

Слико- и сулоеобразующие явления в море. Внутренние волны

А.Н. Серебряный^{1,2}

¹Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева,
117036 Москва, Ул. Шверника, 4
E-mail: serebryany@hotmail.com

²Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32

Представлен обзор слико- и сулоеобразующих явлений в море, основанный на 30-летнем экспедиционном опыте работы автора. Разнообразие рассмотренных явлений, проявляющихся на морской поверхности, включает в себя: цуги и уединенные внутренние волны на шельфе и в глубоком океане; встречные вдольбереговые течения, фронты различного происхождения и др. В статье, являющейся первой половиной обзора, представлены экспериментальные доказательства связи внутренних волн с их поверхностными проявлениями. Приводятся типичные примеры из наблюдений в Черном, Японском и Южно-Китайском морях, а также в Индийском и Тихом океанах.

Ключевые слова: слики, сулои, внутренние волны, нелинейные волны, солитоны, фронты, течения, области дивергенции и конвергенции, шельф, глубокий океан.

Введение

Особенность многих процессов в океане быть видимыми на снимках, сделанных со спутников, через свои поверхностные проявления, заставляет более детально взглянуть на многообразие этих явлений, чтобы впоследствии наилучшим способом использовать космические снимки в многостороннем изучении океана. Многие явления в океане воздействуют на поверхность, вызывая изменение ее шероховатости, что влечет за собой изменение отражательной способности морской поверхности, появление оптических и радиолокационных контрастов. Все это ведет, к проявлению на аэрокосмических снимках поверхностных изображений многих океанических процессов. Однако, основываясь на почти тридцатилетнем собственном опыте работы в морских и океанских экспедициях, хочу заметить, что наблюдаемые явления на поверхности океана далеко не всегда могут быть однозначно идентифицированы с тем или иным механизмом генерации: одинаковые на первый взгляд поверхностные проявления могут быть вызваны различными причинами. Проиллюстрируем сказанное с помощью примера, представленного на рис. 1, где приведены две фотографии морской поверхности, сделанные нами в прибрежных зонах Черного и Японского морей с малых судов в 2004 г. На обеих фотографиях запечатлены уединенные полосы выглаженной воды (слики). Слики прямолинейны, насколько это можно видеть глазом с борта малого судна, расположены почти параллельно береговой черте и находятся на удалении от берега в 1–2 км. Ширина обеих сливовых полос составляет несколько десятков метров. Налицо совпадение всех внешних характеристик наблюдаемых сливовых полос. Однако, возможность контроля подповерхностных процессов, которой мы располагали, пересекая рассматриваемые уединенные сливовые полосы, ведя при этом регистрацию с помощью акустического доплеровского профилометра течений (ADCP), позволяет нам доказательно утверждать, что очень сходные по своему виду сливовые полосы были генетически связаны с совершенно разными гидрофизическими процессами. Так, на шельфе Японского моря уединенная сливовая полоса была порождена движущейся к берегу уединенной внутренней волной, в то время как на шельфе Черного моря – она обозначала границу встречных вдольбереговых течений. Экспериментальные доказательства вышесказанного будут представлены дальше, а сейчас мы обратимся к некоторым основным понятиям, используемым в нашей работе.



Рис. 1. Примеры уединенныхslickовых полос на морской поверхности: на шельфе Черного моря (вверху) и Японского моря (внизу) (измерения 2004 г.). Несмотря на внешнюю схожесть slickовые полосы имеют различное происхождение – slick на верхнем снимке вызван взаимодействием сильных встречных вдольбереговых течений и обозначает границу между ними, в то время как slick на нижнем снимке, образован уединенной внутренней волной



Рис. 2. Сlickовые полосы от короткопериодных внутренних волн на тихоокеанском шельфе Камчатки

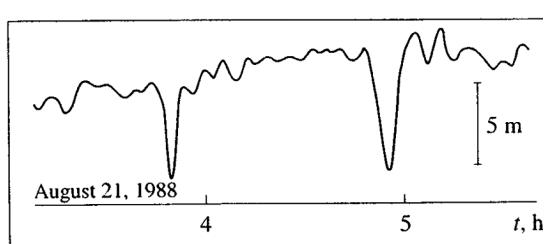


Рис. 3. Запись двух уединенных внутренних волн на шельфе Камчатки (б. Моржовая)- (слева) и фотография сопровождающей волну slicka, сделанная с борта НИС «Плутон»

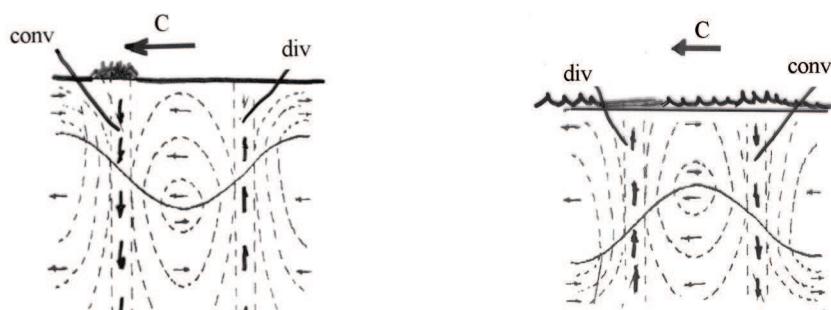


Рис. 4. Схема, поясняющая механизм образования зон slicka и слоя орбитальными течениями во внутренней волне. Слева показан случай волны-углубления, справа –волны-возвышения.
Внутренние волны движутся справа налево



