

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ GPS-ДРИФТЕРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2016 г. К. П. Сильвестрова^{1,2}, С. А. Мысленков^{1,2,3}, А. Г. Зацепин¹, Е. В. Краюшкин^{2,4},
В. И. Баранов⁵, Т. Е. Самсонов², С. Б. Куклев⁵

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

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва

⁴ Институт космических исследований РАН, Москва

⁵ Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик

e-mail: stasocean@gmail.com

Поступила в редакцию 01.06.2015 г.

После доработки 16.06.2015 г.

В статье приводятся описание и результаты апробации системы мониторинга течений, основанной на отслеживании траекторий дрейфтеров, оснащенных GPS-приемником и сотовой связью GSM. Данная система позволяет получать данные о течениях с пространственным разрешением 100–200 м и заданным временным интервалом от 5 минут. Благодаря использованию GSM-связи за движением дрейфующих буйев можно наблюдать в режиме реального времени. На шельфе Черного моря был проведен ряд экспериментов. Были выявлены сильные и слабые стороны использования дрейфтеров. Проведено сравнение полученных траекторий дрейфтеров с данными донного и буксируемого ADCP.

DOI: 10.7868/S0030157416010111

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов изучения поверхностных течений является метод поплавков. Он реализует подход, предложенный Лагранжем в рамках классической гидромеханики, и предполагает наблюдение за движением каждой отдельной частицы. Местоположение частицы фиксируется через определенные промежутки времени, что позволяет восстанавливать траекторию и скорость ее движения и составлять схемы циркуляции вод. На практике в качестве наблюдаемой частицы используется дрейфующий буй – дрейфтер. Дрейфтер, как правило, имеет надводную и подводную (парус) части. Для уменьшения влияния ветра на движение дрейфтера, подводная часть дрейфтера по площади сечения намного превосходит надводную часть. Подводный парус может иметь различную площадь, форму и глубину расположения, что определяет тот объем жидкости, о перемещении которого мы получаем данные, используя дрейфтеры. Для позиционирования дрейфтеров в настоящее время активно применяются глобальные навигационные спутниковые системы (GPS). К преимуществам GPS относятся: отсутствие необходимости в прямом наблюдении позиционируемого объекта (ранее для этого применялись теодолиты или радиолокаторы), высокая частота данных о местоположении, авто-

номность работы (от нескольких суток до месяцев), полное покрытие Мирового океана сигналами GPS, всепогодность наблюдений, компактность и экономичность пользовательской аппаратуры, возможность ее объединения с радио, GSM или спутниковым передатчиком для трансляции координат в режиме реального времени.

В мировой практике дрейфтеры применяются уже много лет [2, 7, 10, 11] и являются одним из важных источников знаний о течениях. Однако в большинстве дрейфтеров для передачи координат используется спутниковая связь, что приводит к значительным финансовым затратам на производство и использование дрейфтеров. В последние годы стали массово производиться маяки слежения за различными объектами (например, для слежения за автомобилями во время грузоперевозок и пр.), оснащенные передатчиком сотовой GSM-связи. Использование этих маяков для исследования течений является альтернативой специализированным дрейфтерам со спутниковой связью. С другой стороны, покрытие сети GSM ограничивается прибрежной зоной (около 20 км для Черного моря).

Существует также метод Эйлера, основанный на изучении параметров движения сплошной среды в фиксированной точке пространства в различные моменты времени. В наши дни для его

