

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНИ-ДРИФТЕРОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПОДСПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ  
ПРИБРЕЖНЫХ ТЕЧЕНИЙ

© 2019 г. О. Ю. Лаврова<sup>1,\*</sup>, Д. М. Соловьев<sup>2</sup>, А. Я. Строчков<sup>1</sup>, К. Р. Назирова<sup>1</sup>,  
Е. В. Краюшкин<sup>1</sup>, Е. В. Жук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 04.07.2019 г.

Представлены результаты натурных измерений параметров прибрежных течений с помощью лагранжевых мини-дрифтеров. Дрифтерные эксперименты проводились синхронно со спутниковой съемкой с помощью MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8 и OLCI Sentinel-3. Показано, что использование недорогого и простейшего в изготовлении прибора, каким является мини-дрифтер, позволяет получать оперативную информацию о параметрах прибрежных течений. В экспериментах апреля–мая 2019 г. в северо-восточной части Черного моря удалось оценить скорости прибрежных течений и определить минимальное расстояние, на которое Основное черноморское течение подошло к берегу. Траектории мини-дрифтеров позволили пронаблюдать проявления инерционных колебаний, пространственные характеристики которых практически невозможно измерить другим способом. Оценено влияние вихревых структур, проявляющихся на спутниковых изображениях видимого диапазона, на распространение мини-дрифтеров.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование морской поверхности, лагранжевые дрифтеры, прибрежные течения, инерционные колебания, Черное море

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019536-49>

ВВЕДЕНИЕ

Исследование гидродинамических процессов в поверхностном слое моря представляет собой одну из актуальных проблем океанологии. Сложность изучения определяется высокой изменчивостью водной среды во времени и пространстве, и неоднородностью ее динамики по глубине. Для изучения гидродинамических процессов используют разные подходы: измерения *in situ*, математическое численное моделирование (Журбас и др., 2017; Thomas et al., 2008; Zhurbas et al., 2003; 2004), и дистанционное зондирование из космоса (Лаврова и др., 2011 и ссылки в данной монографии; Kostianou et al., 2018). Каждый метод имеет свои преимущества и ограничения. В отличие от натурных измерений численное моделирование и дистанционное зондирование позволяют получать косвенные оценки изучаемых параметров, поэтому всегда остается задача верификации результатов численного моделирования и дистанционного спутникового зондирования прямыми измерениями *in situ*.

Исследование гидродинамических процессов включает в себя задачу определения параметров течений в поверхностном слое моря. В ходе

экспедиционных работ, как правило, измерения параметров течений проводятся при помощи акустического доплеровского профилографа течений (ADCP), заякоренного в одной точке или буксируемого по ходу движения судна, а также с помощью электромагнитного измерителя течений, гидродинамической вертушки и других приборов, помещаемых в поток в определенной точке. Другим подходом к исследованию параметров поверхностных течений является метод Лагранжа: в поле потока помещается пассивный объект, перемещающийся вместе с потоком. Картирование последовательности его местоположений позволяет проследить линии тока поверхностных течений. В качестве такого пассивного объекта применяются лагранжевые дрифтеры, которые представляют собой дрейфующие буи, перемещающиеся в морских акваториях под воздействием течений. Их перемещение примерно совпадает с движением водных масс и может выступать в качестве маркера динамики морских вод.

Неоспоримым преимуществом использования лагранжевых дрифтеров перед другими типами приборов, и в частности ADCP, является тот факт, что подводный парус дрифтера можно

размещать на разных глубинах для оценки влияния различных слоев морской толщи на перемещение дрейфтера. ADCP не позволяет измерять параметры потока в самом верхнем слое из-за наличия мертвой зоны переотражения сигнала от морской поверхности. Вторым преимуществом использования лагранжевых дрейфтеров для задачи исследования поверхностных течений является их способность находиться в поле потока длительное время, повторяя в своем движении все особенности гидродинамического поля в пространстве и времени. Немаловажным преимуществом использования лагранжевых дрейфтеров в ходе экспедиционных работ является их невысокая стоимость и простота в эксплуатации в морских экспедиционных условиях.

Использование лагранжевых дрейфтеров для задачи описания параметров поверхностных течений применяется с давних пор: уже в XVIII веке подобная технология была применена при создании первой карты течений Гольфстрима (Sverdrup et al., 1942). Конструкция и технологические решения, применяемые в лагранжевых дрейфтерах, совершенствовались в течение длительного времени. Одно из первых описаний конструкции лагранжевого дрейфтера было дано в работах (Niiler et al., 1987; Sybrandy and Niiler, 1991). С дальнейшим развитием технологий, применением GPS (Global Positioning System) и спутниковой телеметрии для океанологических исследований (Мотыжев и др., 2011; Tolstosheev, 2010; Novelli et al., 2017) лагранжевые дрейфтеры начинают использовать для решения широкого спектра океанографических задач. Например, в работе (Poje et al., 2014) рассмотрены результаты экспериментов, в которых было запущено одновременно более 300 дрейфтеров для измерения коэффициентов горизонтального обмена в Мексиканском заливе. В работах (Журбас и др., 2004; Poulain et al., 2005) эксперимент по запуску лагранжевых дрейфтеров позволил выявить и описать особенности Основного черноморского течения. Однако, дрейфтерные эксперименты применяются и для более локальных задач, например, в работе (Ohlman et al., 2017) показаны результаты использования лагранжевых дрейфтеров для исследования инерционных колебаний в прибрежной зоне моря.

В настоящей работе представлен собственный опыт авторов по применению лагранжевых дрейфтеров в исследованиях гидродинамических процессов в поверхностном слое прибрежных вод и верификации данных спутникового зондирования Земли из космоса.

Наши эксперименты с мини-дрейфтерами мы проводим, начиная с 2015 г. в следующих районах:

- в юго-восточной части Балтийского моря в районе Самбийского полуострова (2015–2018 гг.) (Голенко, и др., 2017; Kravushkin et al., 2019)
- в юго-восточной части Азовского моря в районе г. Темрюк, в приустьевой зоне р. Кубань (2018 г.)
- в северо-восточной части Черного моря (2015, 2019 гг.) (Сильвестрова и др., 2016, Kravushkin et al., 2019).

### КОНСТРУКЦИЯ МИНИ-ДРИФТЕРОВ

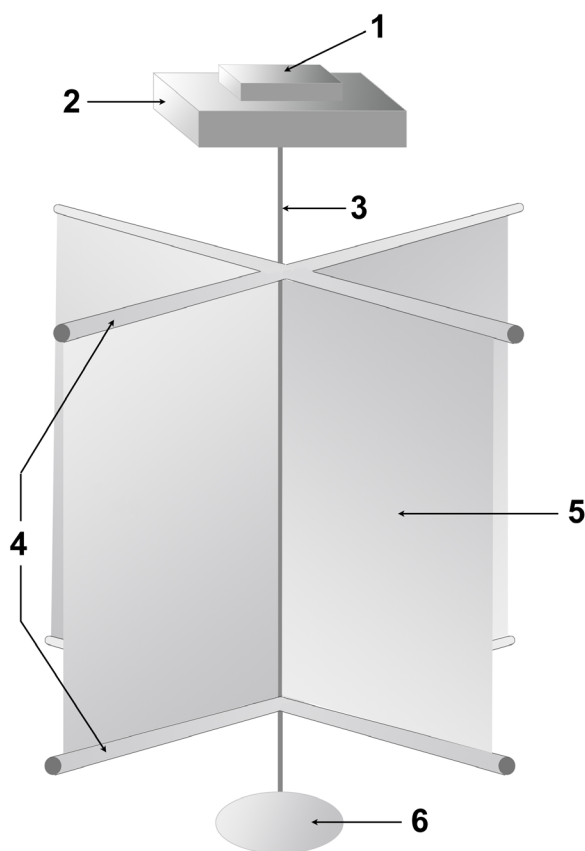
Важнейшим требованием при использовании дрейфтера является оперативная передача исследователям собранных данных. Для оперативной передачи координат дрейфтера, работающего в океане или в открытом море, используются спутниковые каналы связи. Поэтому стоимость эксперимента с дрейфтером включает стоимость аппаратуры и стоимость спутниковой связи.

В настоящей работе рассмотрен частный случай океанологических экспериментов — в прибрежных водах морей, где действует существенно более дешевая сотовая мобильная связь. Разумеется, дальность этой связи от береговой линии ограничена, но, как будет показано далее, достаточна для изучения динамики прибрежных вод.