Рис. 5. Сликовые полосы у входа в бухту Витязь, Японское море

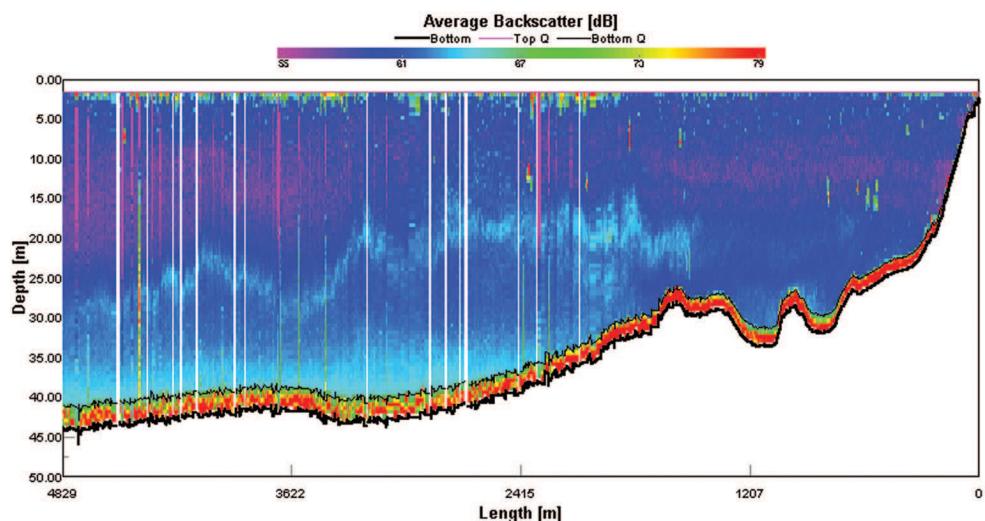


Рис. 6. Картина эхолокационных контрастов на сечении через бухту Витязь и прилегающую часть шельфа, подтверждающая наличие интенсивных внутренних волн на акватории.
Измерение с помощью ADCP «Rio Grande 600 kHz»

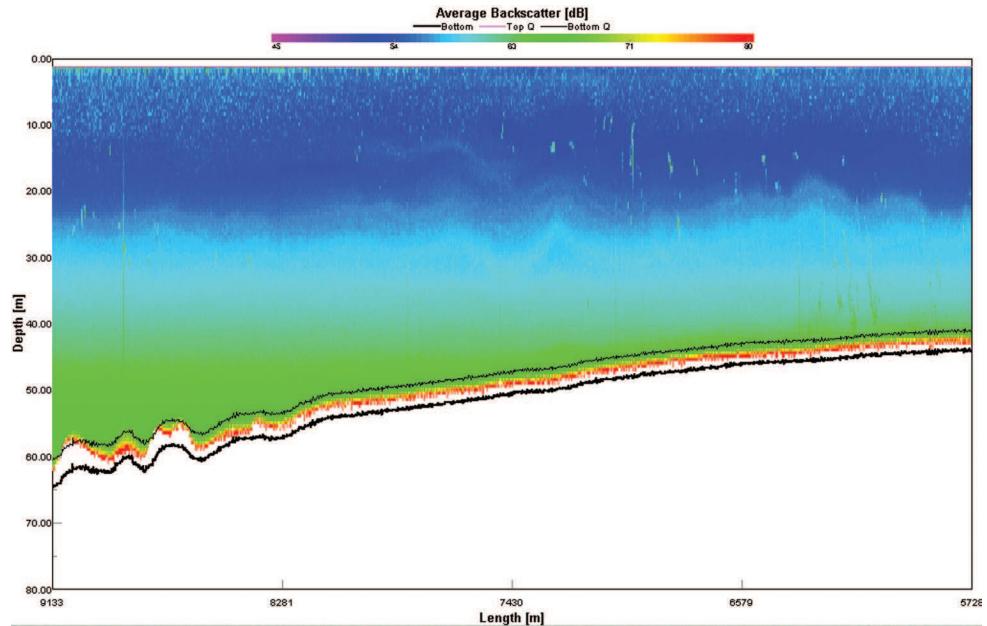


Рис. 7. Картина эхолокационных контрастов на сечении через шельф Японского моря, подтверждающая присутствие под сликовой полосой (показанной на рис. 1) уединенной внутренней волны-углубления 10-метровой высоты, движущейся на берег

