4 апреля 2019 года. Средняя скорость дрейфтеров во время первого (синие круги) и второго (красные квадраты) запусков (в).

ется инерция впадающей речной струи, составлял 150–200 м. После окончательной диссипации инерции речной струи дрейфтеры в течение 1–2 минут несколько раз резко и синхронно меняли направление движения под воздействием ветра. Скорости дрейфтеров вне ламинарной струи также имели большую изменчивость от 0.1 м/с до 0.8 м/с во время первого запуска и от 0.4 м/с до 1.2 м/с во время второго запуска.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения термохалинной структуры плюма Кодора показали, что он характеризуется аномально низкой поверхностной соленостью, по сравнению с другими малыми речными плюмами исследуемого региона. Толщина плюма, в свою очередь, не превышает 2.5 м даже в придельтовой зоне за исключением узких фронтальных зон между плюмом и морскими водами, где в результате конвергенции толщина плюма может достигать 5–6 м. Таким образом, плюм Кодора формирует относительно тонкий стратифицированный слой и в результате этого распространяется на большую площадь по сравнению с плюмом Мзымты при сходных внешних условиях. Этот эффект, по-видимому, вызван различиями в морфологии и гидрологических характеристиках рек Мзымты и Кодора. Река Мзымта имеет одно глубокое и широкое русло, в результате чего при впадении в море речной сток более интенсивно перемешивается с нижележащими морскими водами и формирует менее стратифицированный, более глубокий и, тем самым, меньший по площади плюм по сравнению с плюмом Кодора, формируемым стоками из нескольких относительно мелких дельтовых рукавов.

Натурные измерения и коптерная съемка показали большое число сложных и динамически активных фронтальных зон внутри плюма Кодора. Резкие суточные и межсуточные колебания речного расхода, характерные для малых горных рек, в число которых входит Кодор, приводят к большой изменчивости размеров плюма Кодора в отдельно взятые моменты времени. В частности, во время кратковременных дождевых паводков площадь исследуемого плюма может изменяться в несколько раз за период 1–2 дня, что было зафиксировано в период экспедиционных работ. Из-за этого сформированный ранее и не диссипировавший остаточный плюм имеет существенно различные термохалинные и динамические характеристики с новым плюмом, что приводит к формированию сложной системы внутренних фронтов. Таким образом, помимо изменчивости ветровых условий, колебания речного расхода очень существенно влияют на структуру и динамику плюма Кодора на внутрисуточном и межсуточном временных масштабах. Кроме того, в

плюме Кодора наблюдались четкие внутренние фронты, формировавшиеся в результате обтекания мелководных банок динамически активными участками плюмов. Еще одним важным фактором формирования внутренних фронтов в исследуемом плюме является наличие нескольких близкорасположенных и крупных дельтовых рукавов, служащих источниками пресноводного стока в море. В результате этого участки плюма, сформированные разными дельтовыми рукавами, также взаимодействуют между собой как различные водные массы.

Исследования циркуляции в плюме Кодора показали значительные отличия его динамики от динамики окружающих морских вод. С помощью коптерной аэрофотосъемки было зарегистрировано формирование и диссипация вихря в плюме и последующее формирование, распространение и диссипация внутренних волн от внешней границы этого вихря. С помощью дрейфтерного эксперимента в приустьевой зоне плюма было зафиксировано замедление впадающего в море быстрого речного потока (2.5 м/с) за счет его латерального расширения и в результате трения с нижележащими морскими водами. Было установлено, что инерционная часть плюма Кодора имеет относительно малые масштабы (150–200 м), в результате чего в приустьевой части плюма не формируется антициклоническая циркуляция (“bulge” в англоязычной литературе) [16, 20, 29, 51], характерная для плюмов крупных рек при слабом ветровом воздействии. После диссипации инерции впадающей речной струи траектории дрейфтеров демонстрируют очень быстрый отклик (менее минуты) скорости и направления течения в плюме на колебания ветрового воздействия, что также не характерно для плюмов больших рек [13, 15, 22, 50].