Дрейфтеры, использующие для передачи данных мобильную связь, существенно дешевле как по стоимости самой аппаратуры, так и стоимости пересылки данных. Учитывая их минимальную стоимость и ограниченность области применения, будем называть их далее мини-дрейфтерами.

Простейшая схема мини-дрейфтера соответствует конструкции, описанной в стандарте барометрического дрейфтера ([http://www.jcommops.org/doc/DBCP/svpb\\_design\\_manual.pdf](http://www.jcommops.org/doc/DBCP/svpb_design_manual.pdf)). Основным рабочим инструментом является GPS/GSM-трекер, определяющий текущие координаты мини-дрейфтера, и в заданные моменты времени передающий их через мобильную сеть (GSM, 3G или 4G) на приемное устройство — в нашем случае, обычный мобильный телефон, в виде коротких сообщений (SMS).

Трекер вместе с внешними элементами питания помещен в водонепроницаемый пластиковый бокс, не препятствующий прохождению электромагнитного излучения проходящих



**Рис. 1.** Принципиальная схема конструкции мини-дрифтера. 1 — водонепроницаемый бокс с трекером; 2 — поплавок; 3 — трос; 4 — каркас паруса; 5 — парус; 6 — груз.

и отправляемых сигналов (1200–1500 МГц GPS, 800–1000 МГц GSM/3G). Бокс с трекером закреплен на поплавке, от которого на глубину, где требуется определить движение воды, опущен трос с парусом и грузом на конце (рис. 1).

Парус существенно упрощен по сравнению с рекомендованным в вышеуказанном стандарте: если стандарт определяет цилиндрический парус с четырьмя попарно противоположными отверстиями, то в данной работе применялся парус из двух перпендикулярных полотнищ, натянутых на трубчатый каркас, подвешенный на тросе.

В качестве приемо-передающего устройства в мини-дрифтерах был использован автомобильный трекер Coban ТК 103–2, который изначально спроектирован для отслеживания местонахождения автомобильного транспорта, но функционально пригоден и для плавающих объектов. Он представляет собой программируемое устройство с двумя функциями: а) определение координат своего местонахождения с помощью GPS-приемника, и б) передача этих

координат в заданные моменты времени по мобильной сотовой связи на любое устройство, подключенное к сотовой связи — мобильный телефон, смартфон, планшет или компьютер.

Программирование трекера осуществляется отправкой последовательности SMS с командами, задающими настройки режима работы трекера.

Трекер имеет встроенный аккумулятор небольшой емкости, позволяющий ему работать 4–5 часов без дополнительного питания, но это только защита от кратковременного отключения внешнего питания. Основное питание должно поступать от бортовой сети автомобиля. В мини-дрифтере питание подается от нескольких элементов 373 (тип D).

Трекер может быть дополнительно укомплектован картой памяти типа SD HC, на которой будут записаны координаты, отправляемые по заданному расписанию. Если мини-дрифтер выйдет из зоны сотовой связи, SMS с координатами не могут быть отправлены, но сохранятся на карте памяти и будут, пусть и с запозданием, доставлены, если мини-дрифтер вновь вернется в зону доступного сигнала.

Подробный обзор конструкции и возможностей трекера Coban ТК 103–2 можно найти на сайте «Спутниковый мониторинг транспорта ГЛОНАСС/GPS» (<http://gpsrf.ru/ReviewTK103.aspx>).

Мини-дрифтер невозможно запустить непосредственно с берега, он сможет свободно перемещаться только над глубиной, большей длины троса с парусом. Поэтому в ходе экспедиции было арендовано маломерное судно, с борта которого запускались мини-дрифтеры (рис. 2).

Судьба мини-дрифтеров после запуска завершается по-разному. Некоторые безвестно пропадают, либо надолго выйдя за пределы зоны сотовой связи, либо после исчерпания внешнего питания. Некоторые при штормах выбрасываются на берег с сильными повреждениями, или застревают на мелководье. Учитывая невысокую стоимость мини-дрифтера, его потеря входит в ожидаемые расходы экспедиционных работ.

## ОСОБЕННОСТИ МИНИ-ДРИФТЕРОВ

Как и дорогие океанские дрифтеры, мини-дрифтер должен удовлетворять определенным требованиям для того, чтобы быть пригодным для исследования динамики морских вод. Во-первых, должно быть минимизировано

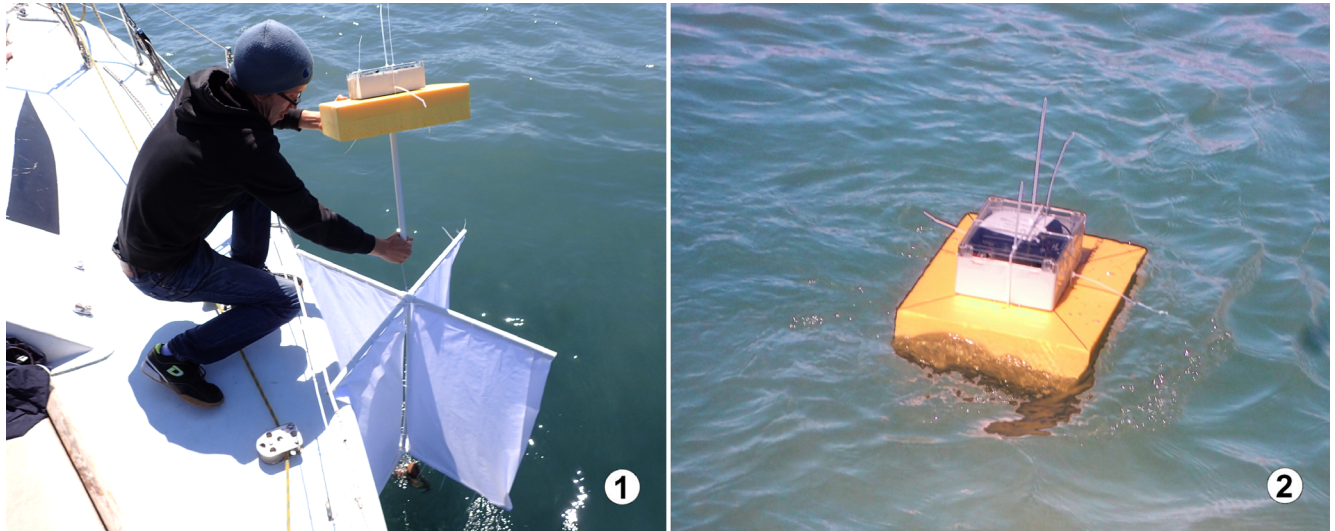


Рис. 2. Запуск мини-дрифтера: 1 — спуск на воду; 2 — дрифтер на воде.

влияние приповерхностного ветра, который часто не совпадает с направлением течения. Поэтому надводная часть должна выступать как можно меньше, но одного этого недостаточно. Чтобы давление водного потока значительно превышало давление ветра, используется подводный парус большой площади. Благодаря подводному парусу сила воды, движущая мини-дрифтер, многократно превышает силу ветра, и позволяет пренебречь его воздействием.

Во-вторых, необходимо предотвратить опрокидывание и кувыркание мини-дрифтера из-за поверхностного волнения. При перевороте приемное и передающее устройства потеряют сигнал, затухающий в воде. Устройство должно поддерживать свое положение относительно водной поверхности. Для этого ниже уровня воды закрепляется груз, жестко связанный с плавающей частью. Этот груз по принципу «ваньки-встаньки» будет возвращать мини-дрифтер в правильное положение после отклонения от него.

И в-третьих, дрифтер должен обеспечивать возможность отслеживать движение водных масс не только в самом поверхностном слое, но и на определенной глубине. Вполне вероятно, что в нижележащих слоях и направление, и скорость течений не будут такими же, как на поверхности. Для этого необходимо иметь возможность установить подводный парус на интересующей глубине.