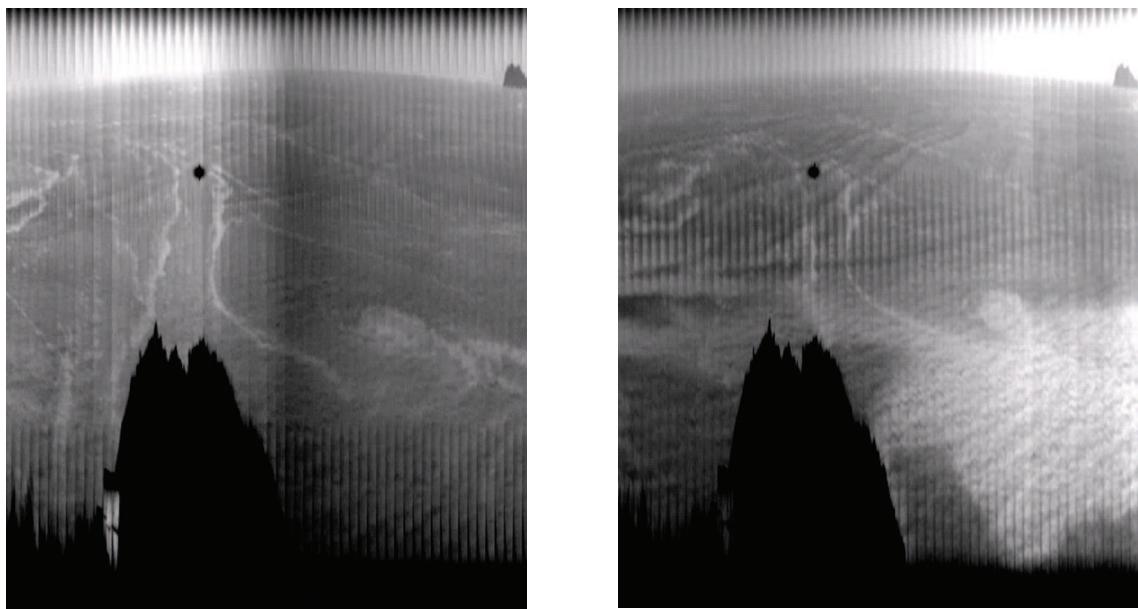


Рис. 8. Два снимка прибрежной зоны, сделанных 20 сентября 2004 г. в 19:34 и 20:10, на которых видно распространение к берегу полос, сгенерированных внутренними волнами (фото О.Г. Константинова)

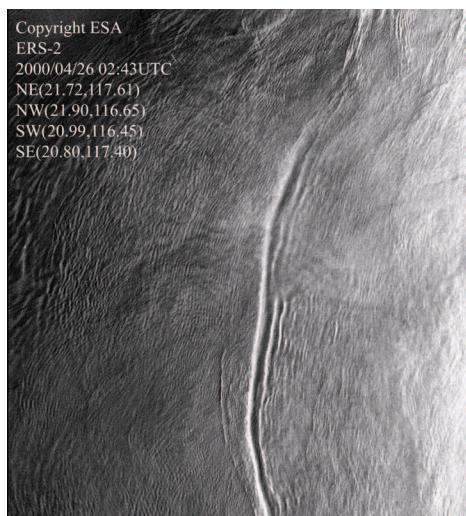


Рис. 9. Радиолокационный снимок Южно-Китайского моря со спутника ERS-2, на котором виден фронт единенной внутренней волны, движущейся от пролива Лусон (Liu et al, 1998)



Рис. 10. Поверхность моря 23 мая во время прохождения супоя (слева) и после (справа)

