

## Слико- и сулоеобразующие явления в море. Фронты различного происхождения

А.Н. Серебряный<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева,

117036 Москва, Шверника, 4

E-mail: serebryany@hotmail.com

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН,

117997 Москва, Профсоюзная, 84/32

В обзоре о слико- и сулоеобразующих явлениях в море, основанном на 30-летнем экспедиционном опыте работы автора, представлены экспериментальные доказательства связи фронтальных разделов различной природы с их поверхностными проявлениями. Приводятся примеры из наблюдений в Черном, Белом и Японском морях.

**Ключевые слова:** слики, сулои, фронты, внутренние волны, внутренние боры, течения, области дивергенции и конвергенции, шельф, ADCP.

### Введение

В предыдущей статье (Серебряный, 2012) были рассмотрены различные примеры поверхностных проявлений внутренних волн на море. В данной статье, которая является продолжением, мы обратимся к наблюдаемым на море поверхностным проявлениям, чье происхождение не обусловлено внутренними волнами. Также как и предыдущая, данная статья основана на опыте собственных многолетних наблюдений автора. Сначала мы снова перечислим три категории видимых поверхностных проявлений фронтальных разделов различной природы, введенных в работе (Федоров, Гинзбург, 1986). Это – одиночные полосы и пятна аномальной неспокойной воды, более крутого волнения, барабашков или толчеи, или обособленные выглаженные участки поверхности; одиночные линии раздела или «демаркации», выраженные сменой цвета, резким изменением температуры воды, скоплением мусора или пены; одиночные полосы, участки различной формы и линии раздела, сочетающие в себе п. 1 и п. 2 и, кроме того, водовороты, звуковые проявления и скопления планктонных организмов, а также морских животных и птиц при полном штиле. В отличие от последней четвертой категории (Федоров, Гинзбург, 1986), которая описывает многократно чередующиеся полосы ряби или крутого волнения и сликов, что является поверхностным проявлением цугов внутренних волн, все три вышеперечисленные категории характеризуются одиночными полосами на морской поверхности и их происхождение не так однозначно. Как было показано в (Серебряный, 2012) одиночные полосы могут быть поверхностным проявлением уединенных внутренних волн, но далеко не всегда. Ниже будет показано, что в основном их происхождение связано с фронтами различного генезиса.

Наблюдения на крымском шельфе Черного моря. Слики, чьё происхождение связано с областями повышенной концентрации поверхностно активных веществ, а также подходом внутренних боров.

В течение многих летних сезонов мы проводили совместные исследования с сотрудниками Морского гидрофизического института (МГИ) Национальной академии наук Украи-

ны в Черном море с океанографической платформы в Кацивели (Иванов, Серебряный, 1985, 1985а, Серебряный, Иванов, 2012). В последнее десятилетие с 2001 г. проводились в летнее время ежегодные (за исключением 3 лет) измерения внутренних волн и течений с платформы. С 2003 г. измерения течений приборами МГИ добавились измерениями закрепленным на платформе доплеровским акустическим профилометром течений (ADCP). Использование этого прибора позволило существенно продвинуться в понимании динамики прибрежных вод района. В районе платформы в летнее время часто наблюдаются слизковые полосы, происхождение которых связано как с короткопериодными внутренними волнами (Иванов, Серебряный, 1985), так и локальными прибрежными фронтами различной природы. Двигущиеся к берегу в тихую погоду слизковые полосы ориентированы параллельно береговой черте и в большинстве случаев аккумулируют в себе различный мусор, хорошо видный при ближайшем рассмотрении (см. рис. 1). Это обстоятельство указывает на то, что слизи образуются за счет повышения концентрации поверхностно активных веществ.