Рассмотрим теперь, какие ограничения на район исследования накладывает использование сотовой связи. На огромной протяженности береговой линии в малонаселенных районах

полярных областей мобильная связь имеется только в редких локациях, представляющих интерес для ресурсодобывающей промышленности. Зато побережье Черного, Балтийского и Азовского морей, где развита курортная, промышленная и портовая деятельность, обслуживается сразу несколькими операторами сотовой связи, наиболее известными являются МТС, Билайн, Мегафон и Теле2. Зона покрытия сотовой связью около моря захватывает также и ближайшие прибрежные воды. Перечисленные сотовые операторы на своих сайтах для сведения абонентов предоставляют карты зон покрытия своих сетей. На рис. 3 приведен фрагмент карты покрытия мобильной связью МТС территории прибрежных вод Российской части кавказского побережья Черного моря, где в 2019 г. проводились экспедиционные работы с использованием мини-дрифтеров (рис. 3). Лиловым цветом на карте выделена зона, где доступна сотовая связь самого старого стандарта 2G. Она обеспечивает наибольшую дальность от базовых станций сотовой связи — до 25 км. Для стандарта 3G дальность заметно меньше, — до 15 км, и еще меньше для стандарта 4G — около 10 км. Такое различие дальности действия связи объясняется принципиально различным подходом к технической реализации каждого стандарта и соответствующим ослаблением сигнала.

Похожие результаты получаются и при рассмотрении карты покрытия операторов Теле2, Билайн и Мегафон. Как показал наш опыт работы с оператором Мегафон, в условиях прямой видимости, которые как раз имеются на море, устойчивая связь существует до 30 км.

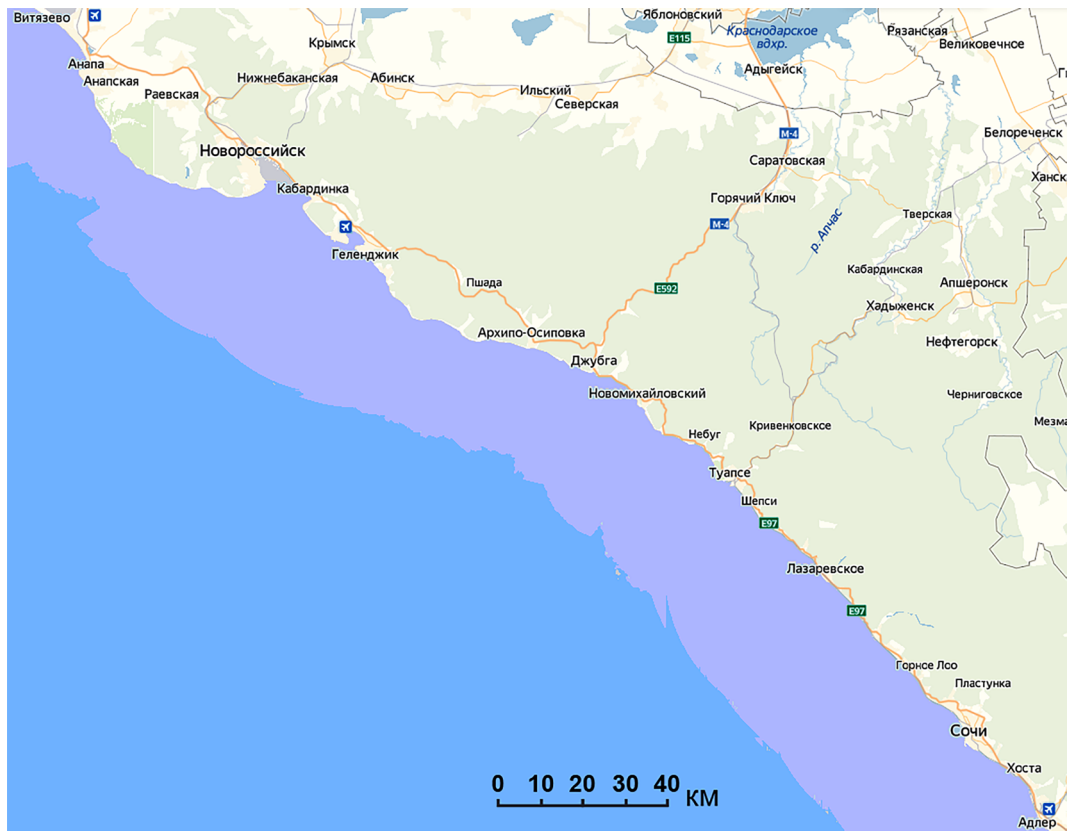


Рис. 3. Карта покрытия мобильной связью территории прибрежных вод Российской части кавказского побережья Черного моря (по данным оператора мобильной связи МТС). Зона действия мобильной связи выделена лиловым цветом.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНИ-ДРИФТЕРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОДСПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В АПРЕЛЕ–МАЕ 2019 г.

Использование данных спутникового дистанционного зондирования для изучения гидрофизических процессов в море требует проведения регулярных подспутниковых натурных измерений для верификации получаемых результатов. В первую очередь это касается определения параметров течений, которые по спутниковым данным могут быть получены только косвенно, например, по серии последовательных спутниковых изображений (Лаврова и др., 2019). При проведении подспутниковых измерений параметров течений обычно используется акустический доплеровский профилограф течений (ADCP). Однако использование ADCP для решения этой задачи имеет некоторые существенные ограничения: направление течения не определяется, если его скорость составляет менее 5 см/с; существует «слепая зона» для верхнего слоя воды, в которой измерения не проводятся (Krayushkin et al., 2019). Кроме того, возможности измерений с помощью ADCP ограничены также

максимальной глубиной дна и выбором линии разреза (пройденным путем буксирующего судна). Удачно ли выбрана линия разреза, выясняется только после окончания измерений. Если имеется недавно полученное спутниковое изображение, оно дает информацию для выбора наилучшей линии разреза.

Использование мини-дрифтеров, при всей их простоте, позволяет получить дополнительную полезную информацию, которая не может быть получена другим способом.

Ниже представлены результаты дрифтерных экспериментов, проведенных в северо-восточной части Черного моря в апреле–мае 2019 г.

В период с 23 апреля по 03 мая 2019 г. нами были проведены натурные измерения параметров плюма р. Мзымта (район Большой Сочи, Черное море) синхронно со спутниковой съемкой. Одна из задач, стоящих перед нами, состояла в определении скорости и направления прибрежного течения, которое играет важную роль в распространении речных вод в море. Поскольку, как показал опыт наших предыдущих исследований в этом районе (Назирова и др., 2019), линза распресненных вод распространяется не глубже 2 м, использование

**Таблица 1.** Информация об использованных мини-дрифтерах

№ дрифтера	Дата, время (GMT)	Координаты запуска	Дата, время (GMT) последней информации	Последние известные координаты	Комментарии
1	24.04.19 09:38	43.42° с.ш. 39.92° в.д.	24.04.19 13:01	43.43° с.ш. 39.91° в.д.	Найден на берегу в районе ж/д вокзала г. Адлер
2	25.04.19 11:08	43.41° с.ш. 39.89° в.д.	07.05.19 06:36	44.52° с.ш. 37.33° в.д.	Найден на юго-восточном берегу Крыма (45.06° с.ш.; 36.19° в.д.)
3	28.04.19 09:17	43.41° с.ш. 39.90° в.д.	02.05.19 13:37	43.73° с.ш. 39.46° в.д.	Потеряна связь на траверзе р. Шахе
4	01.05.19 11:01	43.41° с.ш. 39.89° в.д.	07.05.19 05:00	43.97° с.ш. 38.57° в.д.	Потеряна связь на траверзе Туапсе

**Таблица 2.** Наличие спутниковой информации на период проведения экспедиционных работ

Дата	Время (GMT)	Прибор	Спутник	Разрешение, м	Продукты
23.04.19	08:17	MSI	Sentinel-2B	10	RGB, TSM
24.04.19	07:59	ETM+	Landsat-7	30	RGB
25.04.19	08:01	OLI/TIRS	Landsat-8	30/60	RGB, SST, TSM, CHL
	07:56	OLCI	Sentinel-3B	250	TSM
26.04.19	07:30	OLCI	Sentinel-3B	250	TSM
	08:27	MSI	Sentinel-2B	10	RGB, TSM
	10:12	VIIRS	NPP	1000	SST, WLR, CHL
28.04.19	08:17	MSI	Sentinel-2A	10	RGB (облачность)
30.04.19	07:26	OLCI	Sentinel-3B	250	TSM
01.05.19	08:27	MSI	Sentinel-2A	10	RGB (облачность)
02.05.19	08:07	OLI/TIRS	Landsat-8	30	RGB (облачность)
04.05.19	08:02	OLCI	Sentinel-3A	250	TSM
	08:27	MSI	Sentinel-2A	10	RGB, TSM
10.05.19	08:07	OLCI	Sentinel-3B	250	TSM
14.05.19	08:02	OLCI	Sentinel-3A	250	TSM

ADCP для определения параметров течения, у которого верхняя ячейка измерений находится на глубине 2 м, нецелесообразно. Для определения скорости и направления течения были запущены 4 мини-дрифтера. Информация о районе, времени запуска и продолжительности их работы представлена в табл. 1.