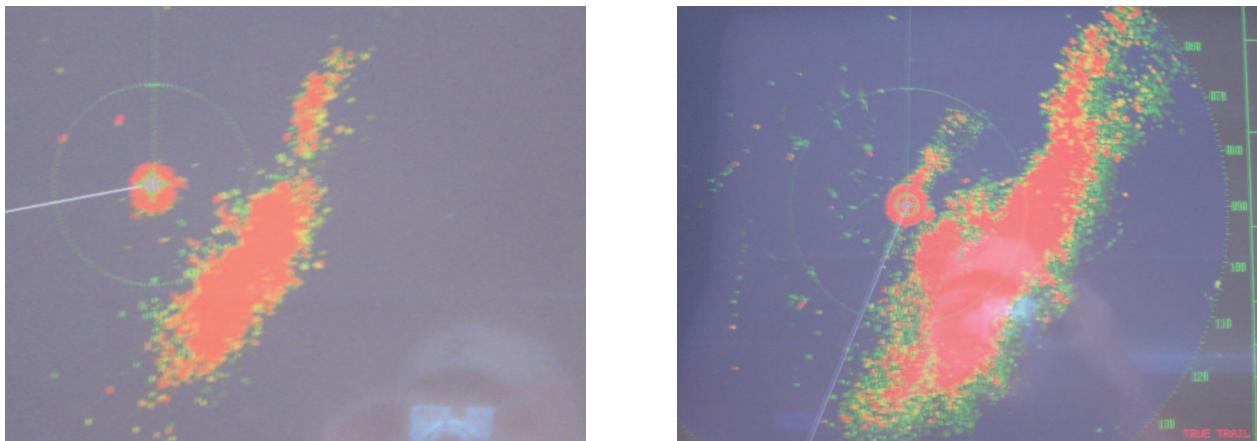


Рис. 11. Снимки экрана радиолокатора при подходе супера 23 мая в 12:00 и 12:20

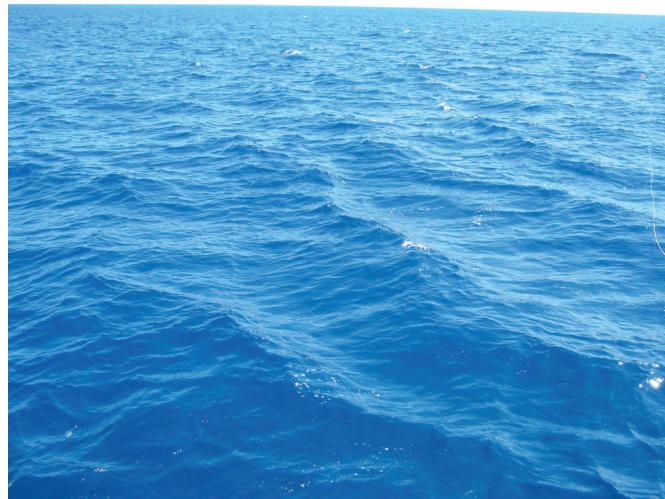


Рис. 12. Поверхность моря при супоге от проходящей внутренней волны

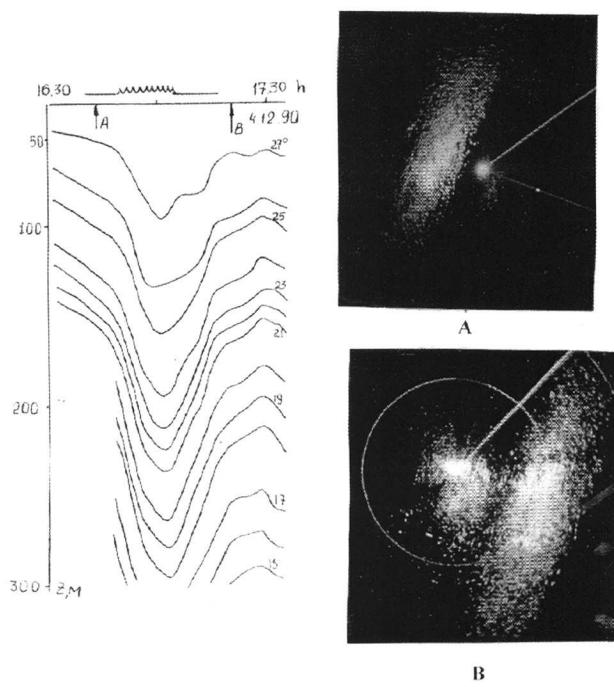


Рис. 13. Уединенная внутренняя волна и сопровождающая её супойная полоса на поверхности океана (снимки экрана радиолокатора) (Konyaev et al., 1995)

В одной из основополагающих отечественных работ по рассматриваемой нами тематике (Федоров, Гинзбург, 1986) представлено обобщение о поверхностных явлениях в океане на основе визуальных наблюдений штурманов торгового флота, опубликованных в журнале «The Marine Observer» за почти полувековой период. Авторы статьи разделили все разнообразие описанных поверхностных проявлений на четыре следующие категории:

1. Одиночные полосы и пятна аномально неспокойной воды, более крутого волнения, барашков или толчей, или обособленные выглаженные участки поверхности;
2. Одиночные линии раздела или «демаркации», выраженные сменой цвета, резким изменением температуры воды, скоплением мусора или пены;
3. Одиночные полосы, участки различной формы и линии раздела, сочетающие в себе различные элементы п.1 и п. 2 и, кроме того, водовороты, звуковые проявления и скопления планктонных организмов, а также морских животных и птиц при полном штиле;
4. Многократно чередующиеся параллельные полосы ряби, толчей или крутого волнения и более спокойной воды (сликов).

Первые три категории объединяют собой поверхностные проявления фронтальных разделов различной природы. Четвертая категория интерпретируется как поверхностные проявления цугов внутренних волн. Полосы толчей или более крутого волнения обычно называют сулоем (в английском языке эквивалентом сулоя служат термины «tidal rip», «choppy water» и др.) Движения частиц в сулое подобно движению на поверхности кипящей воды (Лаппо, 1940). Согласно определению (Лейкин, Монин, 1985; Монин, Красицкий, 1985), сулой – нерегулярное морское волнение неветрового происхождения, возникающее в некоторых местах при обтекании течениями неровностей рельефа дна на мелководьях, или при набегании волн (например зыби) на встречное течение (эффект блокировки), или при столкновении течений, а может быть – и по другим аналогичным причинам. Считаем своим долгом скорректировать это определение, добавив среди «других аналогичных причин» в первую очередь интенсивные внутренние волны, значительные орбитальные течения которых на поверхности моря создают интенсивные сулои. По аналогии с работой (Федоров, Гинзбург, 1986) перейдем к рассмотрению явлений на поверхности, однако используя не описательные данные наблюдателей, а собственные фотодокументы о морской поверхности, сопровождавшиеся тщательными параллельными измерениями, контролирующими процессы в водной толще. Начнем с рассмотрения примеров внутренних волн - явления, наиболее уверенно идентифицируемого через поверхностные проявления.

