

В.А. Иванов, С.В. Мотыжев,  
А.П. Толстошеев, Е.Г. Лунев

*Морской гидрофизический институт, г. Севастополь*

### **ДРИФТЕРНЫЙ МОНИТОРИНГ КАСПИЙСКОГО МОРЯ В 2006 – 2008 гг.**

Приведены некоторые результаты первого дрейферного эксперимента в Каспийском море, осуществленного в 2006–2008 гг. Эксперимент обеспечивался шестью дрейфующими буями типа *SVP-BT*, разработанными в Морском гидрофизическом институте Национальной академии наук Украины. Представлены сведения о технических характеристиках дрейферов, методике интерполяции результатов траекторных измерений. Рассмотрены особенности циркуляции поверхностных вод в глубоководных районах Среднего и Южного Каспия. Приведены оценки энергетических характеристик компонент скорости поверхностных течений, результаты долговременных наблюдений поля атмосферного давления.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Каспийское море, дрейфтер, течение, траектория дрейфа.*

В ряде работ последних полутора десятилетий [1–3] приведены результаты модельных исследований мезомасштабной и крупномасштабной изменчивостей циркуляции поверхностных вод Каспийского моря. Независимо от методов моделирования общим для этих работ является явный дефицит информации о поверхностных течениях, полученной прямыми измерениями. Причем, если для шельфовых зон Северного и Среднего Каспия имеются данные натурных исследований, полученные почти 20 лет назад [4], то в отношении глубоководных районов моря можно говорить о практически полном их отсутствии. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности оценивания достоверности результатов модельных расчетов циркуляции вод Каспийского моря, что отмечается авторами работ [1–3]. Отчасти восполнить этот пробел позволил первый каспийский дрейферный эксперимент, осуществленный в 2006–2008 гг.

Дрейферные технологии в настоящее время являются ключевым сегментом системы оперативных глобальных наблюдений Мирового океана. Автономные поверхностные дрейфующие буи с передачей данных по каналам спутниковой связи обеспечивают получение достоверной информации практически в любых метеорологических условиях, а высокая оперативность и финансовая эффективность наблюдений такова, что получение подобной информации другими методами невозможно в силу несопоставимости затрат.

В 2006 г. в рамках международной программы «*NATO Science for Peace Project*» (участники – Азербайджан, Россия, США, Турция, Украина) был подготовлен и начат дрейферный эксперимент, цель которого – исследование верхнего слоя Каспийского моря и приземной атмосферы. Эксперимент обеспечивался шестью дрейфующими буями типа *SVP-BT*. Буи производства украинской фирмы ООО «НПФ Марлин-Юг» (см. сайт <http://www.marlin-yug.com/ru/index.php>) были разработаны в Морском гидрофизическом институте.

© В.А. Иванов, С.В. Мотыжев, А.П. Толстошеев, Е.Г. Лунев, 2011

те Национальной академии наук Украины. В табл. 1 <sup>1)</sup> приведены основные показатели назначения дрейфера *SVP-BT*, представляющего собой модификацию стандартного лагранжевого трассера с дополнительным датчиком температуры воды, расположенным на глубине около 12 м. Дрейферы оборудованы терминалами спутниковой системы сбора данных и определения координат платформ *Argos*.

Таблица 1. Основные показатели назначения дрейфующих буев *SVP-BT*

Измеряемый параметр				Номинальные горизонты измерения температуры воды, м	Погрешность измерения координат буя, м
атмосферное давление, гПа		температура воды, °C			
Δ	μ	Δ	μ		
≤ 1,0	0,1	≤ 0,1	0,04	0,2; 12,0	± 150 (класс 3) ± 350 (класс 2) ± 1 000 (класс 1)

Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе в октябре 2006 г. были развернуты дрейферы *SVP-BT* № 34265, № 34266 и № 34267; на втором – в июле 2008 г., – дрейферы *SVP-BT* № 34263, № 34264 и № 34268.

В табл. 2 приведены некоторые сведения об эксперименте, а на рис. 1 показаны точки развертывания и траектории дрейфов буев.

