

УДК 551.465.153

А. А. ЖДАНОВ, М. М. МАКАРОВ, К. М. КУЧЕР, И. А. АСЛАМОВ, Н. Г. ГРАНИН

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

## РЕГИСТРАЦИЯ ТЕЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОБОДНО ПЛАВАЮЩИХ ДРИФТЕРОВ

*В Лимнологическом институте СО РАН разработан дрейфтер, который может использоваться для измерения течений, а также поверхностных и внутренних волн. Дрейфтер оснащен микроконтроллером, GPS-приемником, фиксирующим его координаты, GPRS-терминалом, передающим данные с дрейфтера в сеть Интернет, датчиками ускорения, позволяющими получать информацию о волнении, и термисторной косой для регистрации внутренних волн. Пуски дрейфтеров проведены в 2008–2009 гг. Результаты работы дрейфтеров свидетельствуют, что в сентябре при малой ветровой активности в пелагической части озера преобладают инерционные течения. В сентябре в прибрежной части озера в основном действует общая циклоническая циркуляция.*

Ключевые слова: дрейфтер, скорость течения, волнение, ветер, внутренние волны.

*The Limnological Institute SB RAS has developed the drifter that can be used to measure currents as well as surface and internal waves. The drifter is fitted with the microcontroller, the GPS receiver recording its coordinates, the GPRS terminal transmitting data from the drifter to the Internet, the acceleration sensor providing information on waving, and with the thermistor chain for recording internal waves. The drifters were put into service in 2008–2009. Results of the drifters' operation attest that inertial currents are dominant in the pelagic part of the lake with low wind activity in September. The general cyclonic circulation is mainly at work in the offshore part of the lake in September.*

Keywords: drifter, current speed, waving, wind, internal waves.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в исследованиях течений океана значительно усилился интерес к измерениям, проводимым с помощью поверхностных дрейфтеров, или поплавков, изменение положения которых отслеживается с помощью глобальной системы определения координат (GPS) [1–6]. Работа в широкой шкале временных и пространственных масштабов, низкая цена, возможность работать в режиме реального времени — все это делает поверхностные поплавки с подповерхностными парусами эффективными для изучения приповерхностных течений, волнения и изменений температуры (внутренние волны) верхнего слоя океана и озер. На такие приборы устанавливаются дополнительные датчики, которые позволяют регистрировать характеристики как верхнего слоя воды, так и прилегающей к воде атмосферы.

На Байкале при первых наблюдениях поверхностных течений применялся метод изучения течений с помощью бутылочной почты, при этом было известно только место запуска и обнаружения. Сейчас, благодаря сотовой связи и GPS, появилась возможность в реальном времени отслеживать положение буя и таким образом знать скорости течения во время дрейфа. Регистрация волнения в пелагической части озера проведена впервые.

В конце 1950-х гг. Байкальская лимнологическая станция начала наблюдения за поверхностными течениями с помощью свободно дрейфующих поплавков. Основные работы Б. А. Помыткин [7] проводил в южной котловине озера в 1958–1962 гг., данные измерений были использованы при выборе площадки для Байкальского ЦБК. В дальнейшем выполнялись эпизодические измерения распределения скоростей течений приповерхностного слоя озера. Результаты этих исследований использовались для оценки пространственно-временной изменчивости течений и определения коэффициентов турбулентной диффузии, которые рассчитывались по данным экспериментов с трассерами. В качестве трассеров применялись флуоресцеин натрия [8–11], радиоактивные изотопы [10] и поплавки [12, 13].

На основе этих данных и материалов, полученных на буйковых станциях и в результате расчетов геострофических течений по данным температурных съемок, построено несколько схем средних течений верхнего слоя озера [14–17]. Наиболее обоснованной представляется схема средних течений

В. И. Верболова [17], которая показывает, что во всех котловинах озера преобладают циклонические макроциркуляции, т. е. основной перенос воды осуществляется вдоль берега против часовой стрелки. В южной части озера выделяются две большие циклонические циркуляции и один небольшой антициклонический вихрь в районе Лиственничного залива.

### ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для измерения течений, волнения и внутренних волн верхнего слоя озера в Лимнологическом институте СО РАН был сконструирован буй (дрифтер). Полностью автономный дрифтер способен вести постоянную регистрацию гидрологических параметров в течение двух месяцев и постоянно передавать информацию на сервер института, позволяя наблюдать за дрифтером и контролировать его перемещение в режиме реального времени.

Работой регистрирующей системы управляет 24-разрядный микроконтроллер фирмы Microchip, обеспечивающий управление функционированием всех периферийных модулей.

Алгоритм работы микроконтроллерного модуля заключается в следующем. После включения модуля контроллер запускает GPS-приемник и ждет истинных координат и точного времени. Затем он активирует GPRS-терминал (сотовый телефон) и проводит регистрацию в Интернете. После того как контроллер «выходит» в Интернет, он начинает с заданной дискретностью по сотовой связи передавать на сервер свои координаты и данные о температуре с термокосты. При нарушении сотовой связи контроллер накапливает данные во внутреннюю память и при возобновлении связи передает их блоками на сервер. Данные с акселерометра собираются с частотой 10 раз в секунду, архивируются во внутреннюю память прибора и считываются уже на берегу. В настоящее время вследствие удешевления стоимости передачи данных есть возможность передавать информацию с акселерометров в реальном масштабе времени. Реализована возможность удаленного управления алгоритмом сбора информации посредством команд, передаваемых через Интернет.

Механическая конструкция дрифтера включает в себя подводный парус, выполненный из плотной ткани в виде двух скрещенных под углом 90° рамок. Площадь поперечного сечения паруса составляет 1,5 м<sup>2</sup>, глубина его установки — 3 м. Учитывая, что сам дрифтер практически полностью погружен под воду, а на поверхности находится только мачта с антеннами и метеорологическими датчиками, можно считать, что перемещения дрифтера соответствуют течениям на глубине 3 м.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Первый запуск дрифтера был произведен 11 сентября 2008 г. на середине разреза г. Байкальск — пос. Маритуй. За время наблюдений (29 ч) он почти полностью описал две классические инерционные петли со сдвигом на юго-восток (рис. 1, а). Эксперимент проводился в штилевых условиях.

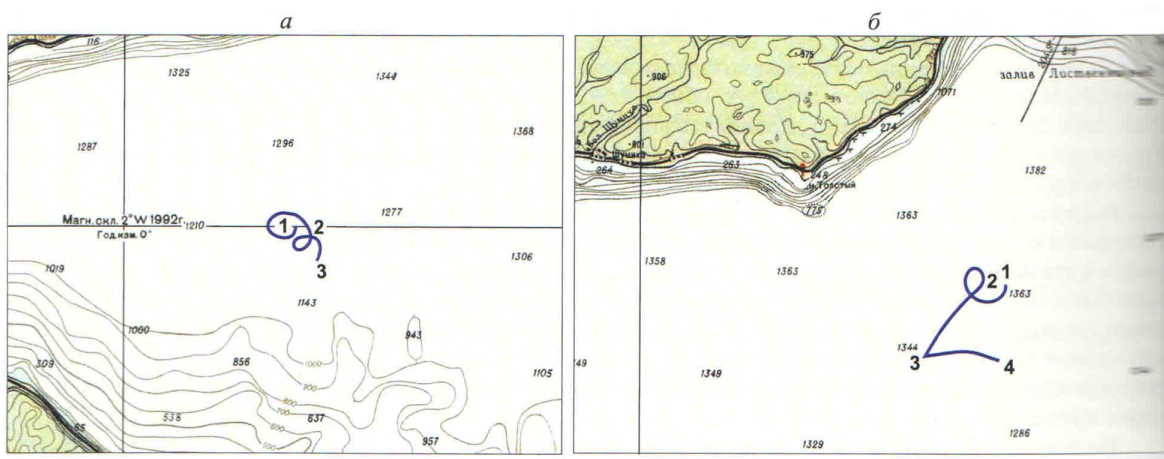


Рис. 1. Траектория движения дрифтера.

а — 11–12 сентября 2008 г. у г. Байкальска; б — 13–14 сентября 2008 г. у мыса Толстый.