Поверхностные проявления внутренних волн

В шельфовой зоне внутренние волны часто проявляются на морской поверхности при слабых ветрах в виде хорошо различимых сливовых полос, ориентированных параллельно береговой черте. Эту отличительную особенность отмечали многократно и продолжают отмечать почти все исследователи внутренних волн, начиная с Юинга (Ewing, 1950), первым связавшим внутренние волны со сливами на поверхности. На рис. 2 показан пример сливовых полос, распространяющихся к берегу тихоокеанского побережья Камчатки (вблизи вулкана Камбальная сопка), чье происхождение связано с движущимися в сторону берега интенсивными внутренними волнами. В условиях резкого летнего термоклина прибрежных вод Камчатки высоты типичных внутренних волн здесь могут достигать 10–12 м. Другой аналогичный пример приведен на рис. 3. Прохождение уединенных внутренних волн высотой 6–8 м на шельфе Камчатки напротив бухты Моржовой сопровождалось отчетливыми сливовыми полосами. Измерения внутренних волн проводились с закоренного судна распределенными датчиками температуры (Serebryany, 1996). При этом термоклин имел при-

поверхностное положение, что усиливало выглаживающий эффект внутренних волн. Некоторые примеры типичных поверхностных проявлений внутренних волн, запечатленных на радиолокационных снимках поверхности океана вблизи Камчатки, сделанных с самолета, приведены в работах (Серебряный, 2000; Сабинин, Серебряный, 2007).

Образование сливковых полос, как это было убедительно показано в работе (Huges, Grant, 1978), связано с изменением спектра поверхностного волнения и изменением дисперсии уклонов поверхности при прохождении внутренних волн. Внутренние волны помимо вертикальных смещений водной толщи вызывают также и горизонтальные смещения частиц за счет системы сопровождающих их орбитальных течений (см. рис.4). Для случая волн-углублений на переднем фронте орбитальные течения создают область конвергенции течений, что ведет здесь к образованию зоны усиленного поверхностного волнения. Для случая волн-возвышений наоборот – на переднем склоне волны образуется зона дивергенции течений и образуется слик, а область конвергенции – усиленного поверхностного волнения оказывается на заднем склоне волны. Напомним, что интенсивные внутренние волны на шельфе могут иметь различную полярность, в зависимости от того, в условиях какого волновода они распространяются (прижат термоклин ко дну или поверхности) (Серебряный, 1990).

В отдельных случаях, если внутренние волны имеют большую амплитуду, сопровождающие их течения могут привести к образованию зоны «кипящей» воды или сулоев. Примеры сулоев от внутренних волн большой амплитуды будут приведены позже. Модель, объясняющая влияние течения, созданного внутренними волнами, на кинематику поверхностных волн (кинематическая модель) была предложена в (Басович и др., 1982). Существует также и другой механизм, объясняющий появление сливков в присутствии внутренних волн – пленочный (Ермаков и др., 1982). Орбитальные течения внутренних волн перераспределяют концентрацию присутствующих на поверхности поверхностно-активных веществ (ПАВ), что ведет к модуляции коэффициента затухания ряби, обуславливая ее различную интенсивность на разных участках поверхности над внутренней волной. В случае действия пленочного механизма на поверхности моря над передним склоном волны-углубления будет область пленки с повышенной концентрацией ПАВ, что приведет к существенному затуханию ряби, т.е. к образованию слика. Поскольку в прибрежных зонах морей вследствие антропогенного воздействия обычно встречается повышение концентрации ПАВ, поэтому можно ожидать здесь большую распространенность действия последнего механизма. Мы можем сослаться на наши наблюдения (Иванов, Серебряный, 1985), которые подтверждали пленочный механизм образования сливковых полос от внутренних волн в прибрежной зоне Черного моря у Южного берега Крыма. Следует заметить, что в литературе отмечается разнобой в сообщениях о наблюдении положения слика относительно фазы внутренней волны: имеются свидетельства привязки слика как к переднему фронту, так и заднему склону, а также подошве или гребню внутренней волны. Принимая во внимание высказывание, легко объяснить различную фазовую привязку слика возможным преобладанием действия одного из двух описанных механизмов, а также наличием внутренних волн различных полярностей.

Необходимо заметить, что внутренние волны бесприливных морей (Черного, Каспийского и др.) обладают относительно невысокими амплитудами по сравнению со своими аналогами в морях с приливами или в океане (Иванов, Серебряный, 1982; Серебряный, 1985). Тем не менее, они достаточно четко проявляются на морской поверхности и хорошо видны на спутниковых изображениях (Лаврова и др., 2011а, 2011б).

