

И.А.Репина*, В.А.Дулов**, В.В.Малиновский**

**Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, г.Москва*

***Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

ВЛИЯНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СЛИКОВ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ДИНАМИКУ ПРИВОДНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Представлены предварительные результаты совместного российско-украинского эксперимента по выявлению влияния пленок на морской поверхности на турбулентность в приводном слое атмосферы. Эксперимент был проведен в октябре 2009 г. с океанографической платформы Морского гидрофизического института НАН Украины. Показано, что пленочный слик с характерным горизонтальным масштабом в сотни метров вызывает уменьшение аэродинамической шероховатости морской поверхности, сопровождающееся увеличением скорости ветра на фиксированном горизонте. Также обнаружено, что слик влияет на турбулентность приводного слоя атмосферы, приводя к возмущениям высокочастотных интервалов спектров турбулентных флуктуаций скорости, температуры, концентраций водяного пара и углекислого газа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *приводный слой атмосферы, пленки на морской поверхности, атмосферная турбулентность, параметр шероховатости морской поверхности.*

Энерго- и массообмен между океаном и атмосферой происходит непосредственно через поверхность океана и определяется следующими физическими процессами: испарением, эффективным излучением поверхности океана и контактной теплопроводностью в поверхностной пленке толщиной около 10 – 20 мкм. Изучение состава и структуры поверхностного микрослоя воды, который в значительной степени определяет физико-химические процессы, происходящие на границе раздела, очень важно. Понимание роли этого слоя является ключевым моментом в развитии представления о механизме процессов обмена у границы океана с атмосферой.

Изучение воздействия пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) и нефтепродуктов на характеристики ветровых волн и динамику приводного слоя атмосферы в настоящее время представляет значительный интерес, прежде всего в связи с задачами спутникового мониторинга океана, разработкой дистанционных методов идентификации и диагностики техногенных загрязнений различных акваторий, а также зон повышенной биологической продуктивности [1, 2]. Однако пленки нефти в районах ее интенсивной добычи, как и пленки биогенного происхождения в естественных условиях, могут занимать существенную (до десятков процентов [3, 4]) часть морской поверхности. Изменяя физические свойства нижней границы приводного атмосферного погранслоя, пленки влияют на обмен импульсом, теплом и веществом между атмосферой и морем. Оценка таких эффектов представляет очевидный интерес и для развития оперативных моделей прибрежных акваторий, включая моделирование экосистем, и для климатических исследований.

Прежде всего, пленки подавляют самые короткие ветровые волны и их обрушения [1 – 9], уменьшая шероховатость морской поверхности и, таким образом, влияя на турбулентность приводного атмосферного пограничного слоя [5, 10 – 14]. Численные расчеты [15], выполненные на базе модели согласованного турбулентного приводного атмосферного слоя и спектра коротких ветровых волн [16], показали, что над пленкой коэффициент аэродинамического сопротивления и коэффициент турбулентного теплообмена для стандартного горизонта 10 м уменьшаются, но не более чем на 15 и 9 % соответственно. Согласно этим расчетам увеличение скорости ветра над слишком на горизонте 5 м весьма незначительное (0,5 %). В то же время натурные наблюдения [3] указывают на более выраженный эффект.

Наличие пленок влияет также на интенсивность потока CO_2 через водную поверхность [17, 18]. Лабораторные измерения указывают на явную зависимость интенсивности газообмена от дисперсии уклонов поверхностных волн [19], которая падает в присутствии пленок. Кроме того, пленки также подавляют турбулентность в тонких диффузионных слоях непосредственно прилегающих к поверхности [20], что приводит к сильным изменениям коэффициентов газообмена между водой и воздухом [18].

Эмпирическая информация об описанных эффектах в натуральных условиях остается крайне скудной. Это связано с трудностью проведения и, в особенности, организации соответствующих экспериментов. Действительно, кроме создания на морской поверхности пленок достаточно больших размеров, требуется провести синхронные измерения характеристик турбулентности в слоях воздуха и воды, прилегающих к поверхности раздела, поверхностных волн различных масштабов, а также турбулентных потоков, включая потоки газовых составляющих. Такие эксперименты возможны лишь при объединении усилий нескольких исследовательских групп [21].

В октябре 2009 г. на океанографической платформе Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины в Кацевели оказалась сосредоточенной необходимая для такого рода работ измерительная аппаратура Института физики атмосферы РАН, МГИ, Института океанологии РАН, Института космических исследований РАН и *Института радиофизики и электроники РАН*. Используя это обстоятельство, был осуществлен совместный российско-украинский эксперимент по исследованию влияния пленок на прилегающие турбулентные слои воздуха и воды. Цель данного сообщения – представить предварительные результаты этого исследования.

Натурный эксперимент проводился с 28 сентября по 25 октября 2009 г. на базе Экспериментального отделения МГИ с Океанографической платформы, расположенной на удалении от берега более полукилометра, где глубина моря достигает 30 м. Ветровые режимы в районе платформы описаны в ряде работ [22, 23]. Для выполнения экспериментов выбирались условия стабильного ветра, направленного со стороны моря. При этом турбулентный приводный слой атмосферы не возмущается влиянием берега, и его можно считать соответствующим чисто морским условиям [23].

Работы проводились по следующей методике. На морской поверхности создавалась искусственная пленка с характерным размером 100 м и более.

Синхронные записи всей задействованной аппаратуры выполнялись в течение получаса до прохождения пленки под платформой, во время прохождения пленки, которое длилось примерно 15 мин, и в течение получаса после прохождения пленки. Таким образом, возникала возможность выделения эффектов пленки на естественном фоне.