Таблица 1

Скорость дрейфера  $v_{др}$  (м/с), скорость ветра  $v_{в}$  (м/с) и направление ветра  $\varphi$  (град.), осредненные за 3 ч. Постановки 2008 г.

Время, часы	11–12 сентября			13–14 сентября		
	$v_{др}$	$v_{в}$	$\varphi$	$v_{др}$	$v_{в}$	$\varphi$
10		0,5	20		2,9	20
13	0,14	0,1	320	0,19	1,9	350
16	0,10	0,1	280	0,17	1,2	320
19	0,08	0,1	250	0,13	0,1	250
22	0,12	0,0	—	0,09	0,8	30
01	0,13	0,1	40	0,12	0,2	10
04	0,11	0,1	150	0,20	1,3	10
07	0,08	0,0	—	0,18	2,0	0
10	0,06	0,0	—	0,11	1,6	350
13	0,07	0,4	190	0,17	2,2	340
16	0,09	1,0	210	0,14	1,3	300
19	0,06	0,6	230		0,9	250

(табл. 1). Перед запуском дрейфера регистрировалось небольшое усиление северо-восточного (СВ) ветра, которое и инициировало инерционные течения.

В конце первого пуска произошло небольшое усиление юго-западного (ЮЗ) ветра, что привело к небольшому увеличению волнения. По изменениям координат буя были рассчитаны скорости течения (см. табл. 1); за время первого эксперимента они изменялись от 0,05 до 0,15 м/с. Изменения скорости и направления течений происходят с инерционным периодом (около 15 ч).

Второй запуск дрейфера был осуществлен 13 сентября 2008 г. у мыса Толстый. При небольшом северо-западном (СЗ) ветре он успел описать одну инерционную петлю (см. рис. 1, б). Затем ветер изменил направление на северное и буй стал дрейфовать почти прямолинейно на ЮЗ, что полностью соответствует теории дрейфовых течений Экмана [18], согласно которой поверхностные течения отклоняются вправо на  $45^\circ$  от направления ветра. 14 сентября с 7 ч ветер усилился, при этом он постепенно менял свое направление от северного к западному (см. табл. 1), и в 10 ч произошла резкая (на  $135^\circ$ ) смена направления движения дрейфера на восточное (см. рис. 1, б). При этом усилилось (до 2 м) волнение с запада, которое по данным акселерометра началось около 10 ч. К концу наблюдения направление дрейфа дрейфера постепенно сменилось на юго-восточное. Скорости течения во время второго запуска дрейфера изменялись от 0,05 до 0,25 м/с.

Спектрограммы, построенные по данным акселерометра, свидетельствуют об увеличении частоты поверхностных волн при затухании волнения от 0,3 до 0,4 Гц. При усилении ветра в 10 ч (14 сентября) вначале частота поверхностных волн была достаточно высока — до 0,6 Гц. Развитие волнения сопровождалось уменьшением частоты до 0,3 Гц. Наличие низкочастотного сигнала, скорее всего, обусловлено колебаниями буя при порывах ветра.

Во время второго эксперимента в сентябре 2009 г. (рис. 2) было произведено две серии запусков: первая — в одном и трех километрах от пос. Бол. Коты, вторая — в семи и девяти километрах. Первый запуск продолжался 18 ч. За это время один дрейфер, запущенный в километре от поселка, прошел на юго-запад около 13 км вдоль берега в сторону пос. Листвянка, а второй, запущенный в трех километрах от поселка, — 16 км. Несмотря на то что ветер (максимальная скорость до 10 м/с) менял свое направление несколько раз (вначале ЮЗ, затем СВ и в конце СЗ), дрейф буюв проходил в полном соответствии с преобладающей в это время года циклонической циркуляцией, т. е. временами буй двигались против ветра (табл. 2). Скорости течения достигали 0,6 м/с. Движение буя, запущенного в трех километрах от берега, очень стабильное, изменения скоростей течения невелики, хотя колебания скорости ветра были значительны (см. табл. 2).

Во второй серии буй отработали около 40 ч, при этом один буй (7 км) проплыл больше второго — 35 и 28 км соответственно. Направление дрейфа, как и в первой серии, проходило вдоль берега на ЮЗ. Скорости течения достигали 0,5 м/с.

