

Н.И. ВАСИЛИНЕНКО, С.А. ЕРМАКОВ, А.В. ИВАНОВ,
А.Р. ПАНЧЕНКО, С.Г. САЛАШИН, Ю.И. ТРОИЦКАЯ

ПРОЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРИСУТСТВИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОЙ ПЛЕНКИ

(Представлено академиком А.В. Гапоновым-Греховым 1 VI 1988)

Как известно, в настоящее время обсуждается несколько механизмов воздействия внутренних волн на ветровое волнение и образования сликовых и сулойных полос на морской поверхности (см., например, [1, 2]). Натурные подтверждения кинематических эффектов трансформации поверхностных волн в поле орбитальных скоростей внутренней волны приведены в [3–6]. Экспериментального же обоснования других механизмов, в частности образования полос выглаживания из-за перераспределения поверхностно-активных веществ (ПАВ) внутренними волнами, пока не было получено. Это связано с фактическим отсутствием измерений характеристик пленок в ходе проводившихся исследований поверхностных проявлений внутренних волн. Исключение составляют наблюдения [7], где измерялся коэффициент поверхностного натяжения морской воды и зафиксировано его уменьшение в сликовых полосах, предположительно связанных с внутренними волнами. Однако, поскольку измерения последних при этом не проводились, данные [7] могут рассматриваться лишь как косвенное свидетельство в пользу пленочного механизма выглаживания поверхностных волн внутренними.

В настоящей работе представлены результаты первых комплексных наблюдений сликов в поле внутренних волн в присутствии поверхностно-активных пленок (ПАП) естественной природы.

Наблюдения проводились летом 1987 г. в прибрежной зоне Черного моря с океанографической платформы Морского гидрофизического института АН УССР, расположенной в 0,7 км от берега. Глубина моря в районе измерений около 30 м. Регистрация внутренних волн проводилась температурным зондом, а также антенной из 3 распределенных датчиков температуры. Снятие профилей температуры велось с периодом 2 мин на всей глубине и позволяло после обработки сигналов зонда получить записи колебаний изотерм на произвольных горизонтах. По данным распределенных датчиков оценивалось направление и скорость распространения внутренних волн. Регистрация поверхностных волн проводилась оптическими анализаторами спектра (см. [1]), позволяющими получать сечения спектра уклонов волн с длинами от единиц сантиметров до 0,5 м. Измерение скорости и направления ветра проводилось стандартным анемометром на высоте 16 м. Для измерения коэффициентов поверхностного натяжения морской воды *in situ* применен метод "растекающихся капель" (см. [8]) растворов додецилового спирта в парафиновом масле. Растекание капель раствора с данной концентрацией спирта по поверхности воды происходит, начиная лишь с определенного значения коэффициента поверхностного натяжения пленки. Калибровка растворов проводилась в лаборатории на весах Лэнгмюра (см. [8]) с точностью ~ 1 дин/см.

В ходе измерений антенной распределенных датчиков и температурным зондом был зарегистрирован цуг внутренних волн, состоящий из интенсивной одиноч-

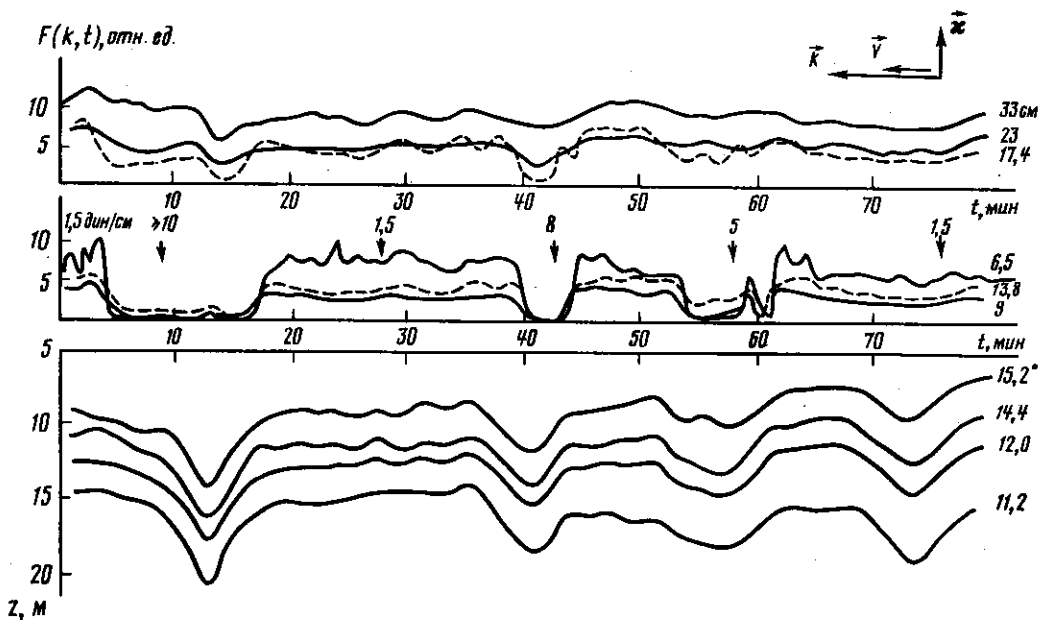


Рис. 1. Синхронные записи текущего спектра коротких ветровых волн и колебаний изотерм. Указаны величины давления ПАП (дин/см), а также взаимная ориентация волновых векторов поверхностной и внутренней волн и скорости ветра