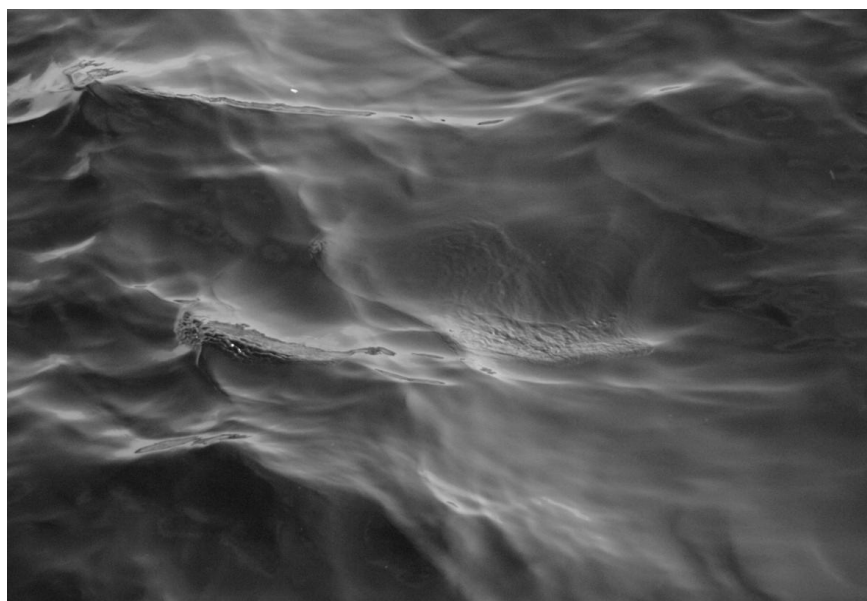
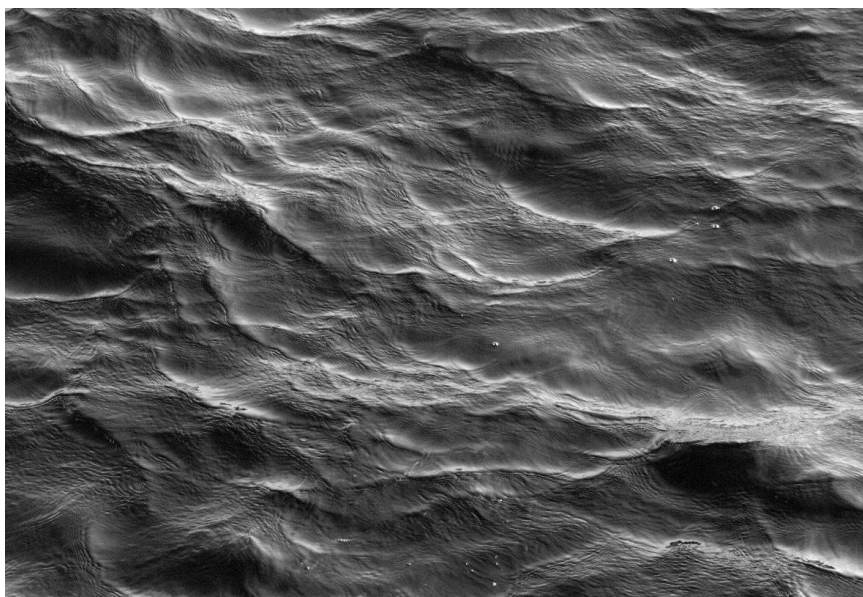
Для создания искусственных пленок использовалось подсолнечное масло, которое распыскивалось по морской поверхности с моторного катера [2]. Примерно за полчаса до планируемого прохождения пленки катер заходил с наветренной стороны платформы и начинал движение зигзагообразными галсами по специально разработанной схеме. При этом по поверхности моря разбрызгивалось до 2 л масла. Распространяясь по поверхности, пятна масла создавали тонкую, предположительно мономолекулярную, пленку, размер которой за полчаса достигал 100 м или более. Благодаря движению под воздействием ветра и переносу течением пленка приближалась к платформе и проходила под ней.

На рис.1 показано образование слика и его прохождение под платформой. Пленка видна на фотографиях благодаря сглаживанию самых коротких ветровых волн. Этот явный эффект продемонстрирован на рис.2, где приведены фотографии морской поверхности с достаточным разрешением, сделанные до и во время прохождения слика под платформой.

Во время экспериментов работала вся аппаратура, представленная в статьях [24 – 28], включенных в настоящий сборник трудов.



Рис. 1. Образование слика и его прохождение под платформой (18 октября 2009 г.).



Р и с . 2 . Фотографии морской поверхности до прохождения слика (*сверху*) и в области слика (*снизу*) (13 октября 2009 г.). Размеры области, одинаковые в обоих случаях, примерно соответствуют 2 м по горизонтали и 4 м по вертикали.

Для измерения скорости ветра и температуры воздуха, а также их пульсаций использовался анемометр-термометр *USA-1*, разработанный немецкой фирмой *МЕТЕК*. Прибор крепился на 6-ти м выносе, чтобы максимально избежать влияния конструкций платформы. Для диагностики качества прямых измерений проводился спектральный анализ измеряемых величин. Измерения проводились на высоте 4 м над поверхностью с частотой 10 Гц. Прибор был совмещен и синхронизирован с газоанализатором

Т а б л и ц а 1. Условия экспериментов.

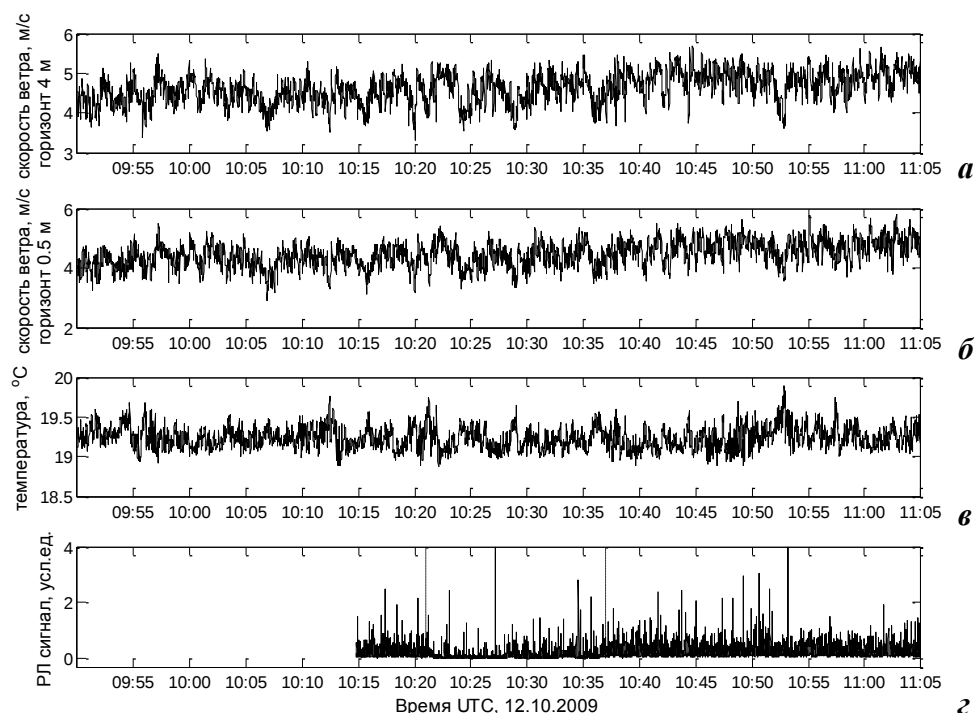
номер эксперимента	№ 1	№ 2	№ 3
дата	12.10.2009 г.	13.10.2009 г.	18.10.2009 г.
время GMT	9:54 – 11:04	6:53 – 7:56	12:54 – 13:47
направление ветра, °	92	88	58
U_{23} , U_4 , $U_{0,5}$, м/с	5,4; 4,64; 4,47	7,9; 6,22; 6,16	4,7; 4,18; 3,95
температура воздуха, °C	19,2	18,7	20,9
температура воды, °C	20,8	20,7	20,0
H_S , м	0,79	0,54	0,34
направление волн зыби (откуда), °	100	100	70
f_S , f_W , Гц	0,17; 0,5	0,36; 0,8	0,24; 0,8

ром *LiCorr 7500*, измеряющим пульсации концентраций водяного пара и углекислого газа. Пульсации двух компонент скорости ветра непосредственно над волнами измерялись акустическим анемометром *WindSonic*, закрепленном на высоте 0,5 м над морской поверхностью. Измерения скорости и направления ветра с дискретностью 1 мин выполнялись также на высоте 23 м. Температура воды измерялась контактным датчиком на глубине 0,5 – 1 м с дискретностью 1 мин.