Река Кодор имеет высокую скорость течения (2.5 м/с), но сравнительно небольшую глубину дельтовых рукавов (около 1 м). Из-за этого впадающий в море речной поток имеет высокую скорость, но небольшие вертикальный масштаб и объем, что приводит к быстрой диссипации его инерции. В результате этого пространственный масштаб инерционной части плюма Кодора оказывается на порядок меньше, чем у рек со схожим объемом стока, но более низкой скоростью течения [44, 45, 54]. Пространственный масштаб инерционной части плюма Кодора также на порядок меньше, чем его предсказывают существующие параметризации масштаба инерционной части речного плюма по характеристикам впадающего речного потока на основе чисел Бюргера и Россби [20, 51]. Малые масштабы инерционной части плюма и отсутствие антициклонической циркуляции в приустьевой зоне существенным образом влияют на структуру и динамику речного плюма. В частности, сток реки Кодор быстро вы-

носится в область плюма, чья динамика определяется ветровым воздействием, что препятствует аккумуляции пресноводного стока в приустьевой зоне, описанной в ряде предыдущих работ [16, 20, 29].

5. ВЫВОДЫ

В рамках данной работы проведено исследование гидрофизической структуры и циркуляции плюма реки Кодор, одного из многочисленных малых речных плумов северо-восточного побережья Черного моря. Показана значительная неоднородность структуры малого речного плюма, вызванная как особенностями формирования плюма несколькими близкорасположенными источниками пресноводного стока, подверженными резким колебаниям расхода воды, так и взаимодействием плюма с региональной донной топографией (мелководными банками). Установлены значительные пространственные масштабы отклика циркуляции в плюме на изменчивость ветрового воздействия в масштабах минут и часов. Впервые натурными измерениями и аэрофото съемкой зафиксированы формирование и диссипация вихря внутри плюма, генерация внутренних волн на границе плюма, их последующее распространение и диссипация. Впервые получены численные характеристики скорости подобных внутренних волн. Изучена циркуляция в приустьевой зоне малого плюма, установлены малые пространственные масштабы инерционной зоны плюма. Показано отсутствие антициклонической циркуляции в приустьевой части плюма при слабом ветровом воздействии.

Результаты, полученные в рамках данной работы, важны для понимания общих аспектов структуры и динамики малых речных плумов, которые остаются во многом малоизученными. Подавляющее большинство предыдущих исследований, посвященных речным плумам, рассматривало плумы, сформированные большими реками, в то время как малым речным плумам уделялось гораздо меньше внимания. Это, по-видимому, вызвано сравнительно небольшим влиянием отдельных малых речных плумов на прибрежную зону моря по сравнению с большими плумами. Тем не менее, общая доля малых рек в глобальном пресноводном и твердом континентальном стоке оценивается в 25% и 40% соответственно [28]. Во многих прибрежных регионах мира суммарный вклад малых рек в общий материальный сток может быть сравним или превышать вклад больших рек [23, 46, 49].

Источники финансирования: Работа выполнена при поддержке Министерства Науки и Высшего Образования РФ, тема 0149-2019-0003 (сбор натурных данных) и проект 14.W03.31.0006 (обработка натурных данных), а также Российского