Обратимся снова к примерам наблюдений поверхностных проявлений внутренних волн. На рис. 5 показана фотография входа в бухту Витязь (Японское море) на которой отчетливо видна группа сливковых полос, обозначающих распространяющийся в бухту цуг внутренних волн. Подобные картины в этом месте автору приходилось видеть многократно на протяжении нескольких лет в летне-осенний период. В различные дни количество полос и их форма может меняться, однако сохраняется общая черта – их распространение внутрь бухты,

а также выпуклость фронта полос. Иногда на этом месте вместо системы параллельных сливков наблюдаются вихревые образования, также, кстати, видимые через сливковые полосы, но закрученной формы (частное сообщение сотрудника ТОИ ДВО РАН О.Г. Константина). Доказательством внутриволнового происхождения параллельных сливковых полос во входе в бухту Витязь служат данные многих разрезов, проведенных с использованием ADCP "Rio Grande 600 kHz", охватывающих часть бухты Витязь и прилегающие к ней акватории. В качестве примера один из разрезов показан на рис. 6. Картина интенсивности обратно рассеянного сигнала хорошо выявляет положение скачка плотности (термоклина) на разрезе и присутствие на нем интенсивных колебаний с размахом до 5-6 м. Волны таких амплитуд при глубине места 30-40 м ведут к заметным поверхностным проявлениям в виде сливков.

Частым явлением бывают сливковые структуры, аналогичные вышеописанным, и на открытом шельфе Японского моря (Серебряный, 1987). Вернемся снова к рис. 1, где на нижней фотографии видна единственная полоса, которая оказалась сгенерированной одиночной внутренней волной, распространяющейся от области материкового склона к берегу. Доказательством этого утверждения служит изображение, полученное при пересечении почти по нормали) сливковой полосы и прилегающих областей судном с работающим ADCP. Соответствующая картина интенсивности обратно рассеянного сигнала приведена на рис.7. Единственная внутренняя волна была встречена в точке шельфа с глубиной 50 м при положении термоклина почти на 20-метровой глубине. Высота волны около 10 м. Обращает на себя внимание характерная форма внутренней волны, которую можно назвать «перекошенная» волна-углубления. Эта характерная форма нелинейных внутренних волн, которая имеет место при их подходе к точке переворота (точке смены полярности волны) со стороны глубокой воды. Более подробно об этом изложено в (Серебряный, Пао, 2008). Движущиеся по шельфу внутренние волны, подобные волне, показанной на рис. 7, проходя точку переворота, трансформируются, превращаясь в волны-возвышения, и далее продолжают свое движение к берегу. Эти волны, оказываясь ближе расположеными ко дну, тем не менее, достаточно хорошо проявляются на поверхности сливковыми полосами. Слики при этом привязаны к переднему склону внутренней волны, а не к заднему, как это имеет место у внутренних волн, распространяющихся по глубоководной части шельфа (волны-углублений). Внутренние волны подходят близко к берегу без разрушений (Серебряный, 1985) и оказываются хорошо видимыми невооруженным глазом через свои поверхностные проявления с высокого берега (см. рис. 8).

В сентябре 2004 г. мы совместно с сотрудником ТОИ ДВО РАН О.Г. Константиновым провели эксперимент, заключавшийся в наблюдении поверхности моря в прибрежной зоне с помощью установленной на высоком отвесном берегу сканирующей фотокамеры и одновременных измерениях течений и параметров внутренних волн с занятым яхтой (Серебряный, Константинов, 2005). Данные акустического профилографа по интенсивности обратно рассеянного акустического сигнала позволили уверенно зарегистрировать пакеты движущихся к берегу волн, хорошо видимых на фотоизображениях. На двух снимках, приведенных на рис. 8, сделанных 20 сентября 2004 г. в 19:34 и 20:10 местного времени, отчетливо видны характерные светлые полосы, расположенные почти по нормали к берегу, обозначающие границы фронтальных разделов, которые подворачиваются при приближении к берегу, создавая циклонический вихрь. Сопоставляя два снимка по изменению положения фронтальных полос можно сделать вывод о присутствии прибрежного вдольберегового течения на северо-запад. Другая особенность поверхности моря, хорошо видимая на снимках - две системы темных полос около точки, обозначающей местоположение яхты. Первая состоит из 3 более широких полос, вторая - из 6 более узких. Почти прямолинейные фронты полос этих двух групп ориентированы под углом друг к другу (около 30°), так, что первая группа полос движется в направлении, близком к нормали береговой черты, а вторая - как бы подворачивает вместе с вдольбереговым течением. Хорошо видно, что за 36 минут обе системы

полос заметно продвинулись к берегу. Заметим, что если на радиолокационных изображениях морской поверхности более светлые участки обозначают усиление ряби, а более темные участки соответствуют сликам, то в оптическом изображении все наоборот. Слики выглядят светлыми, а полосы повышенной шероховатости – темными. Как показали измерения ADCP системы сливковых полос были вызваны движущимися к берегу пакетами интенсивных внутренних волн высотой до 10 м. Первый пакет состоял из 3 волн, с периодом около 11.5 мин, второй – из 6 волн с периодом 7.5 мин. Измеренные вертикальные скорости течений при прохождении пакетов внутренних волн меняли свой знак по всему водному столбу и изменились в пределах от –5 см/с до 5 см/с.

Рассмотренные примеры включали в себя проявления внутренних волн в виде полос слик и ряби. Мы не касались явления сулоя, сопровождающее интенсивные внутренние волны в районах резких поднятий дна океана. Далее мы переходим к его рассмотрению.