В табл.1 приведены время записей и средние метео-волновые характеристики: направление ветра и его скорость на горизонтах измерения 23; 4 и 0,5 м (соответственно U_{23} , U_4 , $U_{0,5}$), температуры воды и воздуха, значительная высота волн H_S и их направление, частоты спектральных пиков зыби f_S и ветровых волн f_W . Пик ветровой системы в спектре волнения выделялся очень слабо, его оценка получена по методике [25]. В эксперименте 2 на поверхности моря постоянно наблюдались обрушения ветровых волн, в эксперименте 1 наблюдались редкие отдельные события обрушений.

Результаты. Шероховатость морской поверхности. На рис.3 – 5 приведены исходные записи горизонтальных скоростей в воздухе на горизонтах измерений 4 и 0,5 м, температуры воздуха на горизонте 4 м и радиолокационного сигнала на длине электромагнитной волны 8 мм с горизонтальными поляризациями излучателя и приемника [28]. Отметим, что из-за медленного движения слика со скоростью в несколько сантиметров в секунду [2] довольно трудно определить момент прохождения границы пленочного пятна под платформой, опираясь только на визуальные наблюдения. Однако в сигнале радиолокатора область пятна видна довольно определенно (рис.3 – 5). На рисунках также отмечены моменты времени t_1 и t_2 (вертикальные линии на записях радиолокатора), соответствующие границам пятна.

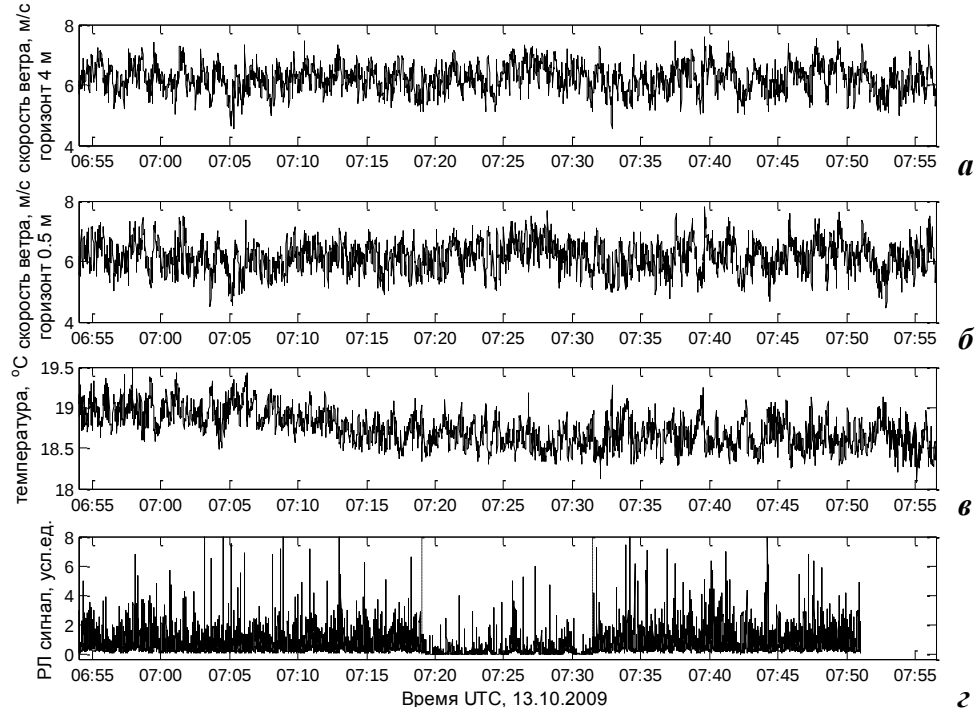
На рис.6 показана изменчивость средних величин, рассчитанных для каждого эксперимента по пяти последовательным интервалам времени с границами $t_1 - 2Dt$, $t_1 - Dt$, t_1 , t_2 , $t_2 + Dt$, $t_2 + 2Dt$, где $Dt = t_2 - t_1$, так что средние точки на графиках соответствуют слику. Средние величины направления ветра, скорости ветра на горизонте 23 м и температуры воды, отражающие фоновые процессы в воде и воздухе, демонстрируют, что эксперименты были проведены в квазистационарных внешних условиях.



Р и с . 3 . Исходные записи 12 октября 2009 г.: горизонтальные скорости на высотах 4 (а) и 0,5 (б) м, температура на высоте 4 м (в), радиолокационный сигнал (г). Вертикальные линии на нижнем графике отмечают область слика.

Как следует из рис.3 – 6, закономерности в проявлении слика в исходных записях скорости ветра на горизонтах 4 и 0,5 м и температуры воздуха не выделяются явным образом, хотя над сликом иногда имеет место слабое возрастание скорости ветра (№ 2) или ее турбулентных флуктуаций (№1, 3). Однако необходимо отметить, что измерения были проведены при различных режимах стратификации воздушного слоя (табл.1).

Шероховатость водной поверхности вызывается действием прилегающего к ней движущегося слоя воздуха и поддерживается за счет передачи импульса и энергии от атмосферы. Элементы шероховатости вносят вклад в сопротивление воздушному потоку, обтекающему водную поверхность, а их вертикальный размер пропорционален некоторому масштабу длины, известному как параметр шероховатости z_0 . Как следует из радиолокационных записей (рис.3 – 5) и прямых визуальных наблюдений (рис.2), шероховатость морской поверхности над сликом уменьшается. Если профиль скорости приведен к нейтральной стратификации, то параметр шероховатости можно оценить как $z_0 = z \exp(-\kappa U(z)/u_*)$, где $U(z)$ – средняя скорость ветра на горизонте z , $\kappa = 0,4$ – постоянная Кармана, u_* – динамическая скорость в воздухе. Экспериментальное определение параметра шероховатости крайне затруднено, ибо он в значительной степени зависит от стратификации атмосферы [29]. Для расчета коэффициента сопротивления и параметра шероховатости для нейтральных условий при различных ти-



Р и с . 4 . Исходные записи 13 октября 2009 г.: горизонтальные скорости на высотах 4 (а) и 0,5 (б) м, температура на высоте 4 м (в), радиолокационный сигнал (г). Вертикальные линии на нижнем графике отмечают область слика.