Первые два дрифтера были найдены на берегу, и об их находке нам было сообщено по телефону, указанному в записке, находящейся под прозрачной крышкой водонепроницаемого бокса. О судьбе третьего и четвертого дрифтера ничего не известно. В четвертом и пятом столбцах табл. 1 представлена информация о местонахождении и дате/времени в последней записи на SD-карте или в последнем SMS.

За время проведения экспедиционных работ были получены спутниковые данные, список которых приведен в табл. 2. Помимо указанных в таблице спутниковых данных, скачивались и обрабатывались данные MODIS Terra/Aqua. Как видно из таблицы, большой объем спутниковой информации позволял оценивать ситуацию на протяжении всего периода проведения экспериментальных работ.

Приведенные в таблице сокращения названий продуктов соответствуют: RGB — цветосинтезированные изображения в естественных цветах; SST (Sea Surface Temperature) — температура морской поверхности; TSM (Total Suspended Matter) — общее содержание взвешенного вещества; WLR (Water Leaving Radiance) — исходящее из воды излучение

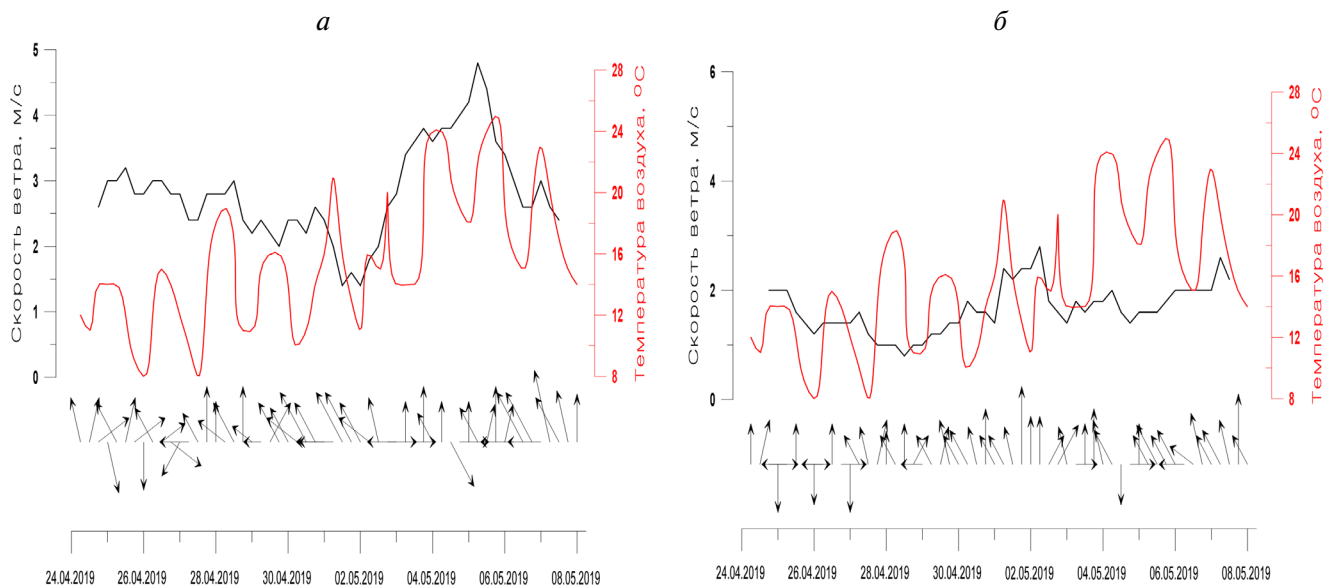


Рис. 4. Данные метеостанций на период дрейферных экспериментов: а — Сочи; б — Туапсе.

(551 нм); CHL (Chlor\_a concentration) — концентрация хлорофилла-а.

Карты SST, TSM, WLR и CHL зачастую лучше отражают проявления гидродинамических процессов, например, вихрей, чем True Color RGB изображения. При анализе траекторий дрейферов информация о гидродинамических процессах бывает очень полезна. С другой стороны, сама траектория, ее особенности или отсутствие особенностей, может предоставить информацию о трехмерной структуре гидродинамических процессов, проявляющихся на спутниковых изображениях.

Запуск дрейферов осуществлялся примерно в одном и том же районе и примерно в одно и то же время. На первом и втором дрейферах центр паруса располагался на глубине 1 м, на третьем и четвертом — на 4 м. Как показали анализ спутниковой информации, полученной во время экспедиционных работ, и наши визуальные наблюдения с борта маломерного судна, плум р. Мзымта распространялся достаточно узкой полосой вдоль береговой черты на северо-запад. Во время проведения нами подобных измерений в апреле 2018 г. распространение плума р. Мзымта не имело такой постоянной направленности (Назирова и др., 2019). Такое устойчивое направление распространения плума на северо-запад может быть объяснено усилением Основного черноморского течения (ОЧТ), которое было прижато к берегу в этом районе. Это подтверждается и дрейферными экспериментами.

Рассмотрим подробно траектории движения каждого из четырех дрейферов совместно с гидрометеорологическими данными (рис. 4) и информацией, полученной со спутников.

**Первый дрейфер** был запущен 24.04.19 в 09:38 GMT в 490 м от берега в плюме р. Мзымта, в тот же день его выбросило на берег через 13 часов после запуска (рис. 5). Отметим, что трек первого дрейфера наложен на фрагмент цветосинтезированного изображения OLI Landsat-8 от 25.04.19 специально для сравнения с начальным треком второго буйа. Как показали наши измерения и данные спутникового зондирования, трек первого дрейфера не выходил за границу плума. Максимальная скорость перемещения дрейфера составила 17.7 см/с. Ветер за период дрейфа первого буйа был слабым, 2–3 м/с и менялся с южного на юго-западный с переходом на северо-западный. Дрейф буйа имел направление северо-северо-западное. Это подтверждает тот факт, который мы ранее подчеркивали (Krayushkin et al., 2019), что лагранжевые дрейферы распространяются не по ветру, а по течению. Эксперимент с первым буйом показал, что при запуске в непосредственной близости от берега в условиях прижимного течения буй быстро будет выброшен на берег.

**Второй дрейфер** был запущен 25.04.19 в 11:08 GMT на расстоянии 2.3 км от берега вне плума. «Судьба» второго дрейфера представляет наибольший интерес. С момента запуска до 11:16 GMT следующего дня, т.е. в течение суток, он передавал координаты своего местоположения по SMS. Потом связь с ним оборвалась до 29.04.19 23:44 GMT, когда он трижды передал свои координаты. В тот момент он находился на траверзе Архипо-Осиповки на расстоянии 20 км от берега. В дальнейшем связь с ним не восстановилась. По счастливой случайности он был обнаружен на берегу

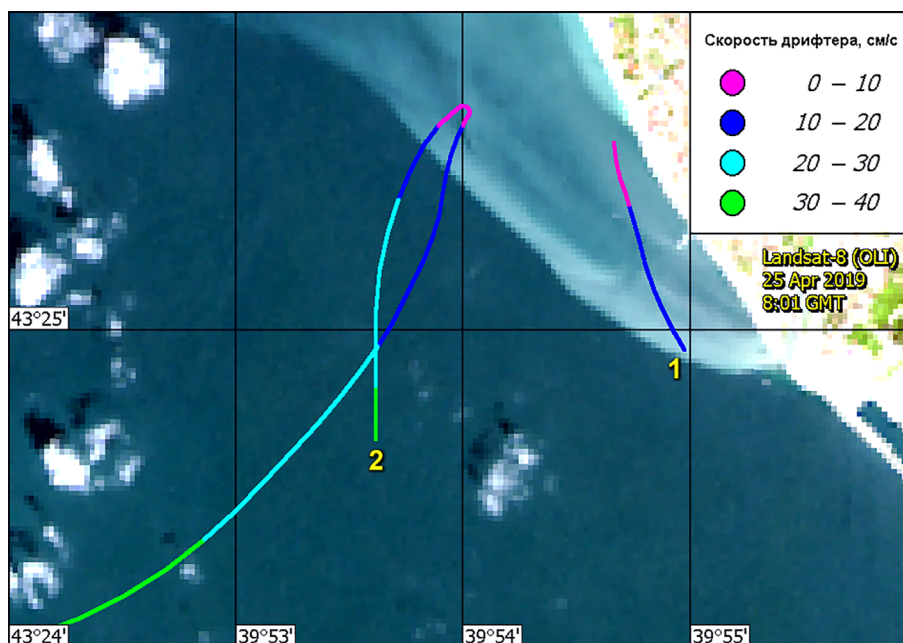


Рис. 5. Трек 1-го буйа и начальный трек 2-го буйа, наложенные на фрагмент цветосинтезированного изображения OLI Landsat-8 от 25.04.19, полученного над приустьевой зоной р. Мзымта. Цифры отмечают места запусков соответствующего буйа.