Таблица 2. Основные данные о каспийском эксперименте с дрейфующими буями *SVP-BT*

Этап	Номер дрейфера	Развертывание		Дата окончания работы (или обрыва паруса)	Время работы, сутки
		дата	координаты		
1	34265	05.10.06	41°45'07" с. ш. 50°14'45" в. д.	20.02.07	138
	34266		40°20'01" с. ш. 51°25'09" в. д.	05.01.07	92
	34267		38°59'10" с. ш. 51°19'24" в. д.	24.02.07	142
2	34263	19.07.08	41°47'17" с. ш. 50°16'27" в. д.	02.09.08	45
	34264	20.07.08	40°19'55" с. ш. 51°24'47" в. д.	12.12.08/09.08.08	144/19
	34268	21.07.08	38°59'39" с. ш. 51°20'28" в. д.	03.12.08	135

<sup>1)</sup> В табл. 1 приняты следующие обозначения:  
Δ – погрешность измерения;  
μ – цена единицы младшего разряда выходного кода;  
«класс» – служебный параметр, сопровождающий каждую обсервацию (измерение координат). – *Авт.*

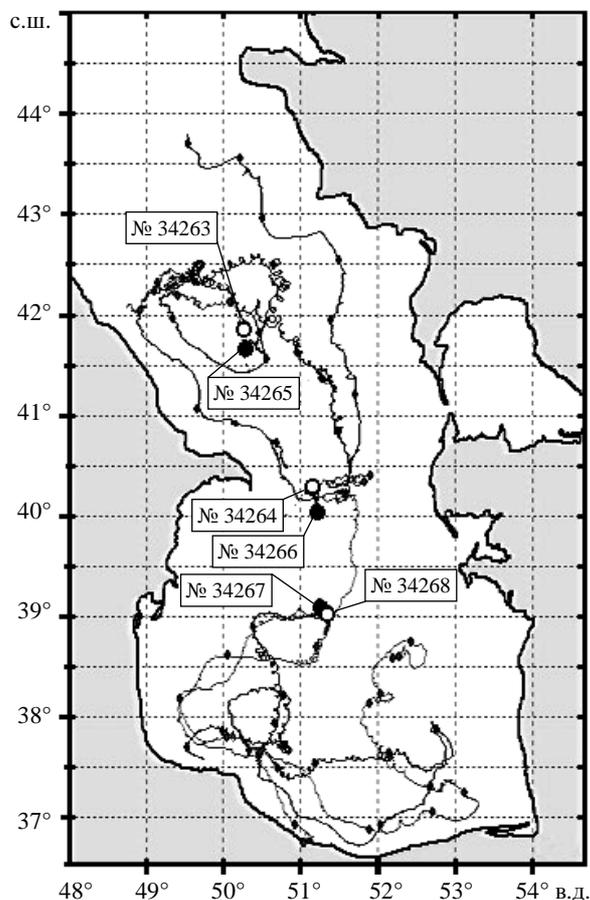


Рис. 1. Траектории дрейфов буев *SVP-BT* в Каспийском море в 2006 – 2008 гг. Крупные маркеры – точки разворачивания дрейфтеров. Черные маркеры меньшего размера на траекториях дрейфа – положение дрейфтеров с шагом в 10 суток.

Воспроизведение поверхностных течений по данным дрейфующих буев требует некоторых предварительных пояснений. Дрейфтер *SVP-BT* имеет свойства, близкие к свойствам лагранжевой частицы. Параметры его движения определяются параметрами движения слоя воды, в котором расположен подводный парус дрейфтера длиной 5 м с центром на глубине приблизительно 12,5 м. Соотношение между площадями паруса и остальных элементов составляет приблизительно 40:1. В этом случае при скорости ветра 10 м/с параметры движения буя соответствуют параметрам течения в слое размещения паруса с погрешностью не более 0,7 см/с [5].

При анализе необходимо также учитывать особенности траекторных измерений в спутниковой системе *Argos* – неравномерность интервалов времени между наблюдениями и погрешность доплеровского метода определения

координат. На рис. 2 показаны распределения количества наблюдений по интервалам времени между последовательными определениями координат.