Научного Фонда, проект 18-17-00156 (исследование речных плумов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водные ресурсы Закавказья / Ред. Сванидзе Г.Г., Цомая В.Ш. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 264 с.
2. Джаошвили Ш. Речные наносы и пляжеобразование на Черноморском побережье Грузии. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1986. 155 с.
3. Джаошвили Ш. Реки Черного моря // Европейское агентство по охране окружающей среды. Технический отчет № 71. 2002. 58 с. Режим доступа: http://www.eea.europa.eu/ru/publications/technical_report_2002_71/at_download/file.
4. Завьялов П.О., Ижицкий А.С., Осадчиев А.А. и др. Структура термохалинных и био-оптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 514–525.
5. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В. и др. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
6. Короткина О.А., Завьялов П.О., Осадчиев А.А. Субмезомасштабная изменчивость полей течений и ветра в акватории г. Сочи // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 797–807.
7. Короткина О.А., Завьялов П.О., Осадчиев А.А. Синоптическая изменчивость течений в прибрежной акватории г. Сочи // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 581–593.
8. Мингазова Н.М., Дбар Р.С., Иванова В.М. и др. Состояние устьевых участков рек Республики Абхазия и их влияние на побережье Черного моря // Морской биологический журнал. 2016. Т. 1. № 4. С. 30–39.
9. Осадчиев А.А. Распространение плюма реки Амур в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 417–424.
10. Полухин А.А., Заговенкова А.Д., Хлебопашев П.В. и др. Гидрохимический состав стока рек Абхазии и особенности его трансформации в прибрежной зоне // Океанология. 2017 (в печати).
11. Экба Я.А., Дбар Р.С., Ахсалба А.К. Тенденции изменения климата Юго-Западного Кавказа в XX столетии // Труды международной конференции “Биосфера и человек”. 2003. С. 38–41.
12. Экба Я.А., Дбар Р.С., Ахсалба А.К. Региональные климатические изменения и экологические проблемы Абхазии // Устойчивое развитие горных территорий. 2015. Т. 7. № 4. С. 42–52.
13. Choi B.-J., Wilkin J.L. The effect of wind on the dispersal of the Hudson River plume // J. Phys. Oceanogr. 2007. V. 37. P. 1878–1897.
14. Denamiel C., Budgell W.P., Toumi R. The Congo River plume: Impact of the forcing on the far field and near field dynamics // J. Geophys. Res. Oceans. 2013. V. 118. P. 964–989.