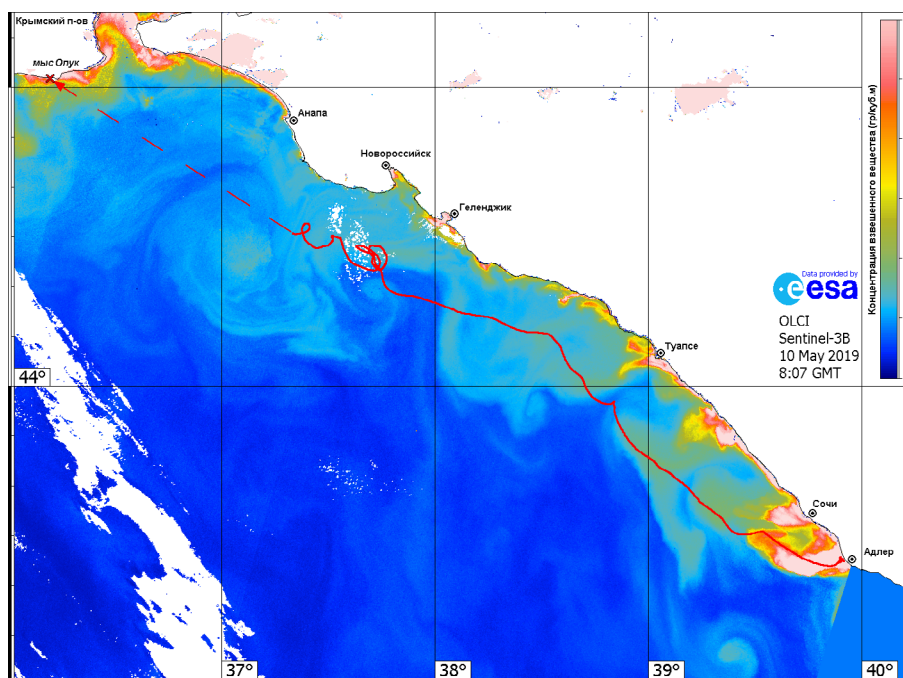


Рис. 6. Полный трек второго дрейфтера. Пунктиром соединены точки, где закончилось питание, и место обнаружения на берегу.

в заповедном районе юго-восточной части Крыма в районе м. Опук и доставлен в Севастополь. Все данные о координатах местоположений сохранились на SD-карте, входящей в комплект, что позволило восстановить трек дрейфтера до того момента, когда у него закончилось питание. Информация на

SD-карту записывалась каждые 10 мин и оборвалась 07.05.19 в 06:36 GMT. Буй в этот момент находился западнее Новороссийска (рис. 6). Полученная информация о местоположении со скважностью 10 мин. в течение 12 суток представляет большой массив интересных данных.



Проследим путь второго дрейфтера детально. После запуска с судна его стало относить к берегу с первоначальной скоростью 30.4 см/с. По непонятной причине он описал петлю в антициклоническом направлении, уменьшая свою скорость до 1.9 см/с в дальнейшей точке (рис. 5). Скорее всего, данная петля является проявлением инерционных колебаний, форма которых отличается от круговой в результате воздействия фоновых течений (Лаврова, Сабинин, 2016).

Завершив петлю через шесть часов, он сначала удалялся от берега с всё возрастающей скоростью от 20 до 40 см/с, а потом дрейфовал вдоль берега в течение недели (рис. 7, 9). Учитывая, что скорость его дрейфа доходила до 60–70 см/с, можно сделать вывод, что буй попал в струю ОЧТ, которая находилась на расстоянии всего 14–19 км от берега. Достигнув 2 мая акватории Черного моря в районе Геленджик–Новороссийск буй начал описывать «петли» в антициклоническом направлении (рис. 8). Он оставался в этом районе более пяти суток (затем у него закончилось питание, его дальнейшая траектория неизвестна). Обратим внимание на то, что скорость буя при вхождении в первую петлю составила 90 см/с, что свидетельствует о том, что он был захвачен антициклоническим вихрем, а не совершал инерционные колебания. О наличии вихревых

структур в этом районе свидетельствует и True Color изображение MSI Sentinel-2A от 4 мая, на которое наложен фрагмент трека второго буя (рис. 8). Напомним, что данный район известен вихревой активностью, изучению которой посвящено много публикаций (Зацепин и др., 2011; Лаврова и др. 2011; Митягина, Лаврова, 2009; Mityagina et al., 2010; Kostianoy et al., 2018).

Еще одно интересное наблюдение, на которое хотелось бы обратить внимание. На изображении MSI Sentinel-2B от 26.04.19 (рис. 7), полученном в зоне солнечного блика, хорошо идентифицируются слики (темные линии, соответствующие выглаженной поверхности), связанные с наличием на поверхности моря биогенных пленок. Стики, как правило, образуются в местах схождения течений (конвергенции) и вытягиваются вдоль них. Однако, как мы можем заметить (рис. 7), буй пересекает слики, не изменяя направления своего движения. Это свидетельствует, скорее всего, о том, что это чисто поверхностные явления, которые не оказывают влияние на течения на глубине 0.5–1.5 м, где находится парус буя. В то же время, при детальном совместном анализе карт концентрации взвешенного вещества (TSM, см. например рис. 6), построенных по данным OLCI Sentinel-3, и трека 2-го буя было выявлено, что вихревые структуры, визуализированные за

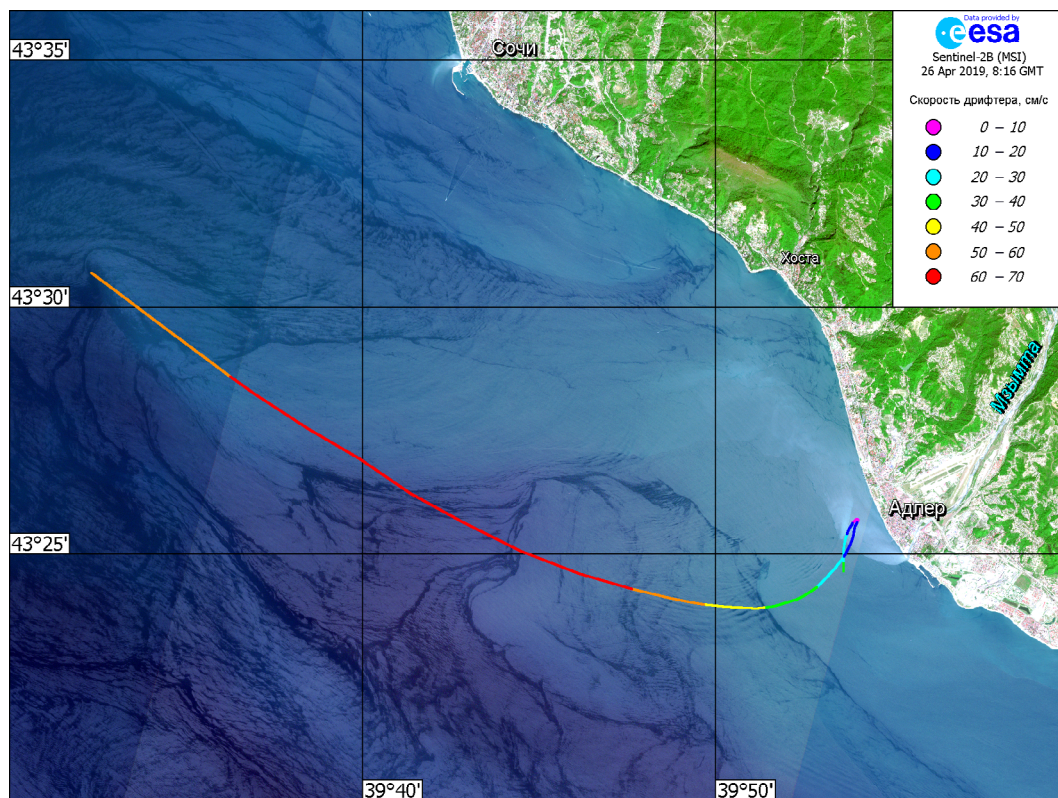


Рис. 7. Часть трека второго дрейфтера, информация с которого была получена по SMS, наложенная на цветосинтезированное изображение MSI Sentinel-2B от 26.04.19.