Следует отметить сходство во временных структурах рядов координат для всех дрейфтеров независимо от района, условий и времени дрейфа. Вместе с тем около 20 % наблюдений следуют с интервалом не более 1 часа и почти 60 % – с интервалом от 1 до 2 часов. При этом во временных рядах координат могут присутствовать пропуски до 6 часов и более.

Традиционные способы отбраковки и линейной интерполяции таких данных оказываются вполне приемлемыми при изучении крупномасштабных процессов переноса поверхностных вод и приводят к значительным погрешностям при воспроизведении циркуляций мезомасштабного диапазона. Существенно расширить диапазон колебаний, восстанавливаемых по результатам дрейфтерных траекторных измерений, в область относительно высоких частот позволяет алгоритм обработки временных рядов координат, описание которого приведе-

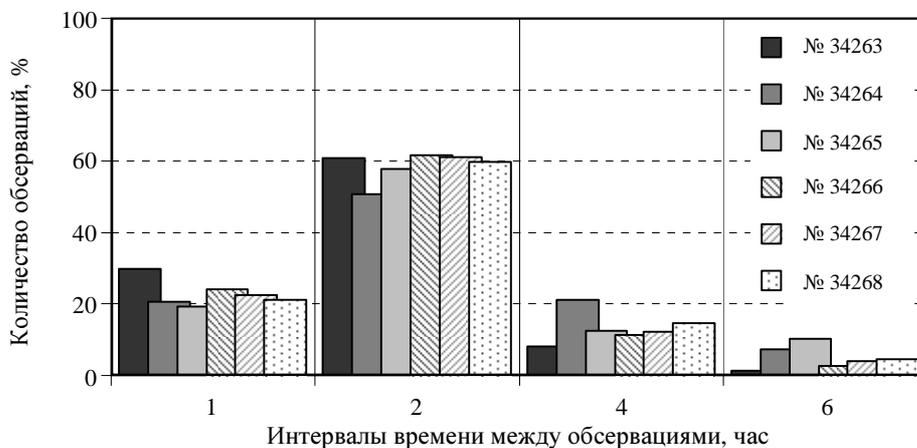


Рис. 2. Распределения количества наблюдений по интервалам времени между последовательными определениями координат по данным дрейфтеров.

но в статье [6]. Алгоритм реализует интерполяцию компонентов траекторий дрейфтеров на основе полиномиально-синусоидальной функции и позволяет воспроизводить траектории дрейфов с разрешением по времени в 1 час и с погрешностью, приблизительно на 20 % меньшей, чем при линейной интерполяции первичных данных. На рис. 3 показаны фрагменты траектории дрейфтера № 34265, построенные по первичным данным (*Argos*) и по результатам интерполяции на основе полиномиально-синусоидальной функции (*Argos Int*).

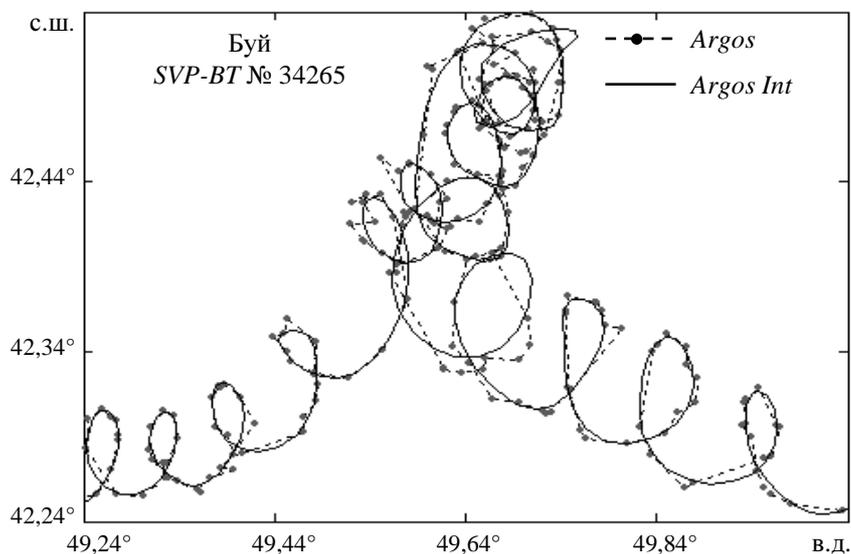


Рис. 3. Фрагменты траектории дрейфтера № 34265, построенные по первичным данным (*Argos*) и по результатам интерполяции на основе полиномиально-синусоидальной функции (*Argos Int*).