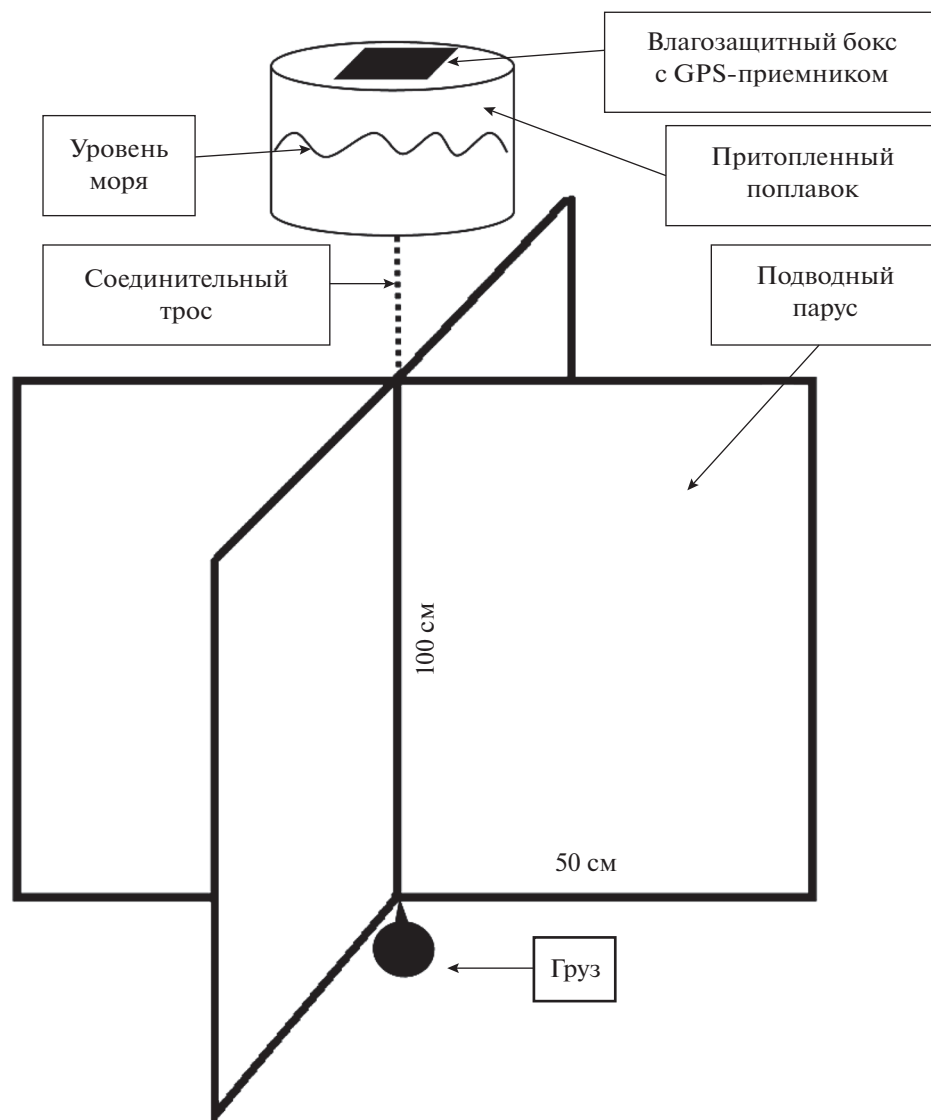


Рис. 1. Конструкция дрейфера.

реализации в основном используются приборы типа акустического доплеровского профилографа течений (далее – ADCP).

В данной статье приводится описание системы мониторинга течений, основанной на отслеживании траекторий дрейферов, оснащенных GPS-приемником и GSM-связью. Для апробации системы на шельфе Черного моря был проведен ряд экспериментов, в ходе которых выявлены преимущества и недостатки использования дрейферов. С 2012 года на гидрофизическом полигоне ИО РАН [5] несколько раз в год производится запуск до 10–15 дрейферов. Такие эксперименты дополняют существующие представления о динамике вод на черноморском шельфе. Результаты экспериментов 2012–2013 гг. описаны в работах [8, 9]. В данной работе проведено сравне-

ние полученных траекторий дрейферов с данными заякоренного и буксируемого ADCP в 2014 г.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Конструкция дрейфера. Разработанный дрейфер представляет собой конструкцию, состоящую из поплавка с закрепленным на нем GPS-приемником со встроенным GSM-модулем передачи данных, подводного паруса и груза (рис. 1). Основное требование к конструкции дрейферов для корректного измерения течений – свести к минимуму ветровое воздействие, что достигается значительно меньшей площадью надводной части по отношению к подводной [11]. В иностранной литературе для соотношения площадей паруса и

надводной части дрейфтера используется обозначение *DAR* — drag area ratio; в данном случае $DAR \approx 40$.

Конструкция рассчитана на получение данных о скорости и направлении течения в слое вод, толщина которого составляет 1 м. Подводный парус представляет собой каркас из пластиковых труб сечением 20 мм, на каркасе закреплена полипропиленовая ткань. Изменение длины соединительного троса позволяет размещать подводный парус на различных глубинах, в зависимости от поставленных задач. Пластиковый каркас дрейфтера является наполовину разборным, что упрощает его транспортировку. В сложенном состоянии 5 дрейфтеров занимают объем около 1 м³. Груза массой 5 кг достаточно, чтобы подводный парус, имеющий положительную плавучесть, был полностью погружен в воду. На надводном поплавке (15 × 15 × 10 см) расположен влагозащитный бокс, внутрь которого помещен GPS-приемник Proma-Sat 1000/Snooper, оснащенный модулем GSM для передачи координат. Характеристики GPS-приемника приведены в работе [9]. Программное обеспечение приемника позволяет провести тонкую настройку для эффективной работы. В процессе настройки устанавливается: режим работы (непрерывный или периодический), интервал отправки данных по SMS или GPRS-каналу, реагирование на начало и конец движения и др. В данной работе использовался режим непрерывного отслеживания; отправка координат на сервер производилась с интервалом 15–20 минут или реже.