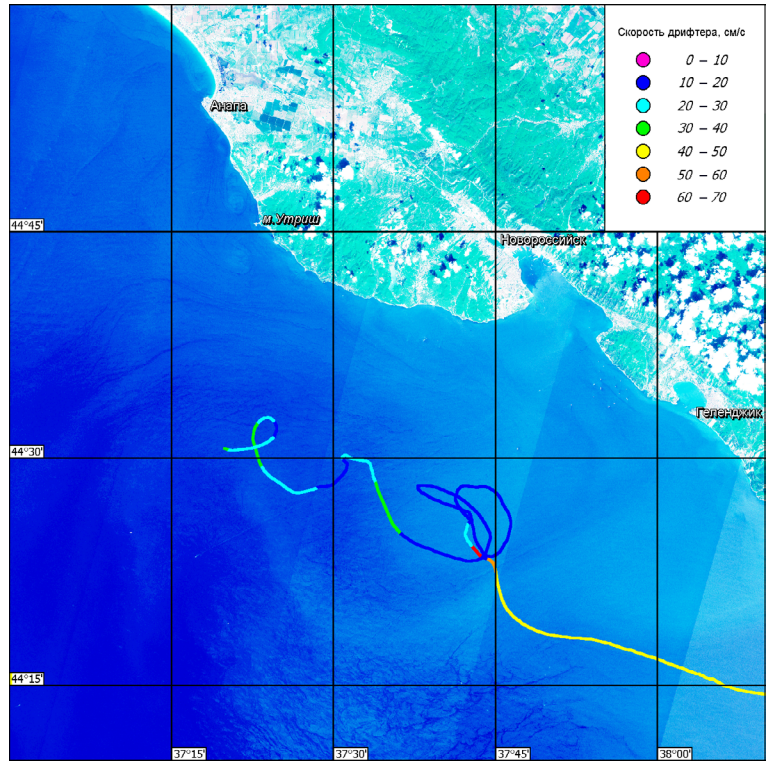


Рис. 8. Проявление влияния вихревых структур на распространение дрейфера. Часть трека второго дрейфера, наложенная на цветосинтезированное изображение MSI Sentinel-2A от 04.05.19.

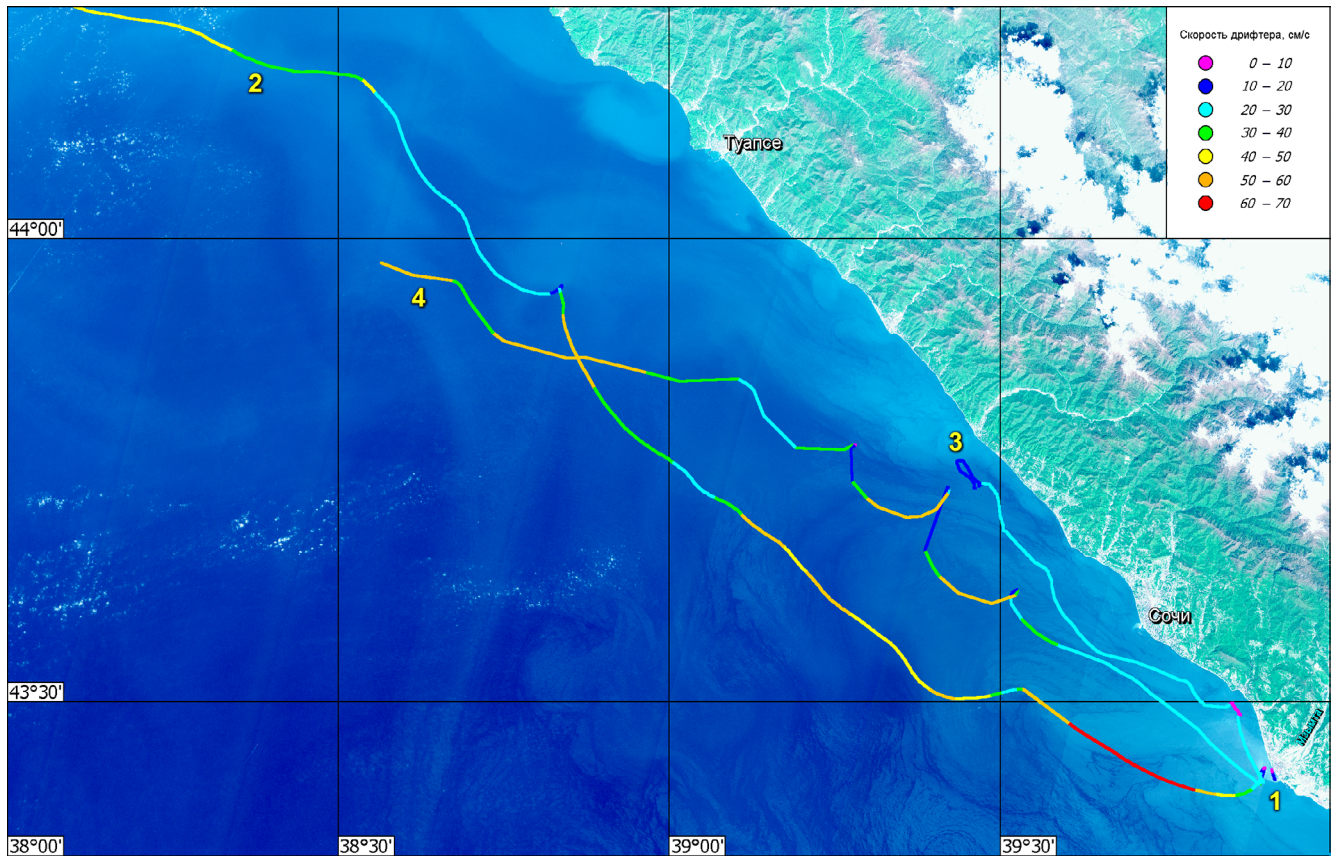


Рис. 9. Треки всех четырех дрейферов наложенные на фрагмент изображения MSI Sentinel-2B от 26.04.19. Цифры соответствуют номеру дрейфера.

счет взвеси, оказали влияние на дрейф буй. Таким образом, можно утверждать, что вихри, проявляющиеся на картах TSM, проникают на глубину, как минимум один метр. Вопрос о глубине проникновения вихрей, идентифицируемых на спутниковых изображениях, так до конца и не решен, надеюсь, что дрейфтерные эксперименты позволят существенно продвинуться в решении этого вопроса.

**Третий дрейфтер** был запущен 28.04.19 в 09:17 GMT на расстоянии 1.8 км от берега практически на границе плюма. Ветер на момент запуск был слабым, 2–3 м/с, южных румбов (рис. 4). Плюм р. Мзымта распространялся вдоль берега в северо-западном направлении, в том направлении дрейфовал и буй, оставаясь на расстоянии не более 2 км от берега. Его скорость составляла 20–30 см/с. Вечером того же дня буй попал в «мертвую зону» в бухте Тихая, не доходя м. Видный (район Хосты), где оставался в течение суток. Скорость упала практически до нуля. На рис. 9 часть трека третьего дрейфтера в «мертвой зоне» помечена фиолетовым цветом. Затем буй продолжил дрейфовать вдоль берега, а 2 мая, описав в циклоническом направлении практически полностью замкнутую петлю, перестал выходить на связь. К сожалению, 2 мая из-за облачной погоды спутниковые данные видимого диапазона были не информативны, а на радиолокационных изображениях никаких проявлений вихрей или других гидродинамических процессов на фоне ветровых не было выявлено. Скорее всего, буй попал в зону действия субмезомасштабного циклонического вихря, который проникал на глубину как минимум до 4 м, где находился центр паруса. Но данная гипотеза, естественно, требует более серьезного подтверждения.