Метки на графике траектории по первичным данным соответствуют наблюдениям, полученным доплеровским методом системы *Argos*. Очевидно, что

предложенный метод интерполяции позволяет более достоверно восстанавливать пропущенные данные даже на участках дрейфа, где траектория буя определялась колебаниями вблизи инерционной частоты.

Последующий анализ траекторий дрейфтеров проводился с временными рядами координат, интерполированными описанным выше способом и представленными на рис. 4 и рис. 5. На этих же рисунках указаны средние ( $\bar{V}$ ) и наибольшие ( $V \max$ ) наблюдавшиеся значения модулей скорости дрейфов буев и их средние квадратические отклонения ( $\sigma$ ).

На первом этапе (см. рис. 4) каспийского эксперимента два дрейфтера (№ 34265 и № 34266) были развернуты в Среднем Каспии и № 34267 – в Южном. Полученные результаты относятся к осенне-зимнему периоду 2006 – 2007 гг.

Дрейфтер № 34265 был развернут в наиболее глубоководной части Дербентской впадины (см. рис. 4, а). Траектория его дрейфа определялась, главным образом, двумя типами движений – крупномасштабной циклонической циркуляцией и инерционными колебаниями. Наибольшая интенсивность инерционных колебаний наблюдалась на начальном участке дрейфа приблизительно до 5 ноября, когда буй вышел на западный свал глубин. Последующая траектория дрейфтера определялась циклоническим переносом поверхностных вод вдоль западного, южного и восточного склонов Дербентской впадины вплоть до окончания работы передатчика дрейфтера в районе северного участка изобаты 50 м.

Дрейфтер № 34266 был развернут в середине условной границы между Средним и Южным Каспием – линия «остров Жилой – мыс Кули». Траектория его движения (см. рис. 4, б), как и в предыдущем случае, воспроизводила циклоническую крупномасштабную циркуляцию поверхностных вод Среднего Каспия со значительным вкладом инерционных колебаний. Смещение траектории в западном направлении относительно траектории буя № 34265, дрейфовавшего в этом районе в начале зимы 2006 г., может быть связано с устойчивым воздействием восточного ветра, характерного для осеннего периода.

Траектория дрейфтера № 34267, развернутого в центральной части Южного Каспия (см. рис. 4, в), имеет более сложный вид. После первой недели дрейфа в западном направлении в районе наиболее глубоководной части Южнокаспийской котловины буй повернул на юг. С 24 октября по 4 ноября дрейфтер совершил полную антициклоническую циркуляцию диаметром около 70 км, на выходе из которой был вовлечен в инерционное движение с незначительным поступательным переносом. Средняя скорость инерционных колебаний составила 0,30 м/с, наибольшая – 0,49 м/с. Начиная с 24 ноября движение дрейфтера определялось циклоническим переносом вдоль южного и юго-восточного склонов Южнокаспийской котловины. В районе наиболее крутого участка восточного склона котловины 17 декабря траектория изменилась на противоположную. К середине февраля 2007 г. дрейфтер, двигаясь преимущественно в западном направлении, пересек Южнокаспийскую котловину и 17 февраля прекратил передачу данных. На начальном участке движения дрейфтера в западном направлении 21 декабря была зафиксирована наибольшая скорость дрейфа за время эксперимента – 1,02 м/с.