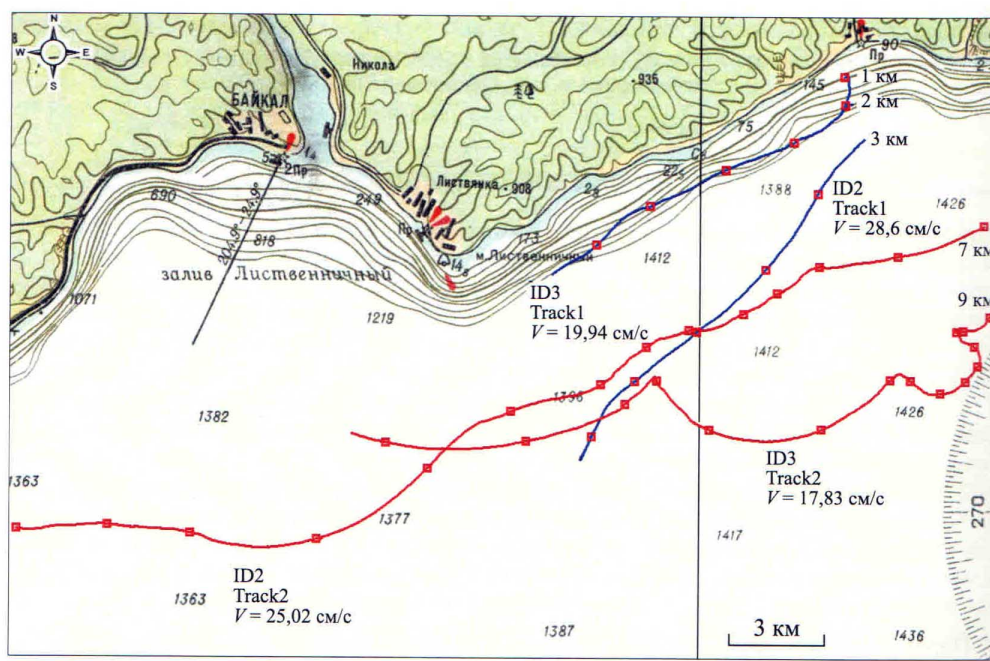


Рис. 2. Траектории движения буев 30 августа–2 сентября 2009 г. (квадраты показывают положение буя каждые 3 ч).

Первая половина второй серии пусков прошла при небольшом (до 5 м/с) переменном ветре (см. табл. 2). В это время скорость движения дрейфтеров была небольшой (до 0,1 м/с — в 9 км от берега и до 0,2 м/с — в 7 км). Во второй половине эксперимента усилился СВ ветер (сначала до 7 м/с, а в конце — до 12 м/с). Это вызвало усиление скоростей течения в два-три раза. При подходе к мысу Березовый траектории трех буев, запущенных в 3, 7, 9 км от берега, практически сошлись на расстоянии около 7 км от берега.

Таблица 2

Скорость дрейфера  $v_{др}$  (м/с), скорость ветра  $v_v$  (м/с) и направление ветра  $\phi$  (град.), осредненные за 3 ч. Постановки 2009 г.

Время, часы	30–31 августа				31 августа–2 сентября			
	$v_{др}$ , 1 км	$v_{др}$ , 3 км	$v_v$	$\phi$	$v_{др}$ , 7 км	$v_{др}$ , 9 км	$v_v$	$\phi$
12	0,09	0,24	1,2	210	0,21	0,12	1,2	100
15	0,17	0,26	2,4	20	0,22	0,08	3,4	330
18	0,20	0,28	3,3	20	0,23	0,05	1,8	20
21	0,23	0,28	2,0	10	0,15	0,08	3,2	330
00	0,24	0,24	4,1	350	0,13	0,06	2,1	20
03	0,22	0,27	5,6	350	0,18	0,07	3,6	200
06	0,17	0,28	2,4	160	0,14	0,09	1,5	220
09			1,7	160	0,19	0,12	3,8	220
12					0,29	0,16	1,7	130
15					0,32	0,31	4,2	20
18					0,42	0,32	4,4	20
21					0,37	0,16	4,5	20
00					0,24	0,22	5,6	30
03					0,29	0,38	3,7	30
06						0,45	4,2	80