*Рис. 1. Вид моря с платформы МГИ НАНУ на восток. С открытого моря подходят слизковые полосы, аккумулирующие плавучий мусор. На правом снимке – вид вблизи поверхности моря в области слика. Август 2004 г.*

В скором будущем нами будет проведено детальное исследование связи слизков с течениями в районе платформы, но сейчас мы хотим отметить характерную особенность динамики вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма – частое появление здесь внутреннего бора, сопровождающегося внезапным появлением сильных прибрежных течений (Иванов и др., 2005). На рис. 2 показан пример появления в приповерхностном слое сильной струи течения со скоростями до 0.8 м/с в северо-западном направлении. Помимо появления приповерхностного течения отмечается также появление сильных придонных течений. Если эти процессы происходят при несильном ветровом волнении, то на поверхности моря при этом можно отметить появление слизковых полос.

#### **Наблюдения на кавказском шельфе Черного моря. Уединенная слизковая полоса – граница встречных вдольбереговых течений**

Помимо исследований на черноморском шельфе у Южного берега Крыма нами проводились ежегодные исследования в сентябре-октябре каждого из последних десяти лет на северо-восточном шельфе Черного моря в районе Голубой бухты и прилегающей акватории. Здесь был получен богатый материал по гидрофизической изменчивости прибрежной зоны в условиях прохождения прибрежных антициклонических вихрей.

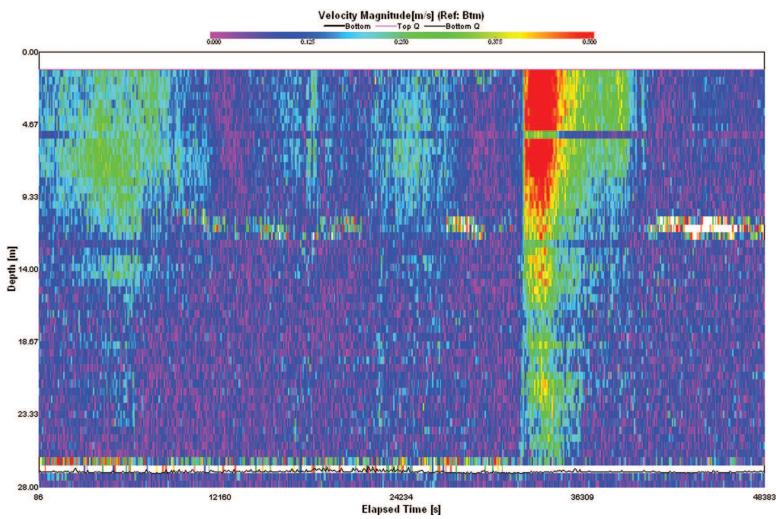


Рис. 2. Внутренний бор 21.08. 2005 (показана амплитуда течения). Сильное поверхностное течение (до 80 см/с). Длина реализации 13.5 ч. Резкое изменение направления течения (с восточного на западное)



Рис. 3. Уединенная сливовая полоса на морской поверхности на акватории шельфа, прилегающей к Голубой бухте (Черное море), вызванная взаимодействием сильных встречных вдольбереговых течений

Наблюдающиеся здесь сливовые полосы, по крайней мере, в этот период времени, связаны по большей части не с внутренними волнами, а с сильными вдольбереговыми течениями. Проиллюстрируем сказанное, вернувшись к примеру уже упоминавшемся в (Серебряный, 2012) и рассмотрим рис. 3, где приведена фотография протяженной вдольбереговой сливовой полосы, встреченной нами в прибрежной зоне. Сливовая полоса была прямолинейна, насколько это можно было заключить, наблюдая ее с борта малого судна, и находилась в почти двухкилометровом удалении от берега. Ее ширина составляла несколько десятков метров. Чтобы понять происхождение этой сливовой полосы обратимся к данным, полученным во время ее пересечения катером, оборудованным акустическим профилометром течений (ADCP). Данные записанные ADCP представлены на рис. 4. На приведенной картине интенсивности обратного рассеяния акустического сигнала явно видна резкая граница в приповерхностном слое между чистыми морскими водами (синие тона) и перемешанными прибрежными (зеленоватые тона). В то же время эта граница является разделом между встречными вдольбереговыми течениями – восточным (прибрежное) и западным (мористое) и проявляется на поверхности в виде слика. Таким образом, сливовая полоса на морской поверхности обозначает границу, где имеет место смена знака интенсивного вдольберегового течения.