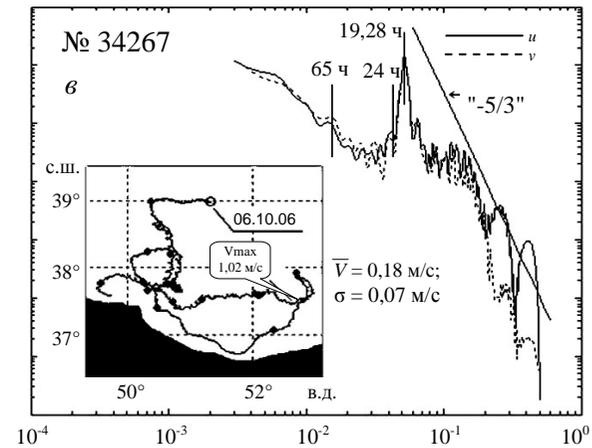
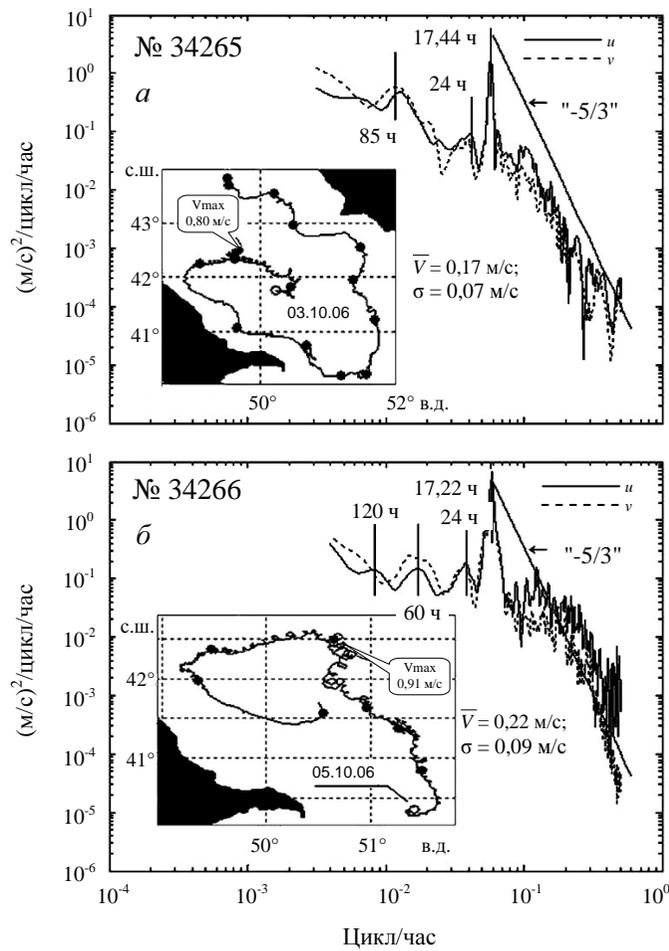


Рис. 4. Первый этап Каспийского эксперимента. Траектории «лагранжевых» дрейфов и спектральные плотности мощности компонент скорости по данным дрейфтеров:  $u$  – зональная составляющая скорости;  $v$  – меридиональная составляющая скорости.

Второй этап (см. рис. 5) каспийского эксперимента проводился в летне-осенний период 2008 г. Дрифтеры были развернуты 19 – 21 июля 2008 г. приблизительно в тех же точках, что и на первом этапе. Это позволило оценить сезонные различия в характерах циркуляций поверхностных вод.

Дрифтер № 34263 (см. рис. 5, а) был развернут в 4 500 м на северо-восток от точки развертывания дрифтера № 34265 (см. рис. 4, а) и двигался по траектории, близкой к траектории дрифтера № 34265 вплоть до прекращения работы в районе западного свала глубин.

Точка запуска дрифтера № 34264 (см. рис. 5, б) была расположена приблизительно в 600 м на юго-запад относительно координат развертывания дрифтера № 34266 (см. рис. 4, б). К сожалению, время жизни этого дрифтера как трассера оказалось очень коротким. Двигаясь преимущественно в восточном направлении вдоль Апшеронского порога, приблизительно на десятые сутки дрифтер вышел на восточный склон порога и в течение последующих десяти суток находился практически в одной точке с координатами  $40^{\circ}24'12''$  с. ш. и  $51^{\circ}54'00''$  в. д. После обрыва паруса 9 августа дрифтер покинул эту точку и далее его траектория определялась уже в большей степени ветровым воздействием. Объяснить такое поведение дрифтера можно было бы контактом нижней части подводного паруса с дном, что со временем привело к обрыву паруса. Однако, судя по карте глубин, указанная точка равноудалена от изобат 100 и 50 м, а нижнее кольцо паруса дрифтера находится на глубине около 15 м, что оставляет вопрос о причине такого поведения дрифтера открытым. Тем не менее, следует отметить, что траектория дрифтера № 34264 в июле 2008 г. (см. рис. 5, б) существенно отличалась от траектории дрифтера № 34266 в октябре 2006 г. (см. рис. 4, б) в течение соизмеримых интервалов времени.