пах стратификации использовалась следующая схема [30]:

$$z_0 = z \exp\left(-\frac{\kappa}{\sqrt{C_{Dn}}}\right), \quad (1)$$

где

$$C_D = \left(\frac{u_*}{U}\right)^2. \quad (2)$$

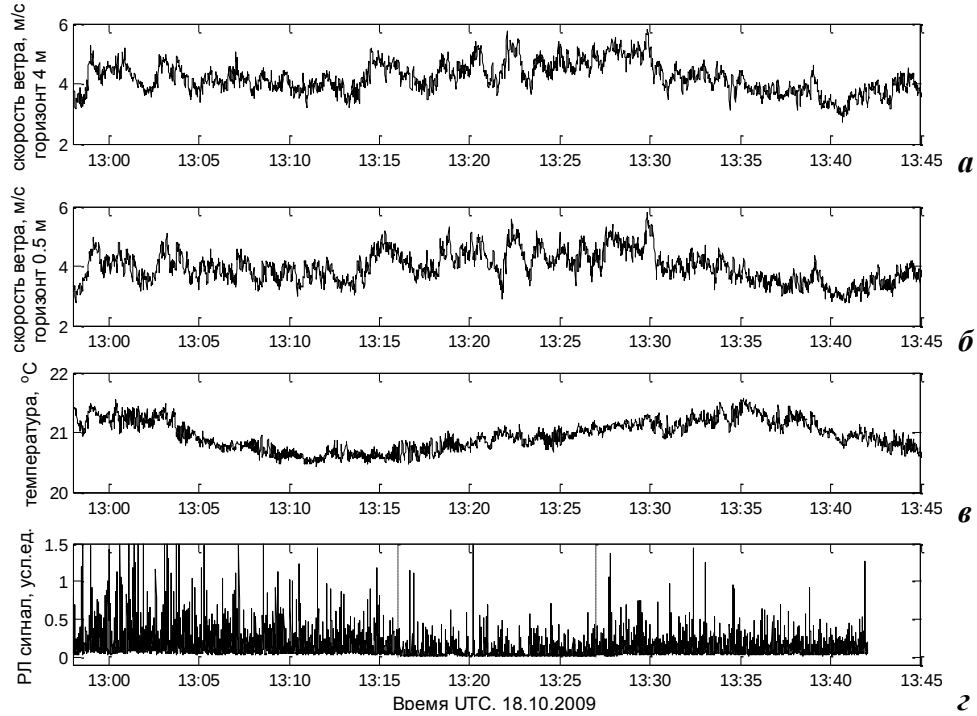
Профиль скорости ветра с поправкой на стратификацию атмосферы:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_u\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi_u\left(\frac{z_0}{L}\right) \right]. \quad (3)$$

Введем обозначение: $\zeta = \frac{z}{L}$, $\Psi_u = \int_0^{\zeta} \frac{1 - \Phi_u(\xi)}{\xi} d\xi$, где $\Phi_u(\xi)$ – универсальная функция, описывающая профиль ветра. Из (3) следует:

$$C_{Dn}^{-1/2} = C_D^{-1/2} + \frac{\Psi_u(\zeta)}{\kappa}. \quad (4)$$

Рассмотрим расчет универсальных функций для различных стратификаций.



Р и с . 5. Исходные записи 18 октября 2009 г.: горизонтальные скорости на высотах 4 (а) и 0,5 (б) м, температура на высоте 4 м (в), радиолокационный сигнал (г). Вертикальные линии на нижнем графике отмечают область слика.

1. Неустойчивая стратификация $\frac{z}{L} < -0,05$ [31]:

$$\Psi_u(\zeta) = \frac{\Psi_{kanzas} + \zeta^2 \Psi_{convectiv}}{1 + \zeta^2}, \quad (5)$$

$$\Psi_{kanzas} = 2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) - 2 \arctan x + \frac{\pi}{2}, \quad (6)$$

$$\Psi_{convectiv} = \frac{3}{2} \ln \frac{y^2 + y + 1}{3} - \sqrt{3} \arctan \frac{2y+1}{\sqrt{3}} + \frac{\pi}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

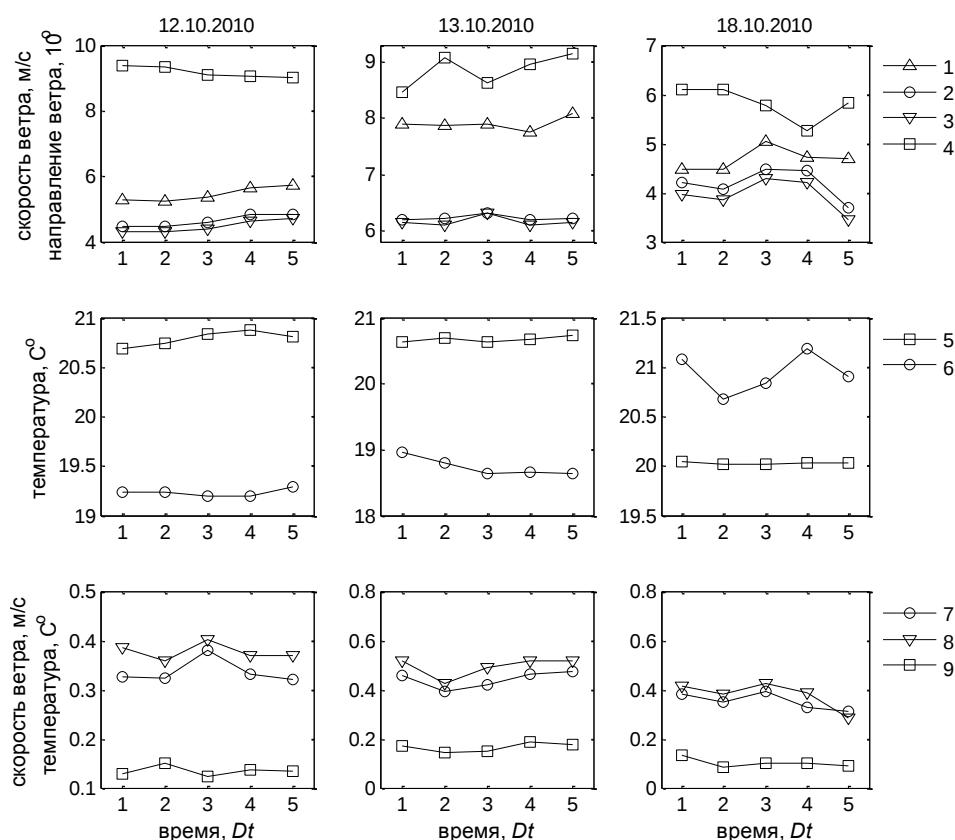
где $x = (1 - 16\zeta)^{1/4}$, $y = (1 - 13\zeta)^{1/3}$.