Технологическая схема работы дрейфтерной системы. В начале эксперимента дрейфтеры запускают в заранее намеченных точках в море и оставляют в свободном дрейфе. GPS-приемники должны быть включены и запрограммированы на необходимый режим работы. Определение местоположения происходит через заданный интервал времени. Полученные координаты отправляются на веб-сервер Proma-Sat через канал связи GSM/GPRS. Картографическое веб-приложение <http://map.proma-sat.ru> позволяет в реальном времени наблюдать местоположение и пройденный путь каждого дрейфтера. Другой вариант — отправка приемником SMS-сообщения с координатами на мобильный телефон пользователя через заданный промежуток времени. Если в назначенный срок датчик находится вне зоны действия сети, то команда будет выполнена сразу, как только появится сеть. Мониторинг дрейфтеров в реальном времени решает проблему поиска дрейфтеров после окончания эксперимента. В нашем случае судно выходит точно на точку последнего отправленного с буя местоположения и подбирает дрейфтер. Следует учитывать, что покрытие GSM характеризуется неравномерностью и нестабильностью во времени. Необходимо опытным путем определить зону устойчивого сигнала. Одним из

удобств объединения картографического веб-приложения и GPS-мониторинга является возможность просмотра истории треков и экспорта данных в текстовый файл. Более подробно схема работы дрейфтеров описана в работах [8, 9].

Стационарный ADCP. Акустический доплеровский профилограф скорости течений Workhorse 600 кГц производства фирмы TRDI стационарно установлен в составе донной станции в Голубой бухте на глубине 23 м и удалении 1 км от берега (далее в тексте — заякоренный или донный ADCP). Передача данных осуществляется по телеметрическому каналу на берег в режиме реального времени. Подробное описание прибора приведено в работе [6].

ADCP, буксируемый в гондоле. Измерения скорости течения также проводились с помощью буксируемого в специальной гондоле ADCP TRDI Sentinel 300 кГц, обеспечивающего измерение вертикальных профилей течения в шельфовой зоне на глубине до 250 м. ADCP работал в режиме, позволяющем вычислять реальную скорость течения во время движения судна (“bottom tracking”). Точность измерения горизонтальных составляющих скорости течения составляла 2–3 см/с с вертикальным разрешением 1.5–2.5 м. Буксировка производилась на НИС “Ашамба” 5-ю галсами от берега до бровки шельфа (изобата 200 м). Изучение субмезомасштабных вихрей при помощи буксируемого ADCP описано в работах [3, 8].

ADCP, прикрепленный к борту судна. Измерения скорости течения в режиме “bottom tracking” также проводились при помощи акустического профилографа течений TRDI Workhorse Sentinel 300 кГц, закрепленного неподвижно на маломерном судне. Географическая привязка данных измерений осуществлялась в автономном режиме с помощью 10 Гц GPS-навигатора G-Star IV, интегрированного в программное обеспечение профилографа течений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2а приведены траектории движения 12 дрейфтеров, выпущенных вдоль двух перпендикулярных берегу галсов 24 июня 2014 г. Паруса располагались на глубине 3–4 м. Расстояние между дрейфтерами на одной линии запуска — около 2 км, между галсами — около 10 км.

Все дрейфтеры двигались в юго-восточном направлении со скоростью порядка 15 см/с. Структуру потока можно охарактеризовать как параллельно-струйную, поток направлен вдоль берега. В ночь с 24 на 25 июня траектории из 12 дрейфтеров синхронно развернулись в сторону открытого моря, а через 2 часа все траектории вернулись к состоянию, близкому к состоянию начала эксперимента. Только 2 дрейфтера, находившиеся