Дрифтер № 34268 был развернут (см. рис. 5, в) в 1 800 м к северо-востоку от точки развертывания дрифтера № 34267 (см. рис. 4, в), а его траектория, как и траектория дрифтера № 34267, определялась в основном циклонической циркуляцией вдоль склонов Южнокаспийской котловины.

Полученные в результате эксперимента представительные ряды траекторных измерений позволяют оценить энергетические характеристики зональной и меридиональной компонент скорости циркуляций поверхностных вод глубоководных районов Каспийского моря. Спектральные плотности мощности (СПМ) компонент скорости рассчитывались по временным рядам координат, интерполированным на интервал 1 час так, как указано выше. Мы не проверяли ряды данных на выполнение условий стационарности, поскольку результаты такой проверки с учетом ограниченной продолжительности наблюдений сами по себе неоднозначны. Приводимые ниже оценки СПМ компонент скорости получены в предположении о стационарности временных рядов, хотя не исключается возможность альтернативной гипотезы.

Оценки СПМ рассчитывались по методу усреднения модифицированных периодограмм, или методу Уэлча, который состоит в том, что исходный временной ряд данных разбивается на перекрывающиеся сегменты и данные каждого полученного сегмента умножаются на используемую оконную функцию. Для взвешенных таким образом сегментов вычисляются модифицированные периодограммы. Полученная оценка СПМ представляет собой результат усреднения периодограмм всех сегментов. Такой метод обеспечивает получение гладких и статистически устойчивых оценок по конечному ряду данных.

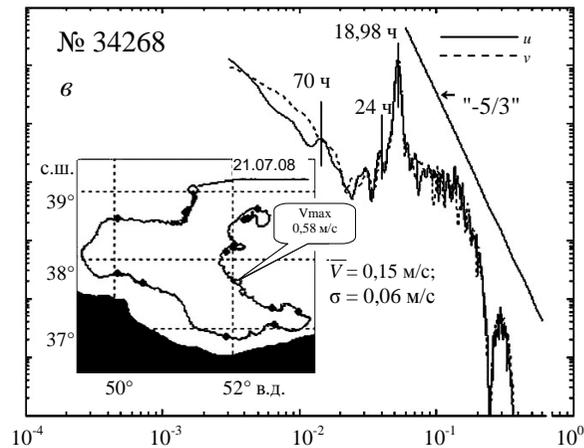
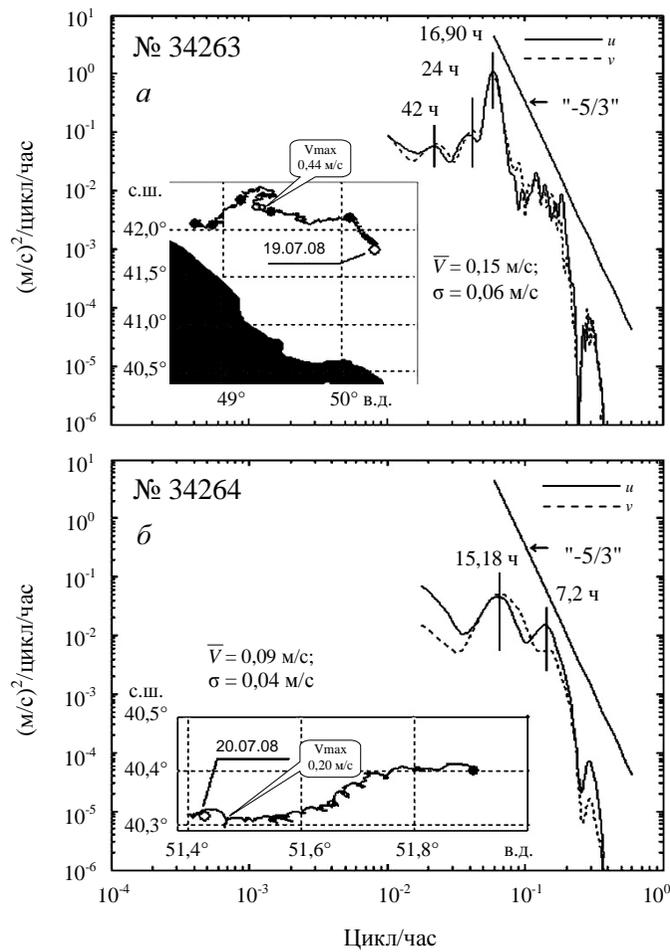