2. Нейтральная стратификация: $-0,05 < \frac{z}{L} < 0,05$ [32]:

$$\Psi_u(\zeta) = 0, \quad C_{Dn} = C_D.$$

3. Устойчивая стратификация $\frac{z}{L} > 0,05$ [33]:

$$\Psi_u(\zeta) = 0,61 + 5 \frac{z}{L}. \quad (8)$$



Р и с . 6. Средние атмосферные характеристики в зависимости от времени: скорость ветра U_{23} (1), U_4 (2), $U_{0,5}$ (3); направление ветра (4); температуры воды (5) и воздуха (6); среднеквадратичные флуктуации U_4 (7), $U_{0,5}$ (8) и температуры воздуха (9).

Здесь C_D – коэффициент сопротивления, z_0 – параметр шероховатости, U – скорость ветра м/с, C_{Dn} – коэффициент сопротивления для нейтральных условий, z – высота измерений, u_* – динамическая скорость ветра, L – масштаб Монина-Обухова, $\zeta = z/L$ – параметр устойчивости.

В табл.2 представлен параметр шероховатости, полученный по данной схеме, и скорость ветра, приведенная к стандартному горизонту 10 м.

Таким образом, пленка ПАВ влияет на аэродинамическое сопротивление поверхности. Во время прохождения слика параметр шероховатости уменьшается, в то время как скорость ветра возрастает. Отрицательные корреляции скорости ветра и интенсивности поверхностной ряби при слабых ветрах наблюдались и ранее [34]. Однако эффект имеет место также и в эксперименте № 1, т.е. при умеренном ветре с наличием обрушений на морской поверхности.

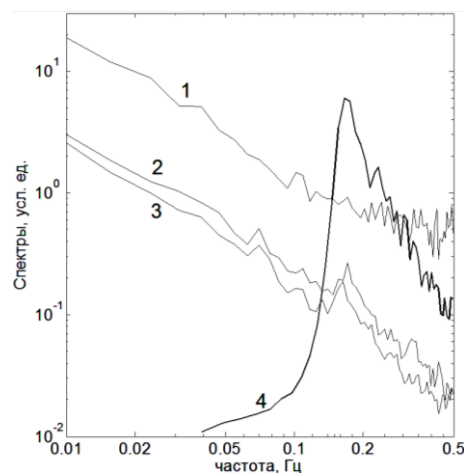
Спектры турбулентных пульсаций. На рис.7 представлен характерный вид фоновых спектров турбулентных пульсаций горизонтальной скорости и температуры воздуха. Спектры построены для эксперимента № 1 за период 1 ч, охватывающий прохождение слика. На рисунке также приведен спектр волнения. Как следует из графиков, в спектрах пульсаций горизонтальной

Т а б л и ц а 2. Параметр шероховатости и скорость ветра на стандартном горизонте.

состояние поверхности	параметр шероховатости z_0 , см	скорость ветра U_{10} , м/с	время осреднения, мин
12 октября 2009 г. (№ 1)			
до слика	0,196	7,5	20
прохождение слика	0,079	7,9	15
после слика	0,095	7,8	10
13 октября 2009 г. (№ 2)			
до слика	0,059	4,2	18
прохождение слика	0,023	4,8	13
после слика	0,048	4,3	15
18 октября 2009 г. (№ 3)			
до слика	0,051	4,1	10
прохождение слика	0,018	4,6	15
после слика	0,043	3,8	15

скорости наблюдаются волновые возмущения на частотах спектрального пика зыби. Этот факт соответствует ранее полученным результатам [35, 36]. В спектре температуры волновые возмущения отсутствуют. Общая картина, показанная на рисунке, остается такой же и для других экспериментов.

Чтобы выявить влияние пленки в наших экспериментах, мы вынуждены рассматривать спектры, построенные по меньшим (пятнадцатиминутным) интервалам записей. Пленка не влияет на волны зыби, но подавляет ветровые волны с самыми высокими частотами. Поэтому над пленкой



Р и с . 7 . Спектры турбулентных пульсаций температуры воздуха (1), горизонтальных скоростей $U_{0.5}$ (2) и U_4 (3), и спектр возвышений морской поверхности (4) для эксперимента № 1.

можно ожидать уменьшения интенсивности потока импульса именно в высокочастотной области. Это предположение подтверждается формой кросс-спектров горизонтальной и вертикальной скоростей ветра. На рис.8 в качестве примера приведены кросс-спектры вертикальной и горизонтальной скоростей ветра для эксперимента № 3, рассчитанные по измерениям над чистой поверхностью и над поверхностью, покрытой пленкой.

Рис.8 также указывает, что турбулентная структура воздушного потока меняется в зависимости от состояния прилегающей морской поверхности. Это подтверждается спектральным анализом других измеряемых атмосферных характеристик. Интересно отметить возмущение спектра pulsa-

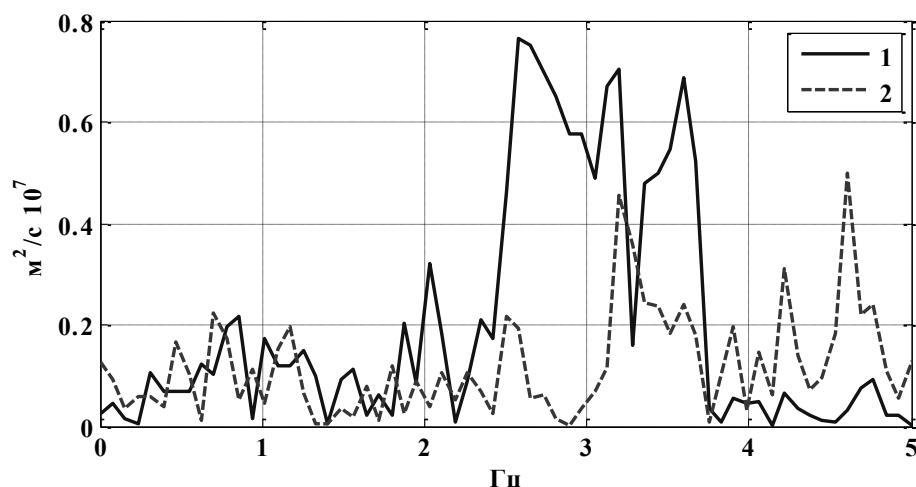


Рис. 8. Кросс-спектр горизонтальной и вертикальной скоростей воздушного потока при прохождении над чистой поверхностью (1) и поверхностью, покрытой пленкой (2). Эксперимент № 3.