ной и следующей за ней квазипериодической затухающей волн, и определено направление их распространения. На поверхности при этом наблюдались три протяженные контрастные сликовые полосы, движущиеся к берегу в том же, что и цуг, направлении. Измерения показали наличие пленки в сликах, давление пленки π (т.е. разность между коэффициентами поверхностного натяжения чистой и покрытой пленкой воды) было наибольшим над одиночной волной (более 10 дин/см) и уменьшалось в последующих полосах, вне сликов поверхностное натяжение слабо (на 1–1,5 дин/см) отличалось от натяжения чистой воды. Такого же порядка величины давления пленки в сликовых полосах приведены и в [7]. Ветер в течение всего времени наблюдений слабый, его скорость 2–2,5 м/с, направление – почти перпендикулярное к направлению распространения внутренних волн. Анализ спектра поверхностного волнения оптическими анализаторами проводился в направлении вдоль скорости ветра. На рис. 1 представлены синхронные записи колебаний изотерм и текущего спектра волнения на фиксированных длинах волн $\lambda = 6,5 \dots 33$ см, а также результаты измерений давления поверхностной пленки; здесь же показана взаимная ориентация волновых векторов \vec{k} и \vec{k}' поверхностных и внутренних волн и скорости ветра \vec{V} . Характер изменчивости волнения довольно типичен для пленочных сликов [9]: рябь сантиметрового диапазона гасится почти полностью (на порядок и более), степень гашения волн дециметрового диапазона быстро уменьшается с ростом длины волны и для волнения с длинами $\lambda \geq 25-30$ см выглаживание практически отсутствует. Заметим, что кинематические эффекты трансформации волнения в описываемых наблюдениях должны проявляться слабо, поскольку волновые векторы поверхностных и внутренней волн почти перпендикулярны.

Для анализа перераспределения ПАВ внутренней волной выполнены численные расчеты профиля частоты Вайселя, вертикальной структуры мод внутренних волн, их фазовых скоростей и поля горизонтальной скорости на поверхности и.

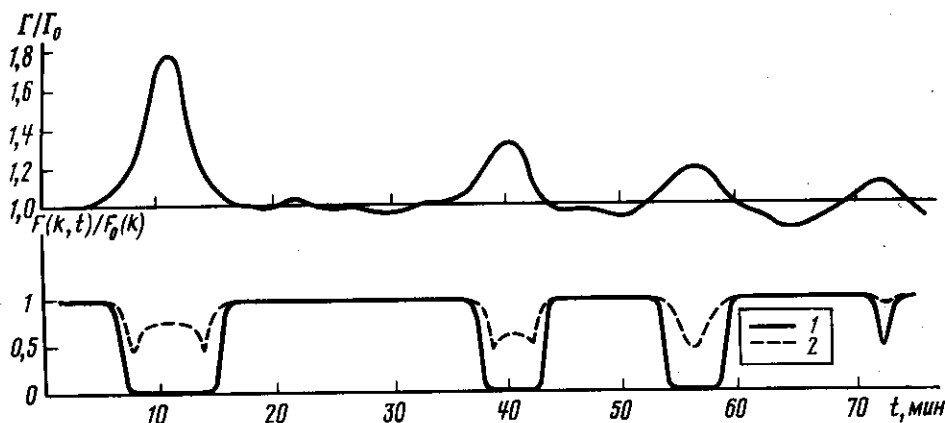


Рис. 2. Результаты модельных расчетов относительной концентрации ПАВ и текущего спектра поверхностных волн в поле внутренней волны. 1 - $\lambda = 6,3$ см, 2 - $\lambda = 21$ см

Сравнение результатов расчета и данных наблюдений показало, что внутренние волны в цуге являются длинными слабодиспергирующими волнами первой моды*, вычисленное значение фазовой скорости $C = 27$ см/с, экспериментальная оценка $C \sim 20$ см/с. Данное расхождение может быть следствием невысокой точности измерений C из-за сравнительно малой базы антенны распределенных датчиков, а также наличия встречного подповерхностного течения, скорость которого по данным вертушечных измерений на глубинах 5 и 20 м порядка 2–5 см/с. Временной сдвиг между записями поверхностных и внутренней волн, связанный с разнесением точек измерений в направлении \vec{k} примерно на 5–7 м, при таких значениях скорости C можно не учитывать. Как следует из рис. 1, сликовые полосы расположены примерно над впадинами внутренних волн.