## ОБСУЖДЕНИЕ

К особенностям водной циркуляции в оз. Байкал можно отнести постепенное формирование общей схемы течений в продолжение всего навигационного периода, что отмечал и М. М. Айнбунд [16]. В летние месяцы при сравнительно слабых и переменных по направлению ветрах течения имеют большую изменчивость в направлении и малую скорость. К осени, в связи с увеличением скорости и повторяемости основных ветров, течения и их устойчивость заметно возрастают. Таким образом, от лета к осени происходит повышение устойчивости общей схемы преобладающих течений.

В результате взаимодействия течений с береговым склоном формируется достаточно сложная структура поля течений: у берега образуется своеобразная зона трения, на границе которой на расстоянии 2–3 км от берега скорости течений в верхнем слое возрастают в 1,5–2 раза по сравнению с прибрежной областью, что отмечено как на Байкале [13, 16], так и на других крупных озерах [19] и в морях [20]. Такие прибрежные струи называют по-разному: например, «вдольбереговые потоки» [16] или «coastal jet» [19]. Ширина этой зоны у западного берега оз. Байкал достигает 4–5 км, у восточного — до 10 км, что обусловлено влиянием на основной поток морфометрии берега и берегового подводного склона. В зоне трения преобладает двухмодальное распределение направлений, когда повторяемость вдольбереговых течений в несколько раз превышает повторяемость течений других направлений. Эти зоны являются буферными между водами пелагиали и прибрежными водами.

Данные экспериментов с дрейфтерами показали, что в пелагической части озера при слабой ветровой активности основной вклад в результирующее течение вносит инерционная составляющая, что наглядно показывает траектория движения дрейфтеров в 2008 г.

При затухании ветра вода продолжает двигаться по инерции, и под действием силы Кориолиса (вне влияния берегов) в Северном полушарии течение начинает отклоняться вправо, образуя незамкнутые спиралевидные петли. Период таких колебаний зависит только от широты места наблюдений и определяется по известной формуле:  $\tau_{ин} = 12/\sin \varphi$ , где  $\varphi$  — широта, 12 — часы.

Так как оз. Байкал вытянуто в широтном направлении, то теоретически период инерционных колебаний в нем изменяется от 15,3 ч на юге до 14,5 ч на севере. Согласно нашим экспериментальным данным, наблюдаемый инерционный период часто оказывается несколько меньше теоретического. Как показали исследования Шота [19], первоначально возбуждаемые ветром колебания имеют период меньше инерционного, и только со временем он приближается к половине маятниковых суток.

По нашим данным, на расстояниях до 9 км от берега в основном действует общая циклоническая циркуляция, устойчивость которой к сентябрю не зависит от направления ветров. Все четыре запуска дрейфтеров в сентябре 2009 г. прошли в зоне влияния циклонической циркуляционной ячейки, на существовании которой не сказываются изменения направления ветра, вплоть до противоположного дрейфу. Усиление поверхностных течений происходит на расстоянии 3–7 км от берега. На движение буя в 9 км от берега оказывает влияние инерционная составляющая (в меньшей степени это заметно при движении буя в 7 км от берега).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы дрейфтеров свидетельствуют, что в сентябре при малой ветровой активности в пелагической части озера преобладают инерционные течения, а в прибрежной части озера в основном действует общая циклоническая циркуляция, усиление течений наблюдается в 3–7 км от берега. Инерционная составляющая оказывает влияние и на дрейфовые течения; только при дрейфовых течениях инерционные петли становятся незамкнутыми. При удалении от берега вклад инерционной составляющей в общее течение увеличивается.