Наблюдение сулоев в Южно-Китайском море

В мае 2006 г. нами проводились измерения подводных шумов, создаваемых внутренними волнами больших амплитуд в северо-восточной части Южно-Китайского моря в проливе Лусон (Serebryany, Okhrimenko, 2006). Южно-Китайское море вообще, а пролив Лусон, в частности – уникальные места, где встречаются внутренние волны самых больших амплитуд. Совсем недавно здесь была зарегистрирована внутренняя волна рекордной для всего Мирового океана высоты – 170 м (Klymak et al., 2006). На рис. 9 приведен космический радиолокационный снимок части Южно-Китайского моря, заимствованный нами из работы (Liu et al., 1998), где видно поверхностное проявление уединенной внутренней волны, высота которой предположительно около 100 м. Четкое радиолокационное изображение этого явления обязано сильным сулоям, сопровождающим внутренние волны. В данной статье мы рассмотрим только аспект, связанный с поверхностными проявлениями внутренних волн большой амплитуды, оставляя в стороне вопрос о генерации шума сулем внутренней волны. Заметим только, что результаты измерений шумов от внутренних волн в проливе Лусон напоминают наши более ранние результаты на Маскаренском хребте (Серебряный и др., 2005).

Нами были проведены два эксперимента с дрейфующего судна «Ocean Researcher 1» Национального университета Тайваня. Работы проводились во второй половине мая при тихой погоде, спустя несколько суток после прохождения тайфуна Чинчу. Неожиданное появление тайфуна в середине мая нарушило график выхода научно-исследовательских судов, который предполагал проведение работ по внутренним волнам в период сизигии, когда наблюдаются сильные приливы. В связи с этим работа нашей экспедиции оказалась приурочена к фазе квадратурного прилива. Этим, по-видимому, можно объяснить то обстоятельство, что нами не были встречены внутренние волны стометровых высот, которые здесь рассматриваются как обычное явление.

В первом эксперименте, 23 мая под судном прошла уединенная внутренняя волна 50-метровой высоты со скоростью более 3 м/с в направлении на северо-запад. Прохождение внутренней волны сопровождалось широкой сульной полосой, которую удалось зарегистрировать с помощью судового радиолокатора и цифровой фотокамеры (см. рис. 10 и 11). Высота внутренней волны была оценена по данным эхолота ЕК 500, а скорость распространения – по снимкам фотокамеры. Следует заметить, что скорость распространения волны более 3 м/с принадлежит к рекордным показателям для внутренних волн даже района Южно-Китайского моря. Особенностью зарегистрированной волны была ее принадлежность ко 2-моде (Serebryany, Liu, 2012). Второй случай имел место 24 мая и соответствовал прохождению цуга внутренних волн высотой 25-30 м, при этом было зафиксировано прохождение группы су-

лойных полос. В обоих случаях прохождение сулоев сопровождалось усилением подводного шума. При проходе сулоев появлялись поверхностные волны с обостренными вершинами, баражками и частыми обрушениями. Мы не имели возможности регистрации параметров поверхностного волнения: на глаз длины волн были в несколько метров, а высоты 0.5-0.8 м.

Наблюдавшиеся нами сулои в Южно-Китайском море напоминали сулои волн внутренних волн больших амплитуд у Маскаренского хребта в Индийском океане (Konyaev et al., 1995). На рис. 13 приведены данные об уединенной внутренней волне 90-метровой высоты, зарегистрированной 4 декабря 1990 г на удалении более 100 км к востоку от Маскаренского хребта. Эта волна по своему происхождению генетически близка к наблюдавшимся нами волнам в проливе Лусон, поскольку в этом районе Южно-Китайского моря также существует система подводных хребтов, которая способствует генерации внутренних волн больших амплитуд протекающим над ними баротропным приливным течением. Сечение 90-метровой волны показано изотермами, построенными по непрерывным CTD зондированиям, полученными при проходе под судном уединенной внутренней волны. Обращает на себя внимание более крутой передний фронт волны, над которым располагалась широкая полоса сулоя, состоящая из обрушающихся поверхностных волн, образующих толчею. Приведены снимки экрана радиолокатора, сделанные в моменты (A) до подхода и после прохода (B) уединенной внутренне волны. Измерения, проведенные вертикальной цепочкой гидрофонов для похожей волны, но сутки спустя (Серебряный и др., 2005), выявили, что усиление подводного шума имело место при проходе переднего фронта уединенной волны, и шум исходил от поверхности.

В последующей части, которая будет опубликована в следующем номере, мы рассмотрим слики и сулои, чье происхождение связано с фронтальными разделами различного происхождения (Серебряный, 2012), и сделаем общие выводы из всего изложенного.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-05-00428-а), Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-1176.2003.2), Программы ФЦП «Мировой океан», а также фирмы TRD Instruments-Europe, предоставившей нам во временное пользование акустический доплеровский измеритель течений Workhorse Rio-Grande-600 kHz.