Перейдем к интерпретации полученных результатов. Распределение концентрации пленки Γ в поле орбитальной скорости u можно найти из уравнения сохранения ПАВ (см. [1]). Ниже, имея в виду провести в основном качественный анализ наблюдений, ограничимся стационарным решением для Γ , пренебрегая диффузией и релаксацией ПАВ. В этом случае

$$(1) \quad \Gamma(\xi) \equiv \Gamma(x - Ct) = \Gamma_0 \left[1 - \frac{u(\xi)}{C} \right]^{-1},$$

где Γ_0 - невозмущенное значение концентрации. Максимумы концентрации ПАВ соответствуют максимумам $u(\xi)$, т.е. впадинам внутренних волн первой моды (учет диффузии и релаксации дает смещение максимума $\Gamma(\xi)$ к заднему склону внутренней волны). Результаты вычислений концентрации Γ/Γ_0 над цугом согласно (1) приведены на рис. 2.

Для расчета выглаживания ряби над внутренней волной необходимо знание зависимости параметра упругости пленки P от концентрации ПАВ [1]. Прямые исследования упругих свойств ПАВ в ходе наблюдений не проводились, однако, используя данные измерений давления π и связывая их с соответствующими расчетными концентрациями Γ/Γ_0 , можно приближенно восстановить изотерму пленки

*Выполнены также расчеты, показавшие, что амплитуда и ширина одиночной внутренней волны удовлетворяют солитонному решению уравнения Кортевега-де Фриса.

$\pi(\Gamma/\Gamma_0)$. Построенная таким образом изотерма характеризуется быстрым ростом давления с увеличением концентрации и довольно типична для конденсированных ("твердых" или "жидких") ПАП, в том числе для морских сликообразующих пленок, что отмечалось, в частности, в [1]. По изотерме оцениваются величины параметра упругости $P = \Gamma d\pi/d\Gamma$ в поле внутренней волны и соответствующие значения декремента затухания поверхностных волн $\gamma(k, P)$ [10]. (Следует отметить, что найденные по изотерме значения P , вообще говоря, могут быть занижены по сравнению с динамической величиной упругости, особенно при больших концентрациях ПАВ [11].) Анализ изменчивости спектра поверхностных волн $F(k)$ из-за вариаций декремента затухания выполнялся в рамках модели локального по спектру баланса источников и стоков энергии ветровой ряби аналогично [1, 9]. Нормированный на свое невозмущенное значение текущий спектр ряби определяется выражением

$$(2) \quad F(k, \xi)/F_0(k) = [\beta(k, V) - \gamma(k, P(\xi))] [\beta(k, V) - \gamma(k, 0)]^{-1}$$

при $\beta > \gamma$, где β — инкремент роста ветровых волн; при $\beta < \gamma$ полагаем, что рябь не возбуждается и $F = 0$. Результаты расчетов $F(k, t)/F_0(k)$ с использованием эмпирической формулы Хьюза для $\beta(k, V)$ [2] приведены на рис. 2 и качественно согласуются с данными наблюдений.

Как уже отмечалось, кинематические эффекты трансформации поверхностного волнения внутренней волной в данной схеме наблюдений оказываются несущественными. В дальнейшем предполагается выполнить наблюдения совместного действия как кинематического, так и пленочного механизмов проявления внутренних волн на морской поверхности.

Авторы приносят благодарность В.Б. Быстранову, А.Б. Ерышеву, Э.М. Зуйковой за помощь в подготовке измерительной аппаратуры.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР
Горький

Поступило
15 VI 1988

ЛИТЕРАТУРА

1. Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность. Горький, 1982. 251 с.
2. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 375 с.
3. Hughes B.A., Grant H.L. — J. Geophys. Res., 1978, vol. 83, № C1, p. 443–454; Hughes B.A. — Ibid., p. 455–465.
4. Басович А.Я., Баханов В.В., Браво-Животовский Д.М. и др. — ДАН, 1985, т. 283, № 1, с. 209–212.
5. Бурдюгов В.М., Верещак А.И., Гродский С.А. и др. Препринт Морского гидрофизического ин-та АН УССР. Севастополь, 1986. 74 с.
6. Thompson D.R., Gasparovic R.F. — Nature, 1986, vol. 320, p. 345–348.
7. Barger W.R., Daniel W.H., Garrett W.D. — Deep Sea Res., 1974, vol. 21, p. 83–89.
8. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей. М.: ОГИЗ, 1947. 552 с.
9. Ertaikov S.A., Zujkova A.M., Panchenko A.R. et al. — Дуп. Атомс. Осеанс, 1986, vol. 10, № 1, p. 31–50.
10. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 699 с.
11. Ермаков С.А., Талипова Т.Г. — ДАН, 1985, т. 281, № 4, с. 942–944.