15. Fong D.A., Geyer W.R. Response of a river plume during an upwelling favorable wind event // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2001. V. 106. P. 1067–1084.
16. Fong D.A., Geyer W.R. The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume // *J. Phys. Oceanogr.* 2002. V. 32. P. 957–972.
17. Geyer W.R., Beardsley R.C., Lentz S.J. et al. Physical oceanography of the Amazon shelf // *Cont. Shelf Res.* 1996. V. 16. P. 575–616.
18. Hetland R.D. Relating river plume structure to vertical mixing // *J. Phys. Oceanogr.* 2005. V. 5. P. 1667–1688.
19. Hetland R.D. The effects of mixing and spreading on density in near-field river plumes // *Dyn. Atmos. Oceans*. 2010. V. 49. P. 37–53.
20. Horner-Devine A.R., Fong D.A., Monismith S.G. et al. Laboratory experiments simulating a coastal river discharge // *J. Fluid Mech.* 2006. V. 555. P. 203–232.
21. Horner-Devine A.R., Hetland R.D., MacDonald D.G. Mixing and transport in coastal river plumes // *Annu. Revi. Fluid Mech.* 2015. V. 47. P. 569–594.
22. Jurisa J.T., Chant R. The coupled Hudson River estuarine-plume response to variable wind and river forcings // *Ocean Dyn.* 2012. V. 62. P. 771–784.
23. Kniskern T.A., Warrick J.A., Farnsworth K.L. et al. Coherence of river and ocean conditions along the US West Coast during storms // *Cont. Shelf Res.* 2011. V. 31. P. 789–805.
24. Korotenko K.A., Osadchiev A.A., Zavialov P.O. et al. Effects of bottom topography on dynamics of river discharges in tidal regions: case study of twin plumes in Taiwan Strait // *Ocean Sci.* 2014. V. 10. P. 865–879.
25. Lentz S.J., Elgar S., Guza R.T. Observations of the flow field near the nose of a buoyant coastal current // *J. Phys. Oceanogr.* 2003. V. 33. P. 933–943.
26. Luketina D.A., Imberger J. Characteristics of a surface buoyant jet // *J. Geophys. Res. Oceans*. 1987. V. 92. P. 5435–5447.
27. Marchevsky I.K., Osadchiev A.A., Popov A.Y. Numerical modelling of high-frequency internal waves generated by river discharge in coastal ocean // *Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2019)*. 2019. P. 384–387.
28. Milliman J.D., Farnsworth K.L., Albertin C.S. Flux and fate of fluvial sediments leaving large islands in the East Indies // *J. Sea Res.* 1999. V. 41. P. 97–107.
29. Nof D., Pichevin T. The ballooning of outflows // *J. Phys. Oceanogr.* 2001. V. 31. P. 3045–3058.
30. O'Donnell J., Marmorino G.O., Trump C.L. Convergence and downwelling at a river plume front // *J. Phys. Oceanogr.* 1998. V. 28. P. 1481–1495.
31. Osadchiev A.A. A method for quantifying freshwater discharge rates from satellite observations and Lagrangian numerical modeling of river plumes // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10. 085009.
32. Osadchiev A.A. Estimation of river discharge based on remote sensing of a river plume // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9638. 96380H.
33. Osadchiev A.A. Small mountainous rivers generate high-frequency internal waves in coastal ocean // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. 16609.
34. Osadchiev A.A., Asadulin En.E., Miroshnikov A.Yu. et al. Bottom sediments reveal inter-annual variability of interaction between the Ob and Yenisei plumes in the Kara Sea // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. 18642.
35. Osadchiev A.A., Izhitskiy A.S., Zavialov P.O. et al. Structure of the buoyant plume formed by Ob and Yenisei river discharge in the southern part of the Kara Sea during summer and autumn // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. V. 122. P. 5916–5935.
36. Osadchiev A.A., Korotenko K.A., Zavialov P.O. et al. Transport and bottom accumulation of fine river sediments under typhoon conditions and associated submarine landslides: case study of the Peinan River, Taiwan // *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.* 2016. V. 16. P. 41–54.
37. Osadchiev A.A., Korshenko E.A. Small river plumes off the north-eastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions // *Ocean Sci.* 2017. V. 13. P. 465–482.
38. Osadchiev A.A., Medvedev I.P., Shchuka S.A. et al. Influence of estuarine tidal mixing on structure and spatial scales of large river plumes // *Ocean Sci.* 2020. V. 16. P. 1–18.
39. Osadchiev A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A. et al. Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East-Siberian seas // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. 13041.
40. Osadchiev A.A., Sedakov R.O. Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat 8 and Sentinel-2 // *Rem. Sens. Environ.* 2019. V. 221. P. 522–533.
41. Osadchiev A.A., Silvestrova K.P., Myslenkov S.A. Wind-driven coastal upwelling near large river deltas in the Laptev and East-Siberian seas // *Rem. Sens.* 2020. V. 12. 844.
42. Osadchiev A.A., Zavialov P.O. Lagrangian model of a surface-advected river plume // *Cont. Shelf Res.* 2013. V. 58. P. 96–106.
43. Osadchiev A.A., Zavialov P.O. Structure and dynamics of plumes generated by small rivers / Ed. Pan J., *Estuaries and Coastal Zones - Dynamics and Response to Environmental Changes*. London: IntechOpen, 2020. Chapter 5. P. 125–144.
44. Ostrander C.E., McManus M.A., DeCarlo E.H. et al. Temporal and spatial variability of freshwater plumes in a semi-enclosed estuarine-bay system // *Estuar. Coasts*. 2008. V. 31. P. 192–203.
45. Romero L., Siegel D.A., McWilliams J.C. et al. Characterizing storm water dispersion and dilution from small coastal streams // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2016. V. 121. P. 3926–3943.
46. Saldias G.S., Largier J.L., Mendes R. et al. Satellite-measured interannual variability of turbid river plumes off central-southern Chile: Spatial patterns and the influence of climate variability // *Progr. Oceanogr.* 2016. V. 146. P. 212–222.
47. Schiller R.V., Kourafalou V.H., Hogan P. et al. The dynamics of the Mississippi River plume: Impact of topography, wind and offshore forcing on the fate of plume waters // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2011. V. 116. C06029.
48. Simpson J.H. Physical processes in the ROFI regime // *J. Mar. Sys.* 1997. V. 12. P. 3–15.