ций концентрации углекислого газа, показанное на рис.9. Этот график с очевидностью указывает, что пленки действительно влияют на газообмен.

Если в низкочастотной части спектры фрагментов реализаций над пленкой и в ее отсутствии практически подобны, то на частотах, больших 2 – 4 Гц, появляются отличия. Такие возмущения в высокочастотной части спектров наблюдаются для всех сигналов над всеми исследуемыми слайками.

Крупномасштабная временная структура возмущений. Поскольку пленка вызывает возмущения атмосферного пограничного слоя, интересно рассмотреть его структуру на масштабах, сравнимых с масштабом пленки. Для этого был применен вейвлет-анализ, позволяющий выявлять эволюцию возмущений в исследуемом сигнале [37].

Для проведения анализа ряда с целью определения его структурных особенностей наиболее удобно непрерывное вейвлет-преобразование

$$T(a,b) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Здесь g обозначает вейвлет, h – анализируемый сигнал. Параметр a определяет масштаб, параметр b (сдвиг) задает временную локализацию вейвлета. В нашей работе использовался вейвлет Морле

$$g(t) = e^{-t^2/2} \cos(5t),$$

т.е. плоская волна, модулированная гауссианой. Этот вейвлет дает результаты, наиболее согла-

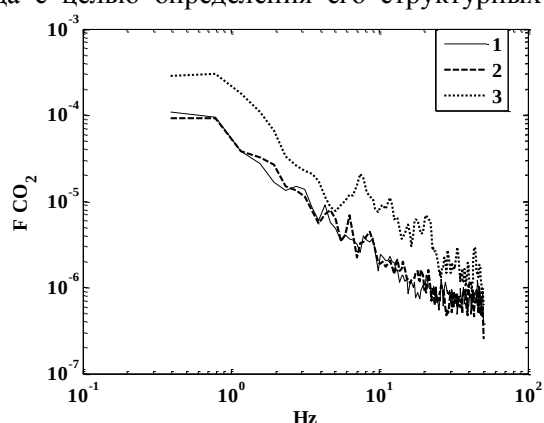


Рис. 9. Спектр пульсаций концентрации углекислого газа (эксперимент № 1): до прохождения слайка (1), при прохождении слайка (2), после прохождения слайка (3).

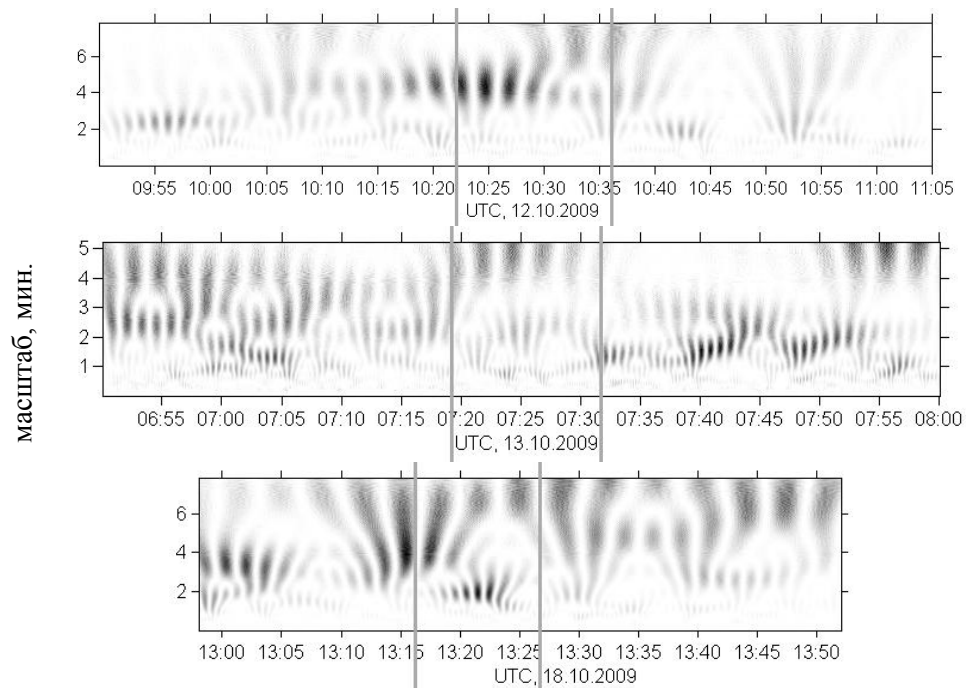
сованные с терминами Фурье-анализа. В частности, понятие масштаба полностью соответствует периоду гармонических компонентов. $T(a, b)$ – коэффициенты вейвлет-преобразования, распределение квадратов которых по сдвигам и масштабам (скейлограмма) позволяет на качественном уровне рассматривать эволюцию возмущений во времени и в частотной области.

Фрагменты скейлограмм для скорости U_4 для всех экспериментов приведены на рис.10. Квадрат вэйвлет-коэффициентов показан интенсивностью серого тона, так что чем темнее тон, тем выше «вэйвлет-энергия». Здесь явно выделяются квазипериодические возмущения с масштабом 4 – 5 мин, которые усиливаются в области слика. Чтобы подчеркнуть этот эффект, просуммируем вейвлет-энергию по масштабам

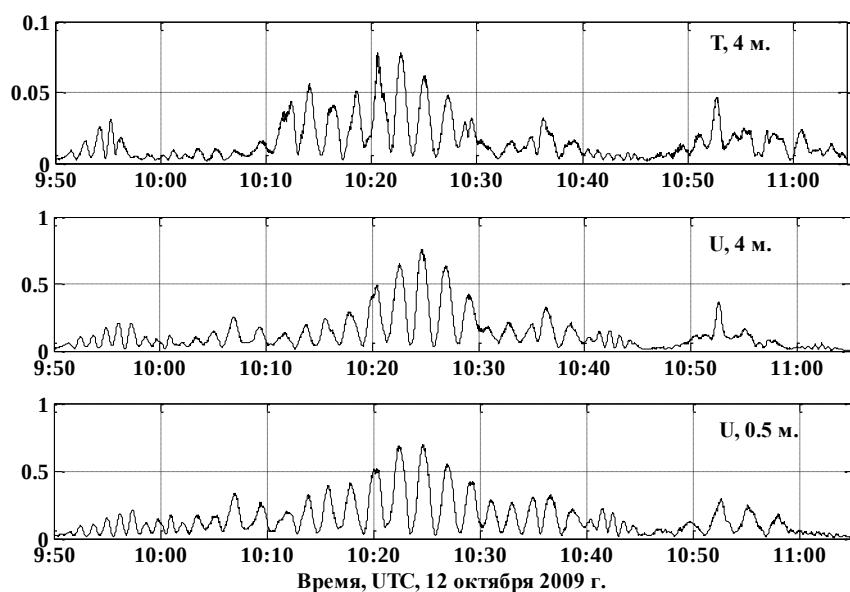
$$E(t) = M^{-1} \sum_{a=1}^{a=M} (T(a, b))^2 ,$$

где $M = 256$ – предельный масштаб вейвлет-преобразования, соответствующий 5 мин. Полученная функция на качественном уровне отражает интенсивность всех турбулентных процессов с масштабами меньшими 5 мин в каждый момент времени.