Рис. 5. Второй этап Каспийского эксперимента. Траектории «лагранжевых» дрейфов и спектральные плотности мощности компонент скорости по данным дрейфтеров:  $u$  – зональная составляющая скорости;  $v$  – меридиональная составляющая скорости.

Оценивание СПМ выполнялось по программе, реализованной в среде *MATLAB*, с помощью функции *pwelch*. Поскольку продолжительности реализаций по каждому дрейтеру различны (см. табл. 2), количество перекрывающихся сегментов, на которое разбивались временные ряды, выбиралось для каждого временного ряда различным из соображений обеспечения оптимального соотношения между устойчивостью и разрешением спектральных оценок. Для взвешивания данных в пределах каждого сегмента использовалась оконная функция Парзена. Коэффициент перекрытия сегментов был принят равным 50 %.

Оценки СПМ зональных ( $u$ ) и меридиональных ( $v$ ) компонент скорости дрейфа, рассчитанные по каждому временному ряду, графически представлены на рис. 4 и рис. 5. СПМ компонент скорости дрейтера № 34264 рассчитывалась по данным относительно короткого начального участка траектории дрейфа до обрыва подводного паруса и полученные для этого дрейтера оценки приведены с целью сохранения целостности картины эксперимента.

На спектрах всех временных рядов, кроме ряда дрейтера № 34264, абсолютные максимумы соответствуют частотам вблизи частоты инерционных колебаний. Различия в оценках этих частот по данным дрейтеров, траектории которых располагались в совместимых по широте районах, например, № 34265 и № 34263, № 34267 и № 34268, объясняются, по-видимому, суперпозицией инерционных колебаний и относительно низкочастотных циркуляций. Наклоны СПМ в области частот, принадлежащих инерционному интервалу, достаточно хорошо соответствуют «закону  $5/3$ » вплоть до интервала диссипации. Следует заметить, что в дрейтерном эксперименте была получена уникальная информация об изменчивости поверхностных течений глубоководных районов Каспия в инерционном интервале частот, подробный анализ которой выходит за рамки данной статьи.

В низкочастотных областях спектров энергетически значимыми являются максимумы СПМ на частотах, близких к частоте суточных колебаний. Также характерными практически для всех временных рядов являются возмущения скорости с периодами от 60 до 85 часов, распространяющиеся в циклоническом направлении.

Полученные оценки в сопоставимых пространственно-временных масштабах в основном соответствуют результатам моделирования по методу гидродинамической адаптации, приведенным в работах [2, 3]. Наряду с этим следует отметить некоторые расхождения. Наибольшие значения скоростей, рассчитанные по дрейтерным данным, в большинстве случаев существенно превышают модельные. Так, например, по данным указанных работ наибольшее значение скорости в июле составило приблизительно 0,27 м/с; по дрейтерным данным – 0,37 (дрейтер № 34263) и 0,38 м/с (№ 34268); в ноябре по данным модели – 0,22 м/с, по дрейтерным данным – 0,49 (дрейтер № 34267) и 0,90 м/с (№ 34266). Визуальный анализ траекторий дрейтеров, развернутых в Южном Каспии позволяет предположить существование относительно устойчивой циклонической циркуляции поверхностных вод в этой части моря, в то время как по данным работы [7] такая циркуляция наблюдается только в декабре и январе.