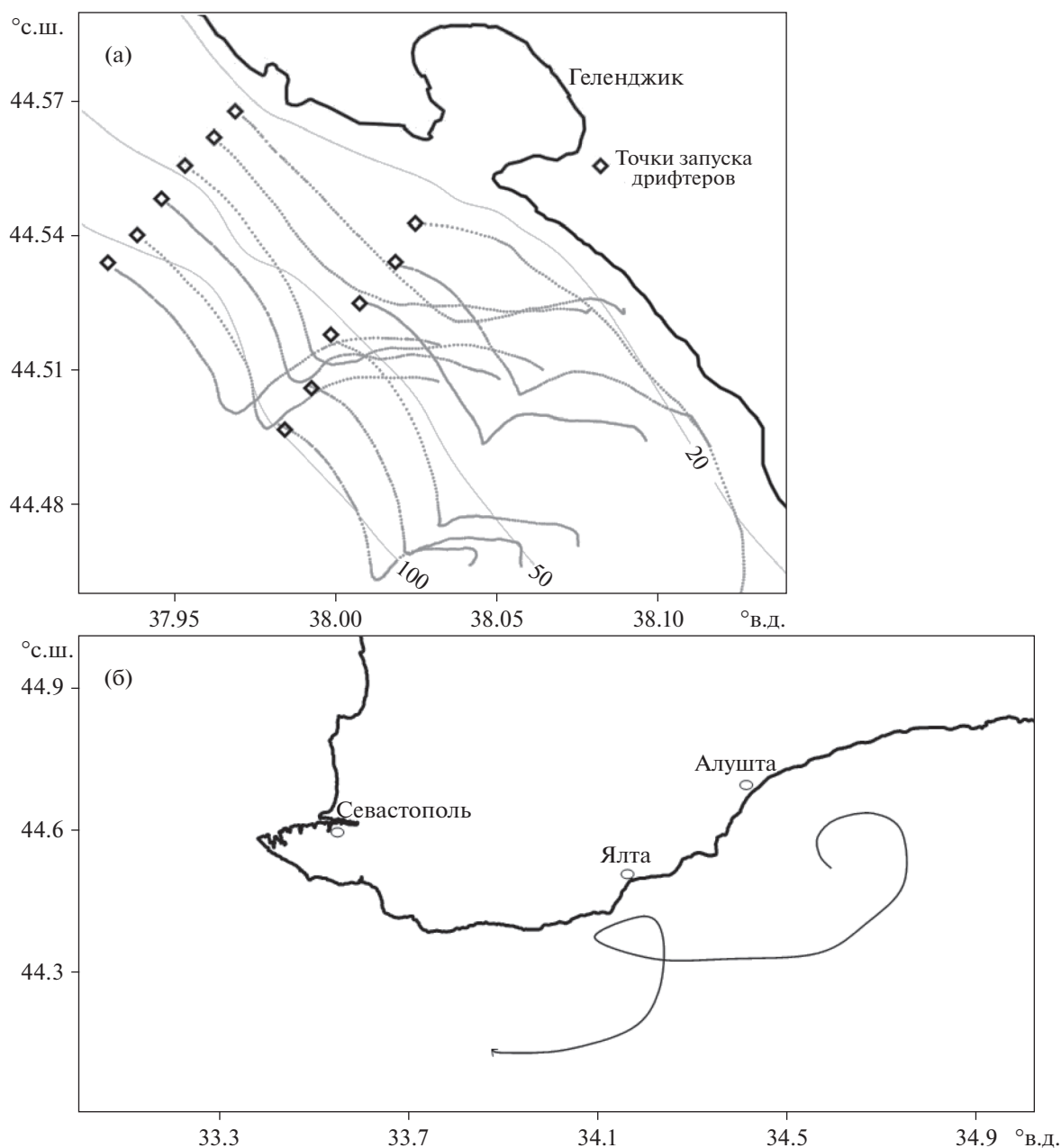


Рис. 2. Траектории движения дрейфтеров. (а) – Эксперимент 24–25.06.2014 г. Время запуска дрейфтеров 24.06.2014 г. на первом галсе (слева) – 16:20–16:50, на втором галсе (справа) – 17:25–17:50; время окончания эксперимента – 16:20–18:20 25.06.2014 г. (б) – Эксперимент 29.09–17.10.2014 г. Период с 20:30 12.10 по 19:00 17.10.2014 г.

ближе всего к берегу, практически не отклонились от первоначального направления движения. Вероятно, что дрейфтеры находились в струе узкого и более устойчивого вдольберегового течения. Ветер за эти сутки был слабым (3–4 м/с) и неустойчивым. Однако для объяснения причин такого движения дрейфтеров, мы не обладаем достаточной информацией. Подобный площадной эксперимент позволяет выявлять неоднородности поля течений от 2 до 10 км и временной изменчивостью масштаба от нескольких минут до суток.