Литература

1. *Басович А.Я., Баханов В.В., Таланов В.И.* Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель). В сб. Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность. Горький. ИПФ АН СССР. 1982. С. 8-30.
2. *Ермаков С.А., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г.* Пленочный механизм воздействия внутренних волн на ветровую рябь. В сб. Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность. Горький. ИПФ АН СССР. 1982. С. 31-51.
3. *Иванов В.А., Серебряный А.Н.* Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. №6. С. 683-685.
4. *Иванов В.А., Серебряный А.Н.* Проявление на поверхности внутренних волн малых амплитуд // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. №7. С. 795-799.
5. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д.* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Доклады РАН. 2011. Т. 436. №3. С. 407-411.
6. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Спутниковые наблюдения поверхности проявлений внутренних волн в Каспийском море // Исследования Земли из космоса. 2011. №2. С. 40-48.
7. *Лаппо С.Д.* Океанографический справочник арктических морей СССР. Общая лоция // Л.М: Изд. Главсевморпути. 1940. 184 с.

8. Лейкин И.А., Монин А.С. О спектрах супоев// Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. №3. С. 726-730.
9. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана// Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 376 с.
10. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Горячие точки в поле внутренних волн в океане // Акустический журнал. 2007. Т. 53. №3. С.410-436.
11. Серебряный А.Н. Внутренние волны в прибрежной зоне приливного моря // Океанология. 1985. Т. 25. N5. С. 744-751.
12. Серебряный А.Н. Внутренние волны над шельфом и вблизи материкового склона по данным буксируемого распределенного датчика температуры // Океанология. 1987. Т. 27. N2. С.225-226.
13. Серебряный А.Н. Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. №3. С.285-293.
14. Серебряный А.Н. Наблюдение внутренних волн, отраженных от материкового склона Камчатки // Доклады РАН, 2000. Т. 374. №3. С. 389-392.
15. Серебряный А.Н. Слико- и супообразующие явления в море. Фронты различного происхождения // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2012. Т.9. (В печати)
16. Серебряный А.Н., Константинов О.Г. Поверхностные проявления внутренних волн в шельфовой зоне Японского моря // Тезисы 3-й Всероссийской конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва. 14-17 ноября 2005. ИКИ РАН. С. 163.
17. Серебряный А.Н., Пао К.П. Прохождение нелинейной внутренней волны через точку переворота на шельфе // Доклады РАН, 2008. Т. 420. №4. С. 543-547.
18. Серебряный А.Н., Фурдуев А.В., Аредов А.А., Охрименко Н.Н. Шум внутренней волны большой амплитуды в океане // Доклады РАН, 2005. Т. 402. №4. С. 543-547.
19. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Явления на поверхности океана по визуальным наблюдениям // Океанология. 1986. Т. 26. №1. С.5-14.
20. Ewing G. Slicks, surface films and internal waves//J. Mar. Res. 1950. V. 9. №2. P.161-187.
21. Huges B.A., Grant H.L. The effect of internal waves on surface wind waves. 1. Experimental measurements//J. Geophys. Res. 1978. V.83 (C1). P. 443-454.
22. Klymak J.M., Pinkel R., Liu C-T, Liu A.K., David L. Prototypical solitons in the South China Sea//Geophys. Res. Lett. 2006. V.33, L11607, doi: 10.1029/2006GL025932.
23. Konyaev K.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N. Large-amplitude internal waves near Mascarene Ridge in the Indian Ocean // Deep-Sea Research I. 1995. V. 42. N 11/12. P. 2075-2091.
24. Liu A.K., Chang Y.S., Hsu M.-K., Liang N.K. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas // J. Geophys. Res. 1998. V.103 (C4). P. 7995-8008.
25. Serebryany A.N. Steepening of the leading and back faces of solitary internal waves-depressions and its connections with tidal currents// Dynamics of Atmospheres and Oceans. 1996. V. 23. N 1-4. P. 2075-2091.
26. Serebryany A.N., Liu C.-T. Observation of large-amplitude internal wave of the second mode in Luzon Strait // Geophysical Research Abstracts. 2012. Vol. 14, EGU2012-0.
27. Serebryany A., Okhrimenko N. Measurements of ambient noise generated by large-amplitude internal waves in Luzon Strait: the first experience // Proceedings of ISRS 2006 PORSEC. Busan, Korea. 2006. V.II. P. 943-945.

Slick- and suloy generating processes in the sea. Internal waves

A.N. Serebryany^{1,2}

*¹Andreyev Acoustics Institute,
117036 Moscow, Shvernik Str. 4,
E-mail: serebryany@hotmail.com*

*²Space Research Institute, RAS,
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.*

Review of slick- and suloy generating processes in the sea based on thirty-year expeditional experience of the author is presented. A variety of the considered phenomena manifested on the sea surface includes: train and solitary internal waves on a shelf and in deep sea, opposite alongshore currents, sea fronts of different origin and etc. In the article being the first part of the review, the experimental evidences of connection of internal waves with their surface manifestations are presented. Typical examples from observations in the Black, Japan and South China Seas, as well as in the Indian and Pacific oceans are demonstrated.

Keywords: slicks, suloys, internal waves, nonlinear waves, solitons, fronts, currents, divergence and convergence zones, shelf, deep water.