И, наконец, **четвертый дрейфтер** был запущен 1 мая практически в том же месте, где и второй, на 250 м мористее. Первоначально он перемещался вдоль береговой черты, скорость его варьировалась от 20 до 30 см/с. Он три раза описал инерционные петли (рис. 9), размер которых определялся фоновым течением, а затем попал в зону влияния ОЧТ, под влиянием которого его скорость увеличивалась на отдельных участках до 85 см/с. Он проработал 6 суток, до 7 мая, что было совсем неплохо, учитывая тот факт, что установленный в нем трекер участвовал еще в дрейфтерном эксперименте на Балтийском море в августе 2018 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты дрейфтерного эксперимента убедительно доказывают, что использование недорогого и простейшего в изготовлении прибора, каким является

лагранжевый мини-дрейфтер, позволяет получать оперативную информацию о параметрах прибрежных течений в достаточно большой акватории. В частности, в экспериментах апреля–мая 2019 г. в северо-восточной части Черного моря удалось выявить скорость прибрежных течений на разном удалении от берега, в частности скорость ОЧТ в струе, прижатой к берегу. Была определена «мертвая зона» в районе м. Видный, где значительно ослаблена прибрежная циркуляция вод. В такой зоне могут скапливаться различного рода загрязнения, например, связанные с выносом рек Мзымта, Сочи, и водами из подводного выпуска г. Адлер.

Совместный анализ спутниковой информации и данных дрейфтерных экспериментов позволил по косвенным признакам, таким как искривление траектории дрейфтера, оценить глубину проникновения вихревых структур, которые идентифицируются на спутниковых изображениях за счет различных механизмов проявлений: сликовый или за счет рассеяния на водах разной мутности (Лаврова и др., 2011).

Отдельно хочется отметить, что благодаря информации с лагранжевых мини-дрейфтеров возможно было пронаблюдать проявления инерционных колебаний, пространственные характеристики которых практически никакими другими способами получить не удается.

Описанные дрейфтерные эксперименты позволили также оценить устойчивость и дальность мобильной связи вдоль черноморского побережья. Естественно, использование других моделей дрейфтеров, например Spot Trace, использующих спутниковую связь, позволило бы проводить измерения на большем расстоянии от берега. Но это сильно увеличило бы затраты на проведение таких экспериментов. К тому же, для решения задачи влияния различных гидродинамических процессов на распространение загрязнений, связанных в частности с выносом в море речных вод, необходимо знание характеристик именно прибрежных течений. А для решения таких задач, как показывает наш многолетний опыт, использование лагранжевых мини-дрейфтеров чрезвычайно полезно.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспедиционные работы проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта № 17–05–00715. Разработка и усовершенствование лагранжевых мини-дрейфтеров

осуществлялась в рамках государственного задания ИКИ РАН, темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность коллегам из Севастопольского отделения ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (ГОИН) за доставку найденного ими нашего мини-дрифтера в Севастополь, что позволило получить с него ценную информацию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В.* Характеристики инерционных колебаний по данным экспериментальных измерений течений на российском шельфе Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 135–142.
- Голенко М.Н., Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю.* Исследование особенностей прибрежных поверхностных течений в Юго-Восточной Балтике по результатам подспутниковых дрейфтерных экспериментов и численного моделирования // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 280–296. doi: 10.21046/2070–7401–2017–14–7–280–296
- Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В., Еремеев В.Н., Кременецкий В.В., Мотыжьев С.В., Поярко С.Г., Пулейн П., Станичный С.В., Соловьев Д.М.* Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое черного моря по дрейфтерным данным // Океанология. 2004. Т. 44. С. 34–48.
- Журбас В.М., Кузьмина Н.П., Лыжков Д.А.* Вихреобразование за мысом при генерации течения кратковременным воздействием вдольберегового ветра (численные эксперименты) // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 389–399.
- Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М.* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Чёрного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.
- Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Назирова К.Р., Строчков А.А.* Возможность получения динамических и пространственных характеристик процессов и явлений в прибрежной зоне на основе комплексного использования квазисинхронных спутниковых данных // Вестник ТвГУ. Серия "География и Геоэкология". 2018. № 3. С. 108–124.
- 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 // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 98–129.
- Лаврова О.Ю., Сабинин К.Д.* Проявления инерционных колебаний на спутниковых изображениях морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 60–73.
- Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Чёрного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
- Мотыжьев С.В., Лунев Е.Г., Толстошеев А.П.* Развитие дрейфтерных технологий и их внедрение в практику океанографических наблюдений в черном море и мировом океане // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». 2011. Вып. 24. С. 259–273.
- Назирова К.Р., Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Жук Е.В., Алферьева Я.О.* Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 227–243.
- Сильвестрова К.П., Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Краюшкин Е.В., Баранов В.И., Самсонов Т.Е., Куклев С.Б.* Возможности использования gps-дрифтеров для исследования течений на шельфе Черного моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 159–166.
- Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lavrova O.Y., Mityagina M.I.* Satellite Remote Sensing of Submesoscale Eddies in the Russian Seas / Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. (eds). The Ocean in Motion. Springer Oceanography. Springer, Cham. 2018. P. 397–413. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24)
- Krayushkin E., Lavrova O., Storchkov A.* Application of GPS/GSM Lagrangian mini-drifters for coastal ocean dynamics analysis // Russian Journal of Earth Science. 2019. V. 19. ES1001.
- Mityagina M.I., Lavrova O.Y., Karimova S.S.* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // Intern. J. Remote Sensing. 2010. V. 31. № 17. P. 4779–4790.
- Niiler P.P., Davis R.E., White H.* Water-following characteristics of a mixed layer drifter // Deep-Sea Research. 1987. V. 34. № 11. P. 1867–1881.
- Novelli G., Guigand C., Cousin C., Ryan E., Laxague N., Dai H., Haus B., Ozgokmen T.* A biodegradable surface drifter for ocean sampling on a massive scale // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2017. 34. P. 2509–2532. doi:10.1175/JTECH-D-17-0055.1
- Ohlmann J., Molemaker M., Baschek B., Holt B., Marmorino G., Smith, G.* Drifter observations of submesoscale flow kinematics in the coastal ocean // Geophysical Research Letters. V. 44. P. 330–337. doi:10.1002/2016GL071537
- Poje A., Özgökmen T., Lipphardt B., Haus B., Ryan E., Haza A. et al.* Submesoscale dispersion in the vicinity of the Deepwater

- Horizon spill // Proc. National Academy of Sciences 111. P. 12693–12698. doi: 10.1073/pnas.1402452111
- Poulain P.-M., Barbanti R., Motyzhnev S., Zatsepin A.* Statistical description of the Black Sea nearsurface circulation using drifters in 1993–2003 // Deep-Sea Research. 2005. V. 52. P. 2250–2274.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H.* The Oceans. New York, Prentice Hall Inc., 1942. 1087 p.
- Sybrandy A.L., Niiler P.P.* WOCE/ TOGA Lagrangian drifter construction manual. WOCE Report No 63. 1991. SIO Report No 91/6. Scripps Institution of Oceanography, La Jolla.
- Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A.* Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddy Regime. Geophys. Monogr. Ser. 2008. V. 177. P. 17–37. doi: 10.1029/177gm04
- Tolstosheev A.P.* A method of estimation of the results of reconstruction of the trajectories of drifting buoys // Physical Oceanography. 2010. V. 19. № 6. P. 358–365.
- Zhurbas V.M., Oh S.I., Paka V.T.* Generation of cyclonic eddies in the Eastern Gotland Basin of the Baltic Sea following dense water inflows: Numerical experiments // J. Mar. Syst. 2003. № 38. P. 323–336.
- Zhurbas V., Stipa T., Mälkki P., Paka V., Golenko N., Hense I., Sklyarov V.* Generation of subsurface cyclonic eddies in the southeast Baltic Sea: Observations and numerical experiments // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. № C05033. doi:10.1029/2003JC002074

## The Use of Mini-Drifters in Coastal Current Measurements Conducted Concurrently with Satellite Imaging

O. Yu. Lavrova<sup>1</sup>, D. M. Soloviev<sup>2</sup>, A. Ya. Strochkov<sup>1</sup>, K. R. Nazirova<sup>1</sup>, E. V. Krayushkin<sup>1</sup>, E. V. Zhuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia

The results of field measurements of coastal currents using Lagrangian mini-drifters are presented. Drifter experiments were conducted concurrently with satellite imaging using Sentinel-2 MSI, Landsat-8 OLI and Sentinel-3 OLCI sensors. It is shown that the use of an inexpensive and simple to manufacture device, which is a mini-drifter, allows obtaining operational information about the parameters of coastal currents. In the experiments of April-May, 2019, in the northeastern part of the Black Sea, it was possible to estimate the velocity of coastal currents and determine the minimum distance that Black Sea Rim Current approached the coast. The trajectories of mini-drifters revealed the manifestations of inertial oscillations whose spatial characteristics are almost impossible to measure in any other way. The influence of the vortex structures detected in visible satellite images on the distribution of mini-drifters was estimated.