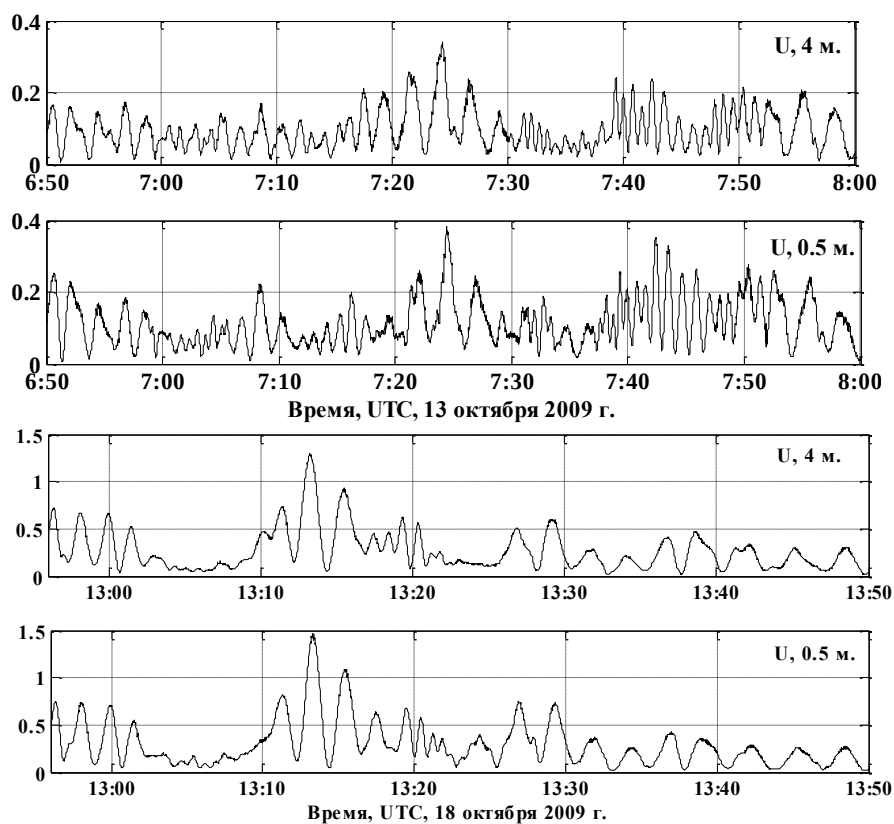
На рис.11 – 12 показана плотность $E(t)$ для скорости ветра на высотах 4 и 0,5 м для всех экспериментов. На графиках для скорости ветра в областях всех сликов действительно наблюдается усиление возмущений. Возмущения наиболее интенсивны в окрестности передней (подветренной) границы слика. Далее, с приближением задней (наветренной) границы они затухают,



Р и с . 1 0 . Скейлограммы для скорости ветра на горизонте 4 м. Квадрат вэйвлет-коэффициентов показан интенсивностью серого тона (чем темнее, тем выше). Время прохождения слика отмечено вертикальными линиями.



Р и с . 1 1 . Временная развертка вейвлет-энергии для скоростей ветра на двух высотах и температуры воздуха на высоте 4 м в эксперименте № 1.



Р и с . 1 2 . Временная развертка вейвлет-энергии для скоростей ветра на двух высотах для экспериментов № 2 и № 3.

а после прохождения границы наблюдается их некоторое усиление. Такая картина указывает на возможную важность пограничных эффектов при формировании возмущений атмосферного погранслоя над сликом конечных размеров. Отметим, что в эксперименте № 1 это явление проявилось также в записи температуры воздуха на высоте 4 м (рис.11).

Заключение. Проведенные эксперименты убедительно показали, что пленки ПАВ на морской поверхности влияют на структуру турбулентности приводного слоя атмосферы. Даже относительно небольшие по площади пленочные пятна (линейный размер около 100 м) способны вызывать изменения в спектрах турбулентных флуктуаций характеристик атмосферы. Если пленки растительного масла воздействуют на процессы в приводном слое атмосферы, то можно ожидать, что нефтяные загрязнения, которые изменяют шероховатость морской поверхности еще более значительно, также будут проявляться в характеристиках атмосферной турбулентности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 08-05-00099) и Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (контракт Ф28/435-2009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Malinovsky V., Sandven S., Mironov A., Korinenko A.* Identification of oil spills based on ratio of alternating polarization images from ENVISAT // Proc. geoscience and remote sensing symposium, IGARSS'2007. IEEE Int.– 2007.– v.2.– P.1326-1329.
2. *Ермаков С.А., Сергеевская И.А., Капустин И.А., Макаров Е.В., Малиновский В.В., Кориненко А.Е.* Растекание и дрейф пленок в поле ветра и течений. Натурные эксперименты с океанографической платформы МГИ НАНУ // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.21.– **С.**
3. *Ermakov S.A., Panchenko A.R., Salashin S.G.* Film slicks on the sea surface and some mechanisms of their formation // Dyn. Atm. Ocean.– 1992.– v.16.– P.279-304.
4. *Frew N.M., Bock E.J., Nelson R.K., McGillis W.R., Edson J.B., Hara T.* Spatial variations in surface microlayer surfactants and their role in modulating air-sea exchange / Gas transfer at water surfaces. Eds by M.A.Donelan, E.S.Saltzman, R.Wanninkhof, W.M.Drennan.– AGU Press: Geophysical Monograph Series, 2002.– v.127.– P.153-159.
5. *Scott J.C.* The historical development of theories of wave-calming using oil.- Rep.81, Univ. of Essex, Colchester, England, 1977.– 98 с.
6. *Hutthnerfuss H., Alpers W., Jones W.L., Langea A., Richter K.* The damping of ocean surface waves by a monomolecular film measured by wavestaffs and microwave scatterometers // J. Geophys. Res.– 1980.– 86.– P.2016-2035.
7. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика.- М.: Физматгиз, 1959.- 699 с.
8. *Alpers W., Huhnerfuss H.* The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // J. Geophys. Res.– 1989.– v.94, C5.– P.6251-6265.
9. *Кудрявцев В.Н., Иванова Н.А., Гуцин Л.А., Ермаков С.А.* Оценка контрастов спектра ветровых волн в сликах, вызванных биогенными и нефтяными пленками / Препринт № 765.– Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2008.– 30 с.
10. *Barger W.R., Garrett W.D., Mollo-Christensena E.L., Ruggles K.* Effects of an artificial sea slick upon the atmosphere and the ocean // J. Appl. Meteorol.– 1970.– 9.– P.196-400.
11. *Mallinger W.D., Mickelson T.P.* Experiments with monomolecular films on the surface of the open sea // J. Phys. Oceanogr.– 1973.- 3.– P.328-336.