Кроме данных о поверхностных течениях в ходе каспийского дрейферного эксперимента были получены представительные с интервалом 1 час долговременные ряды данных об атмосферном давлении, температуре поверхности моря и температуре воды на глубине 12 м. На рис. 6 показаны графики временных рядов атмосферного давления и подповерхностной температуры, полученные в период с октября по февраль 2006 г. (дрейфтер № 34265, Средний Каспий). Наибольшее значение атмосферного давления за время наблюдений было зафиксировано 10 ноября 2008 г. (дрейфтер № 34268) и составило 1044,2 гПа, наименьшее – 28 января 2007 г. (дрейфтер № 34265) – 995,0 гПа; наибольший градиент давления составил 3,1 гПа/час 14 ноября 2006 г. (дрейфтер № 34265).

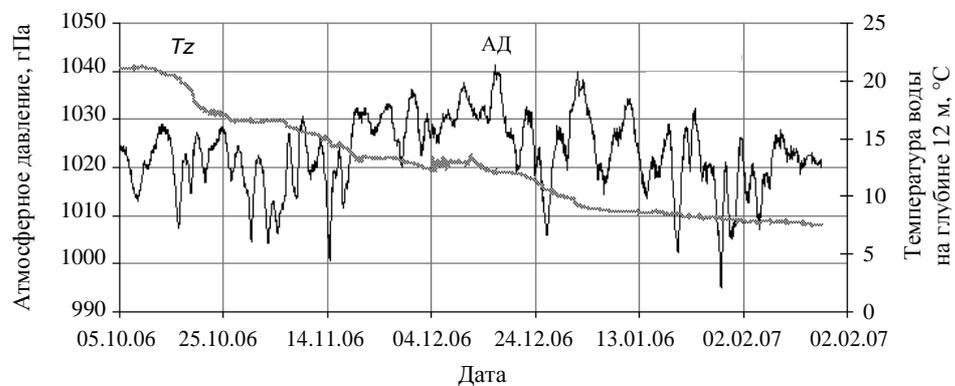


Рис. 6. Временные ряды данных об атмосферном давлении (АД) и температуре воды на глубине 12 м (Тz) по данным, полученным с помощью дрейфтера № 34265

Очевидно, что приведенные в статье результаты анализа не являются исчерпывающими. В ходе эксперимента получена уникальная для Каспийского моря, особенно для глубоководных его районов, информация, последующий анализ которой позволит уточнить существующие представления о циркуляции поверхностных вод, изменчивости параметров верхнего слоя моря и приводной атмосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Трухчев Д.И., Иванова Д.П. Сезонные особенности общей циркуляции вод глубоководной части Каспийского моря. // Метеорология и гидрология. – 1997, №1. – С. 91-99.
2. Ибраев Р.А., Саркисян А.С., Трухчев Д.И. Сезонная изменчивость циркуляции вод Каспийского моря, реконструированная по среднемноголетним гидрологическим данным // Известия РАН: Физика атмосферы и океана. – 2001, – т. 37, № 1. – С. 103-111.
3. Кныш В.В., Ибраев Р.А., Кортаев Г.К., Инюшина Н.В. Сезонная изменчивость климатических течений Каспийского моря, восстановленная ассимиляцией климатической температуры и солёности в модели циркуляции вод // Известия РАН: Физика атмосферы и океана. – 2008. – т. 44, № 2. – 251-265.
4. Бондаренко А.Л., Ведев Д.Л., Комков И.А., Щевьёв В.А. Экспериментальные исследования волновых течений в Среднем Каспии // Водные ресурсы. – 1993. – т. 20, № 1. – С.128-131.

5. *Griffa A., Kirwan A.D., Mariano A.J. et al.* Lagrangian analysis and prediction of coastal and ocean dynamics. – Cambridge: Cambridge University Press. – 2007. – P. 39-67.
6. *Толстошеев А.П.* Метод восстановления траекторий дрейфующих буев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2007. – вып. 15. – С. 392-396.
7. *Курдюмов Д.Г.* Исследование крупномасштабных и мезомасштабных гидродинамических процессов Каспийского моря: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.28. – М., 2004. – 130 с.

Материал поступил в редакцию 30.05.2011 г.