На рис. 2б представлена часть траектории движения дрейфтера, запущенного 29 сентября 2014 г. в районе г. Геленджик. Дрейфтер попал в Основное черноморское течение и достиг полуострова Крым; траектория его движения представляет собой классическую циклоиду с диаметром петли около 15 км. Подобные траектории характерны для частиц, попавших в движущийся вихрь. Скорость перемещения центра вихря составила ~20 см/с. Данный дрейфтер был снабжен батарейным блоком (4 щелочных батареи типа С),

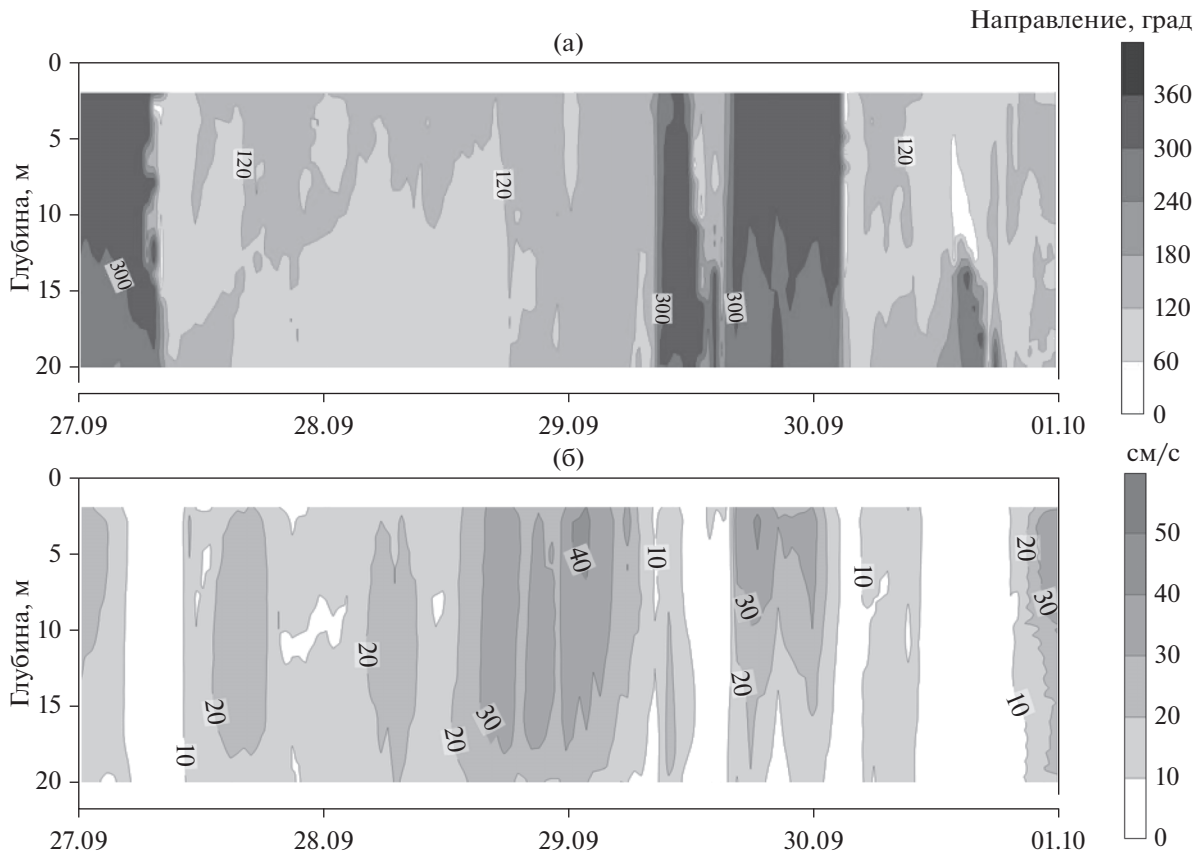


Рис. 3. Временная развертка данных заякоренного ADCP с 29.09 по 1.10.2014 г. (а) направление течений; (б) скорость течений.

время работы составило 19 суток с интервалом передачи данных 2 часа. Дрифтер большую часть времени работы находился вне зоны действия сети GSM, однако при периодическом появлении в прибрежной зоне данные из внутренней памяти отправлялись на сервер.