**Keywords:** remote sensing of sea surface, Lagrangian mini-drifters, coastal current, inertial oscillations, the Black Sea

### REFERENCES

- Bondur V.G., Sabinin K.D., Grebenyuk Y.V.* Characteristics of inertial oscillations according to the experimental measurements of currents on the Russian shelf of the Black Sea // Izv. Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. № 1. P. 120–126. <https://doi.org/10.1134/S0001433816050030>
- Golenko M.N., Krayushkin E.V., Lavrova O. Yu.* Issledovanie osobennosti pribrezhnykh poverkhnostnykh techenii v Yugo-Vostochnoi Baltike po rezul'tatam podsputnikovykh drifternykh eksperimentov i chislennogo modelirovaniya [Investigation of coastal surface currents in the South-East Baltic based on concurrent drifter and satellite observations and numerical modeling] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2017. V. 14. № 7. P. 280–296. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-7-280-296> (In Russian).
- Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lavrova O.Y., Mityagina M.I.* Satellite Remote Sensing of Submesoscale Eddies in the Russian Seas / Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. (eds). The Ocean in Motion. Springer Oceanography. Springer, Cham. 2018. P. 397–413. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24)
- Krayushkin E., Lavrova O., Strochkov A.* Application of GPS/GSM Lagrangian mini-drifters for coastal ocean dynamics analysis // Russian Journal of Earth Science. 2019. V. 19. ES1001. <https://doi.org/10.2205/2018ES000642>
- Lavrova O. Yu., Krayushkin E.V., Nazirova K.R., Strochkov A. Ya.* Vozmozhnost' polucheniya dinamicheskikh i prostranstvennykh kharakteristik protsessov i yavlenii v pribrezhnoi zone na osnove kompleksnogo ispol'zovaniya kvazisinkhronnykh sputnikovyykh dannykh [The possibility of receiving dynamic and spatial characteristics of processes and phenomena in a coastal zone based on integrated use of quasi-synchronous satellite data] // Vestnik TVGU, Series: Geography and Geoecology. 2018. № 3. P. 108–124. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-108-124> (In Russian)
- Lavrova O. Yu., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A.* Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii [Complex satellite monitoring of the Russian Seas], Moscow: IKI RAN, 2011, 472 p. (In Russian).
- Lavrova O. Yu., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Serebryany A.N.* Izuchenie gidrodinamicheskikh protsessov v shel'fovoi zone na osnove sputnikovoi informatsii i dannykh podsputnikovykh izmerenii [Study of hydrodynamic processes in the shelf zone

- based on satellite data and subsatellite measurements] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, № 5, pp. 98–129. (In Russian)
- Lavrova O. Yu., Sabinin K.D.* Proyavleniya inertsiyonnykh kolebaniy na sputnikovykh izobrazheniyakh morskoi poverkhnosti [Manifestations of inertial oscillations in satellite images of the sea surface] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. V. 13. № 4. P. 60–73. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-21-60-73> (In Russian)
- Mityagina M.I., Lavrova O.Y., Karimova S.S.* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // *Intern. J. Remote Sensing*. 2010. V. 31. № 17. P. 4779–4790. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.485151>
- Mityagina M.I., Lavrova O. Yu.* Sputnikovye nablyudeniya vikhrevykh i volnovykh protsessov v pribrezhnoi zone severo-vostochnoi chasti Chernogo morya [Satellite Observations of Eddy and Wave Processes in the Coastal Waters of the North-Eastern Black Sea] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2009. № 5. P. 72–79. (In Russian)
- Motyzhev S.V., Lunev E.G., Tolstosheev A.P.* Razvitie drifternykh tekhnologii i ikh vnedrenie v praktiku okeanograficheskikh nablyudenii v chernom more i mirovom okeane [Development of drifter technologies and their introduction into the practice of oceanographic observations in the Black Sea and the World Ocean] // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa. Sevastopol': NPTs «EKOSI-Gidrofizika»*. 2011. № 24. P. 259–273. (In Russian)
- Nazirova K.R., Lavrova O. Yu., Krayushkin E.V., Soloviev D.M., Zhuk E.V., Alferyeva Ya.O.* Osobennosti vyyavleniya parametrov rechnogo plyuma kontaktnymi i distantsionnymi metodami [Features of river plume parameter determination by in situ and remote sensing methods] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. № 2. P. 227–243. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243> (In Russian)
- Niiler P.P., Davis R.E., White H.* Water-following characteristics of a mixed layer drifter // *Deep-Sea Research*. 1987. V. 34. № 11. P. 1867–1881. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(87\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0198-0149(87)90060-4)
- Novelli G., Guigand C., Cousin C., Ryan E., Laxague N., Dai H., Haus B., Özgökmen T.* A biodegradable surface drifter for ocean sampling on a massive scale // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2017. V. 34. P. 2509–2532. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0055.1>
- Ohlmann J., Molemaker M., Baschek B., Holt B., Marmorino G., Smith G.* Drifter observations of submesoscale flow kinematics in the coastal ocean // *Geophysical Research Letters*. V. 44. P. 330–337. <https://doi.org/10.1002/2016GL071537>
- Poje A., Özgökmen T., Lipphardt B., Haus B., Ryan E., Haza A. et al.* Submesoscale dispersion in the vicinity of the Deepwater Horizon spill // *Proc. National Academy of Sciences*. 2014. V. 111. P. 12693–12698. <https://doi.org/10.1073/pnas.1402452111>
- Poulain P.-M., Barbanti R., Motyzhev S., Zatsepin A.* Statistical description of the Black Sea nearsurface circulation using drifters in 1993–2003 // *Deep-Sea Research*. 2005. V. 52. P. 2250–2274. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.08.007>
- Silvestrova K.P., Myslenkov S.A., Zatsepin A.G., Krayushkin E.V., Samsonov T.E., Baranov V.I., Kuklev S.B.* GPS-drifters for study of water dynamics in the Black Sea shelf zone // *Oceanology*. 2016. V. 56. № 1. P. 150–156. <https://doi.org/10.1134/S0001437016010112>
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H.* *The Oceans*, New York, Prentice Hall Inc., 1942. 1087 p.
- Sybrandy A.L., Niiler P.P.* WOCE/ TOGA Lagrangian drifter construction manual // WOCE Report No 63. 1991. SIO Report No 91/6. Scripps Institution of Oceanography, La Jolla.
- Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A.* Submesoscale processes and dynamics, Ocean Modeling in an Eddy Regime // *Geophys. Monogr. Ser.* 2008. V. 177. P. 17–37. <https://doi.org/10.1029/177gm04>
- Tolstosheev A.P.* A method of estimation of the results of reconstruction of the trajectories of drifting buoys // *Physical Oceanography*. 2010. V. 19. № 6. P. 358–365. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9059-1>
- Zatsepin A.G., Baranov V.I., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Kremenetskiy V.V., Ostrovskii A.G., Soloviev D.M.* Submesoscale eddies at the caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation // *Oceanology*. V. 57. № 4. P. 554–567. <https://doi.org/10.1134/S0001437011040205>
- Zhurbas V., Stipa T., Mälkki P., Paka V., Golenko N., Hense I., Sklyarov V.* Generation of subsurface cyclonic eddies in the southeast Baltic Sea: Observations and numerical experiments // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. № C05033, doi:10.1029/2003JC002074
- Zhurbas V.M., Kuzmina N.P., Lyzhkov D.A.* Eddy formation behind a coastal cape in a flow generated by transient longshore wind (Numerical experiments) // *Oceanology*. 2017. V. 57. № 3. P. 350–359. <https://doi.org/10.1134/S0001437017020229>
- Zhurbas V.M., Oh S.I., Paka V.T.* Generation of cyclonic eddies in the Eastern Gotland Basin of the Baltic Sea following dense water inflows: Numerical experiments // *J. Mar. Syst.* 2003. № 38. P. 323–336. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00251-8](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00251-8)
- Zhurbas V.M., Zatsepin A.G., Grigor'eva Yu.V., Poyarkov S.G., Ereemeev V.N., Kremenetskiy V.V., Motyzhev S.V., Stanichny S.V., Soloviev D.M., Poulain P.-M.* Water circulation and characteristics of currents of different scales in the upper layer of the Black Sea from drifter data // *Oceanology*. 2004. V. 44. № 1. P. 30–43.