Основным фактором, сдерживающим изучение течений оз. Байкал, по-прежнему является недостаток натуральных данных. Поэтому одна из актуальных задач — внедрение надежных и достаточно простых в эксплуатации автономных приборов. Дрейфтеры показали себя надежным инструментом для регистрации поверхностных течений и волнения оз. Байкал. За время экспериментов 2008–2009 гг. сбоев в их работе не было. Единственным ограничением для их работы является необходимость наличия сотовой связи, которая пока есть не во всех районах озера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McClean J. L., Poulain P.-M., Pelton J. W., Maltrud M. E. Eulerian and Lagrangian statistics from surface drifter and a high-resolution POP simulation in the North Atlantic // J. Phys. Oceanogr. — 2002. — Vol. 32. — P. 2472–2491.
2. Lumpkin R., Treguier A.-M., Speer K. Lagrangian eddy scales in the Northern Atlantic Ocean // J. Phys. Oceanogr. — 2002. — Vol. 32. — P. 2425–2440.
3. Dickey T. Emerging ocean observations for interdisciplinary data assimilation systems // J. Mar. Syst. — 2003. — Vol. 40–41. — P. 5–48.
4. Dickey T., Bidigare R. R. Interdisciplinary oceanographic observations: The wave of the future // Sci. Mar. (suppl. 1). — 2005. — Vol. 69. — P. 23–42.
5. Zhurbas V. M., Oh I. S. Drifter-derived maps of lateral diffusivity in the Pacific and Atlantic Oceans in relation to surface circulation patterns // J. Geophys. Res. — 2004. — Vol. 109. — doi:10.1029/2003JC002241.
6. Zhurbas V. M., Oh I. S. Lateral diffusivity and Lagrangian scales in the Pacific Ocean as derived from drifter data // J. Geophys. Res. — 2003. — Vol. 108. — doi:10.1029/2002JC001596.
7. Помыткин Б. А. Некоторые сведения о течениях в южной части Байкала // Метеорология и гидрология. — 1962. — № 1. — С. 1–2.
8. Шерстянкин П. П. Исследование горизонтальной диффузии в Южном Байкале с помощью пятен флуоресцирующей краски // Течения и диффузия вод Байкала. — Л.: Наука, 1970. — С. 132–136.
9. Верболов В. И. О коэффициентах горизонтального макротурбулентного обмена в прибрежной зоне Южного Байкала // Течения и диффузия вод Байкала. — Л.: Наука, 1970. — С. 122–131.
10. Тушинский С. Г. Экспериментальное исследование горизонтальной турбулентной диффузии в Южном Байкале // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. — 1973. — № 5. — С. 68–73.
11. Галкин Л. М., Рогозин А. А. Об одной возможности измерения компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии методом аэрофотосъемки пятен индикатора // Труды Гос. гидрол. ин-та. — 1977. — Вып. 232. — С. 49–54.
12. Коротенко К. А., Сухов А. Л. Экспериментальные исследования процессов турбулентной диффузии в Южном и Среднем Байкале // Гидрофизика и гидрология водоемов. — Новосибирск: Наука, 1991. — С. 30–36.
13. Течения в Байкале / Ред. А. Н. Афанасьев, В. И. Верболов. — Новосибирск: Наука, 1977. — 160 с.
14. Сокольников В. М. Течения и водообмен в Байкале // Труды Лимнол. ин-та СО АН СССР. — 1964. — Т. 5 (25). — С. 5–21.
15. Кротова В. А. Схема преобладающих течений в слое от 0 до 100 м. Июль–октябрь // Атлас Забайкалья. — М.; Иркутск: ГУГК, 1967. — С. 82–83.
16. Айнбунд М. М. Течения и внутренний водообмен в озере Байкал. — Л.: Гидрометеоздат, 1988. — 248 с.
17. Верболов В. И. Течения и водообмен в Байкале // Вод. ресурсы. — 1996. — Т. 23, № 4. — С. 413–423.
18. Ekman V. W. On the influence of earth's rotation on ocean currents // Arch. Math. Astron., Phys. — 1905. — Vol. 2, N 11. — P. 115–124.
19. Филатов Н. Н. Некоторые особенности турбулентного обмена в озерах // Изменчивость гидрофизических полей в озерах. — Л.: Наука, 1978. — С. 88–116.
20. Birchfield G. E. Wind-driven currents in large lake or sea // Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. — 1972. — Vol. 1, N 4. — P. 419–430.

*Поступила в редакцию 7 августа 2013 г.*