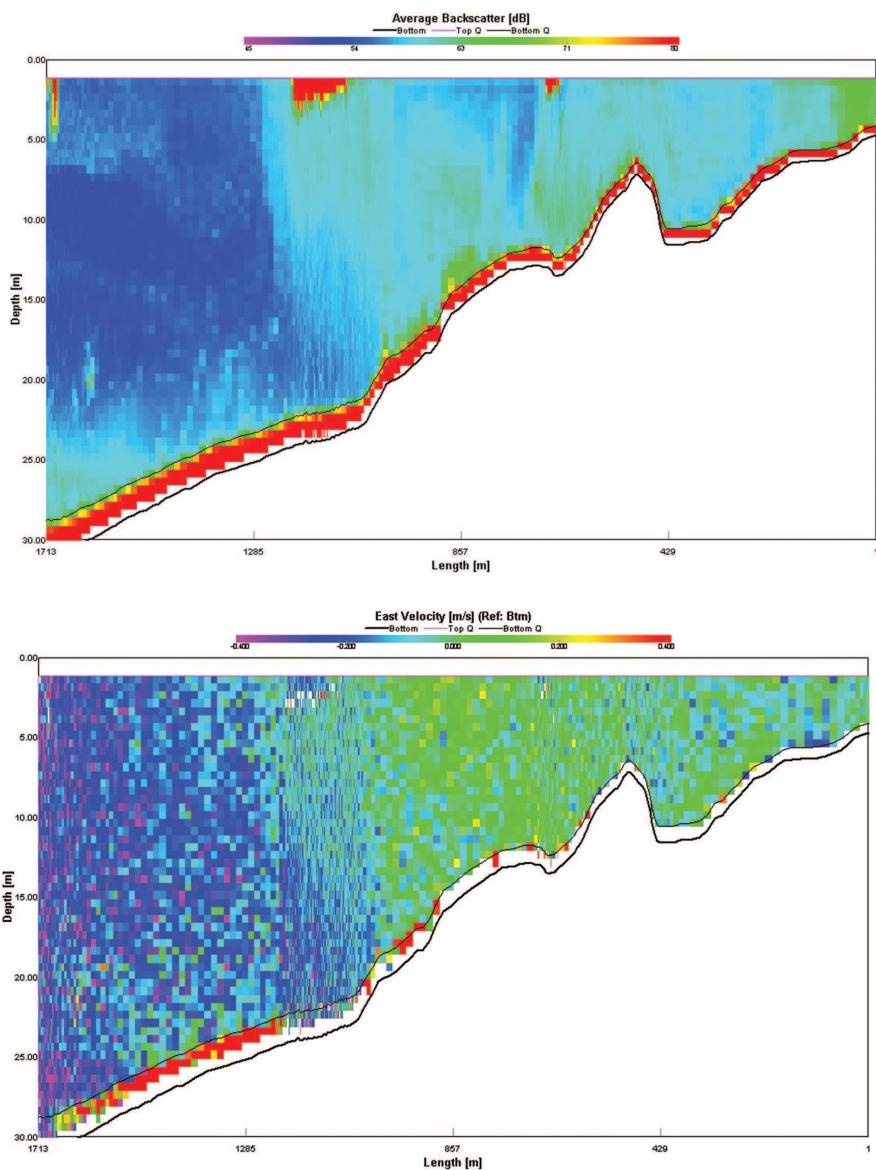


Рис. 4. Интенсивность обратного рассеяния акустического сигнала (вверху) и компонента течений (восток-запад) на разрезе, ориентированном по нормали к берегу. Положение сливковой полосы (см рис. 3) совпало с границей между двумя встречными вдольбереговыми течениями