12. *Hutthnerfuss H., Lange P.* Modification of the air-sea interaction processes by monomolecular films. 1. A new method for producing artificial sea slicks // *Berichte des Sonderforschungsbereich.*– 1975.– 4.– P.195-228.
13. *Алексеев В.В., Баранов А.П., Кокорин А.О., Шереметьев В.М.* Влияние нефтяных продуктов на интенсивность газообмена между океаном и атмосферой // *Вест. МГУ.*– сер.3. Физика и астрономия.– 1985.– 26, № 3.– С.71-74.
14. *Балуев С.А., Бартковский Р.С., Тимановский Д.Ф.* Лабораторные исследования влияния загрязнения воды на генерацию брызг // *Тр. ГГО.*– 1987.– 506.– С.127-137.
15. *Гродский С.А., Кудрявцев В.Н., Макин В.Н.* Оценка влияния поверхностных пленок на короткие ветровые волны и характеристики пограничного слоя атмосферы // *Морской гидрофизический журнал.*– 1999.– № 6.– С.3-14.
16. *Makin V.K., Kudryavtsev V.N.* Coupled sea surface-atmosphere model. 1. Wind over waves coupling. // *J. Geophys. Res.*– 1999.– v.104, C4.– P.7613-7623.
17. *Goldman J.C., Dennett M.R., Frew N.M.* Surfactant effects on air-sea gas exchange under turbulent conditions // *Deep-Sea Res.*– 1988.– 35.– P.1953-1970.
18. *Donelan M., Wanninkhof R.* Gas-transfer at water surfaces – concepts and issues / *Gas transfer at water surfaces.* Eds by M.A.Donelan, E.S.Saltzman, R.Wanninkhof, W.M.Drennan.– AGU Press: Geophysical Monograph Series, 2002.– v.127.– P.1-10.
19. *Bock E.J., Hara T., Frew N.M., McGillis W.R.* Relationship between air-sea gas transfer and short wind waves // *J. Geophys. Res.*– 1999.– 104.– P.25821-25831.
20. *Tsai W.-T.* Impact of a surfactant on a turbulent shear layer under the air-sea interface // *J. Geophys. Res.*– 1996.– v.101, C12.– P.28557-28568.
21. *Кузьмин А.В., Горячкин Ю.А., Ермаков Д.М., Ермаков С.А., Комарова Н.Ю., Кузнецов А.С., Репина И.А., Садовский И.Н., Смирнов М.Т., Шарков Е.А., Чухарев А.М.* Морская гидрографическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Черном море // *Иссл. Земли из космоса.*– 2009.– 1.– С.31-44.
22. *Соловьев Ю.П.* Характеристики внутреннего пограничного слоя над морем при ветре с берега, имеющего горный рельеф // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. (*настоящий выпуск*)
23. *Соловьев Ю.П., Иванов В.А.* Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем // *Морской гидрофизический журнал.*– 2007.– № 3.– С.42-61.
24. *Поспелов М.Н., Горячкин Ю.Н., Ермаков Д.М., Комарова Н.Ю., Кузнецов А.С., Кузьмин А.В., Репина И.А., Садовский И.Н., Смирнов М.Т.* Исследование особенностей взаимодействия океана и атмосферы в прибрежной зоне в серии комплексных экспериментов CARMOS'05-07-09 // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. (*настоящий выпуск*)
25. *Сапрыкина Я.В., Дулов В.А., Кузнецов С.Ю., Смолов В.Е.* Аномально высокие волны в черном море: механизм и условия возникновения // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. (*настоящий выпуск*)
26. *Косник М.В., Дулов В.А.* Двумерные пространственные спектры коротких ветровых волн в натуральных условиях // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. (*настоящий выпуск*)

27. Чухарев А.М. Применение измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования турбулентности на океанографической платформе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. (настоящий выпуск)
28. Юровский Ю.Ю., Малиновский В.В. Оценка параметров обрушений ветровых волн по обратному рассеянию радиолокационного сигнала // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. (настоящий выпуск)
29. Zilitinkevich S.S., Mammarella I., Baklanov A.A., Joffre S.M. The effect of stratification on the roughness length and displacement height // Bound. Lay. Meteor. – 2008.– 129.– P.179-190.
30. Dupius H., Taylor P.K., Weill A., Katsaros K. Inertial dissipation method applied to derive turbulent fluxes over the ocean during the surface of the ocean // J. Geophys. Res.– 1997.– 102, C9.– P.21115-21129.
31. Grachev A.A., Fairall C.W., Larsen S.E. On the determination of the neutral drag coefficient in the convective boundary layer // Bound. Lay. Meteor.– 1998.– 86.– P.257-278.
32. Gert Konig. Roughness length of an Antarctic ice shelf // Polarforschung.– 1985.– 55(1).– P.27-32.
33. Parlange M.B., Porte-Agel F. On Monin-Obukhov similarity in the stable atmospheric boundary layer // Bound. Lay. Meteor.– 2001.– 99.– P.225-248.
34. Троицкая Ю.И., Долина И.С., Ермошкин А.В., Баханов В.В., Зуйкова Э.М., Репина И.А., Титов В.И. Отрицательные корреляции изменчивости приводного ветра и поверхностного волнения // Изв. РАН. ФАО.– 2008.– 4.– С.527-542.
35. Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В., Большаков А.Н., Смолов В.Е. Экспериментальные исследования механизмов модуляции радиолокационного сигнала на масштабах морских поверхностных волн // Иссл. Земли из космоса.– 2001.– № 4.– С.13-30.
36. Soloviev Y.P., Kudryavtsev V.N. Wind-speed undulations over swell: field experiment and interpretation // Bound. Lay. Meteor.– 2010.– 136, № 3.– P.341-363.
37. Torrence C. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc.– 1998.– 79.– P.61-78.

Материал поступил в редакцию 26.10.2010 г.