На рис. 3а и 3б представлены временные развертки направления и скорости течения по данным измерений заякоренного ADCP с 27 по 30 сентября 2014 г. Ветер, по данным метеостанции в г. Геленджик, в этот период был северо-восточного направления 3–5 м/с с кратковременным усилением до 10 м/с вечером 28 сентября. По данным заякоренного ADCP, 29 сентября около 8:00 зафиксирована смена направления течения во всей толще вод с юго-восточного на северо-западное; обратная смена течений зафиксирована в 03:00 30 сентября. Такие смены направления часто наблюдаются в данном районе и описаны в работах [3, 4, 6]. Также 29 сентября проводилась буксировка ADCP, по данным которой построено поле течений, полученное в промежутке от 10:43 до 14:43 29.09.2014 (рис. 4). Начало буксировки проходило в непосредственной близости от места установки заякоренного ADCP. Данные букси-

ровки представлены для первой ячейки ADCP, т.е. для слоя вод 3.7–5.2 м, где также было зафиксировано северо-западное направление течения в 10:43. Далее на первом и втором галсах буксировки наблюдались разнонаправленные течения (также кратковременная смена направления зафиксирована и на заякоренном ADCP около 12:00); на третьем галсе скорости в мористой части затухают. Так как дрифтеры были запущены после проведения буксировки около 16:00–17:00 29 сентября, при столь изменчивой динамике вод корректно проводить сравнение только с последними галсами буксировки ADCP, где наблюдался северо-западный поток и полное соответствие по скорости и направлению с данными дрифтеров. Дрифтеры в промежутке 2:00–4:00 30 сентября совершили реверсивный поворот практически на одном месте (рис. 5). Крайние из дрифтеров находились на расстоянии более чем 20 км, что свидетельствует о возможном присутствии береговой захваченной волны. По предварительным оценкам волна распространялась в северо-западном направлении со средней фазовой скоростью 2.6 м/с. Разворот течения также зафиксирован на