49. Wheatcroft R.A., Goni M.A., Hatten J.A. et al. The role of effective discharge in the ocean delivery of particulate organic carbon by small, mountainous river systems // *Limnol. Oceanogr.* 2010. V. 55. P. 161–171.
50. Whitney M.M., Garvine R.W. Wind influence on a coastal buoyant outflow // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. C03014.
51. Yankovsky A.E., Chapman D.C. A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V. 27. № 7. P. 1386–1401.
52. Zavialov I.B., Osadchiev A.A., Sedakov R.O. et al. Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea through the Kerch Strait // *Ocean Sci.* 2020. V. 16. P. 15–30.
53. Zavialov P.O., Pelevin V.V., Belyaev N.A. et al. High resolution LiDAR measurements reveal fine internal structure and variability of sediment-carrying coastal plume // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2018. V. 205. P. 40–45.
54. Zhao J., Gong W., Shen J. The effect of wind on the dispersal of a tropical small river plume // *Front. Earth Sci.* 2018. V. 12. P. 170–190.

Hydrophysical Structure and Current Dynamics of the Kodor River Plume

A. A. Osadchiev^{a, #}, A. A. Barymova^b, R. O. Sedakov^{a, c}, A. V. Rybin^c, A. G. Tanurkov^c, A. A. Krylov^{a, c}, V. V. Kremenetskiy^a, S. A. Mosharov^{a, d}, A. A. Polukhin^a, A. S. Ulyantsev^a, M. A. Osadchiev^a, R. S. Dbar^e

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Marine Research Center at Moscow State University, Moscow, Russia*

^c*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

^d*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

^e*Institute of Ecology, Academy of Sciences of Abkhazia, Sukhum, Abkhazia*

[#]*e-mail: osadchiev@ocean.ru*

This work is focused on the river plume generated by the Kodor River which is the largest river of Abkhazia and the north-eastern coast of the Black Sea. Based on in situ hydrological data, quadcopter aerial images and satellite observations, hydrophysical structure and circulation in the Kodor plume was studied at different river discharge conditions. Discharge of the Kodor River, which inflows to sea from several deltaic branches forms a relatively shallow plume with large area, as compared to the Mzymta River, the largest estuarine river of the study region, at similar hydrological, meteorological, and oceanographic conditions. Due to its small vertical size and large salinity gradient at the border with the subjacent saline sea, the Kodor plume is characterized by quick response on wind forcing variability. The Kodor plume also has large spatial inhomogeneity, caused by its formation conditions (several closely located freshwater sources prone to abrupt discharge variability), as well as regional bathymetry (interaction between the plume and shoals). During low discharge period, the inflowing Kodor River has relatively low kinetic energy, which causes abrupt deceleration of the jet in the sea area adjacent to the river mouth. As a result, the inertia of the inflowing jet abruptly decreases and large velocity and salinity gradients are formed in vicinity of river estuary, which hinder formation of anticyclonic circulation at the near-field part of the plume. This feature induces transport of freshwater discharge off the river mouth and its accumulation in the far-field part of the small plume under moderate wind forcing conditions that is not typical for large river plumes. The obtained results are important for understanding general aspects of dynamics of buoyant plumes formed by rivers with small discharge rates.

Keywords: river plume, coastal circulation, continental discharge, wind forcing, Black Sea, Kodor River