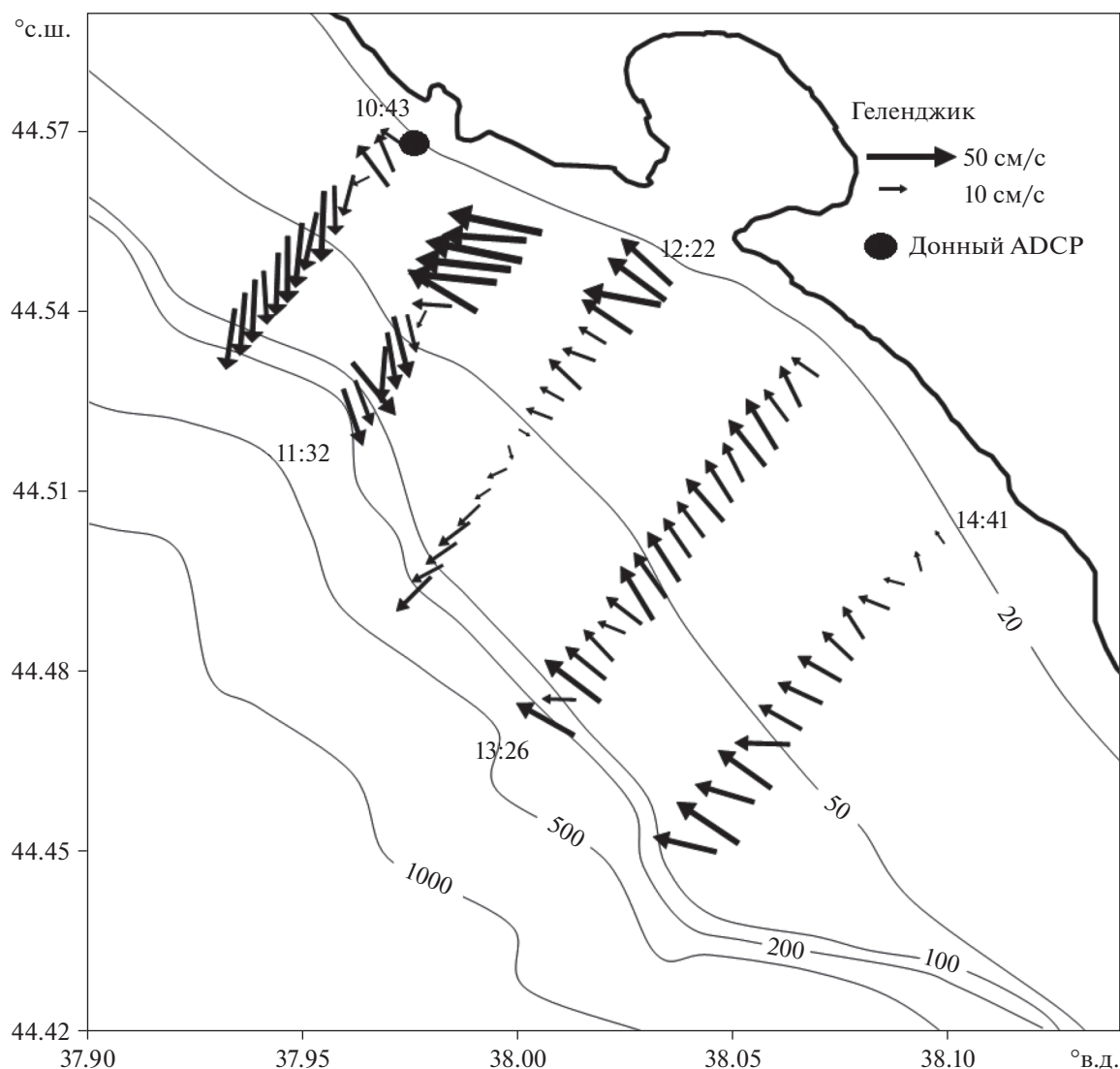


Рис. 4. Скорость и направление течений по данным буксировки ADCP 29.09.2014 г. В начале каждого галса указано время его выполнения. Тонкие линии – изобаты (м).

заякоренном ADCP. Подобные процессы и их признаки описаны в работе [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе содержится описание конструкции дрейфтеров, оснащенных GPS-приемником и GSM-связью, и схема работы дрейфтерной системы мониторинга течений. Приводятся результаты использования данной системы в районе гидрофизического полигона ИО РАН. Проведено сопоставление данных дрейфтеров, буксируемого и заякоренного ADCP. Скорость и направление течения на последних галсах по данным буксируемого ADCP 29 сентября 2014 г. совпадает с данными дрейфтеров. Показано, что использование

данных дрейфтеров для анализа динамики вод дает более полное представление о происходящих процессах, нежели при использовании только данных ADCP. Так, 30 сентября 2014 г. по данным заякоренного ADCP, был зафиксирован разворот вдольберегового течения, который мог интерпретироваться как субмезомасштабный вихрь. Однако по данным дрейфтеров зафиксированный разворот течения был линейным и прослеживался вдоль побережья на расстоянии 20 км, что указывает на проявление береговой захваченной волны.

Предложенная система показала свою пригодность в целях исследования прибрежных течений, и, несмотря на отсутствие GSM связи в некоторых районах Черного моря, при помощи

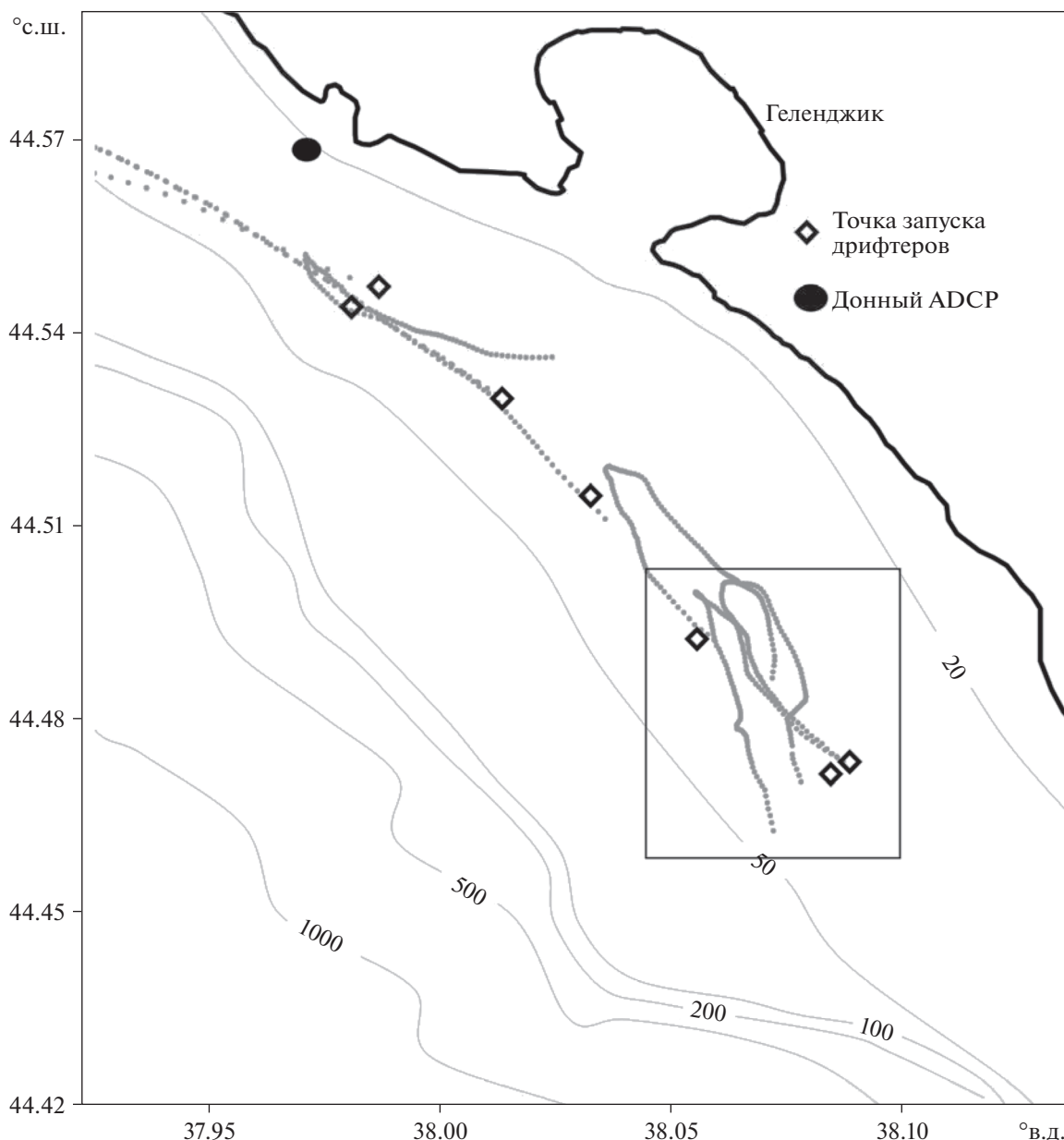


Рис. 5. Траектории движения дрейфтеров в ходе эксперимента 29–30.09.2014 г. Тонкие линии – изобаты (м).

дрейфтеров можно изучать течения на масштабах от первых сотен метров до 300 км. Благодаря высокой временной дискретности измерений есть возможность исследовать временную изменчивость течений от 10 минут.

Заглубление подводного паруса дрейфтера варьируется, что позволяет исследовать параметры течений на разных горизонтах, проводить сравнение с данными ADCP, исследовать проявления экмановского разворота и пр. Также при помощи дрейфтеров возможно произвести оценку коэффициента горизонтального турбулентного перемешивания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Тужилкин В.С. Среднемасштабные вихри и синоптическая изменчивость в Мировом океане. Итоги науки и техники. Сер. Океанология. М.: ВИНТИ АН СССР, 1990. Т. 8. 248 с.
2. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 34–48.

3. *Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О. и др.* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
4. *Зацепин А.Г., Корж А.О., Кременецкий В.В. и др.* Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 4. С. 510–519.
5. *Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др.* Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2014. № 1. С. 16–29.
6. *Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О. и др.* Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.
7. *Мотыжев 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.
8. *Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Баранов В.И.* Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе Черного моря // *Вестн. МГУ. Сер. 5. География*. 2014. № 6. С. 73–80.
9. *Мысленков С.А., Самсонов Т.Е.* Исследование течений на шельфе Черного моря с помощью ГНСС-мониторинга // *Изв. Вузов. геодезия и аэрофото-съемка*. 2014. № 3. С. 60–68.
10. *Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Мотыжев С.В.* Анализ результатов натуральных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана // *Морск. гидрофиз. журн*. 2014. № 5. С. 9–32.
11. *Niiler P.P., Paduan J.D.* Wind-driven motions in the northeast Pacific as measured by Lagrangian drifters // *J. Phys. Oceanogr.* 1995. V. 25. P. 2819–2830.

GPS-Drifters for the Study of Water Dynamics in the Black Sea Shelf Zone

K. P. Silvestrova, S. A. Myslenkov, A. G. Zatsepin, E. V. Krayushkin, V. I. Baranov,
T. E. Samsonov, S. B. Kuklev

The paper presents description of monitoring system based on drifters equipped with GPS-receiver and cellular GSM. The system provides data about currents with time-spatial resolution of 5–10 minutes and 100–200 m. Drifter’s movement can be observed in real time. Several experiments were held on the Black Sea shelf for identification advantages of the monitoring system. Results of experiments include comparison of the drifter trajectories with bottom-tracked ADCP and towed ADCP data.