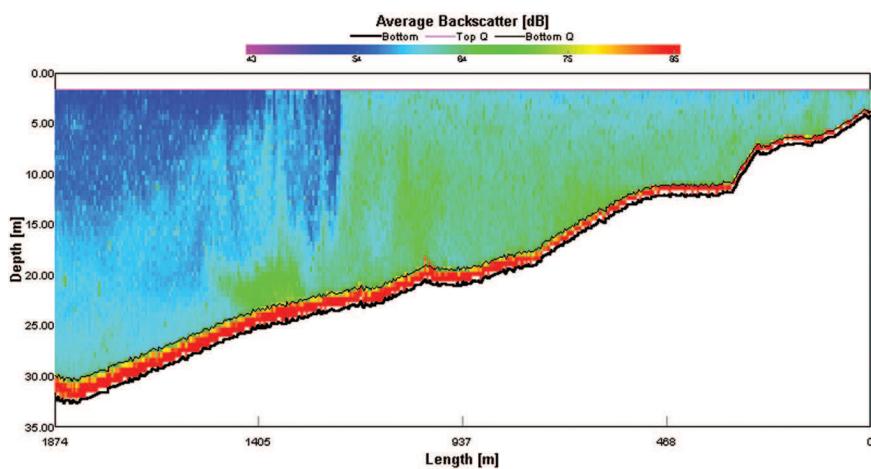
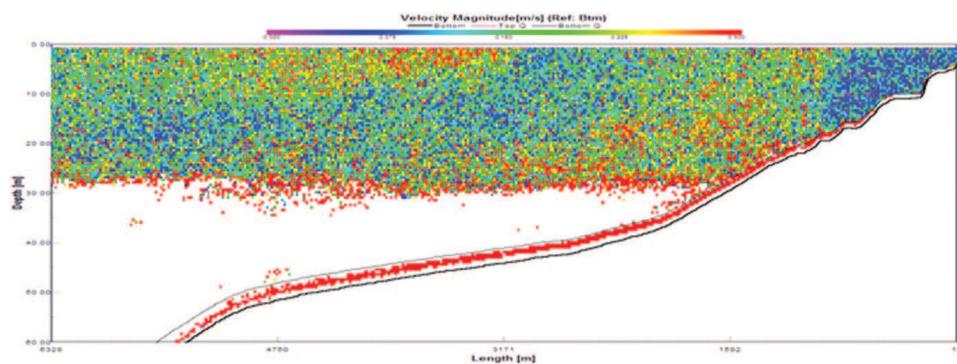


Рис. 5. Разрез в прибрежной зоне Черного моря, сделанный в послестormовой период в октябре 2003 г. Хорошо виден фронт, разделяющий перемешанные прибрежные воды (зеленоватые тона) с чистыми водами открытого моря (синие тона)

## **Слики, связанные с подходом в прибрежную зону локальных гидрологических фронтов**

Другая ситуация, когда наблюдаются четко очерченные уединенные сливковые полосы, показана на рис. 5. Локальный фронт в прибрежной зоне, наблюдающийся в послештормовой период, характеризуются резкой границей раздела между мутными перемешанными водами и чистыми морскими, очерчен на поверхности протяженным сликом. В этом случае опять же граница фронта совпадает с границей вдольбереговых течений противоположной направленности, однако, по сравнению с предыдущим примером движущийся фронт еще генерирует пакет короткопериодных внутренних волн, хорошо видный на представленной записи.



*Рис. 6. Изменение интенсивности течения на шельфе при проходе субмезомасштабного антициклического вихря: характерно появление струй интенсивного течения, выходящих из глубины к поверхности. Образуемые ими сдвиговые течения на морской поверхности образуют слики, что дает возможность наблюдать спиралевидный рисунок вихрей на спутниковых радиолокационных снимках*

## **Спиралевидные слики субмезомасштабных вихрей на шельфе**

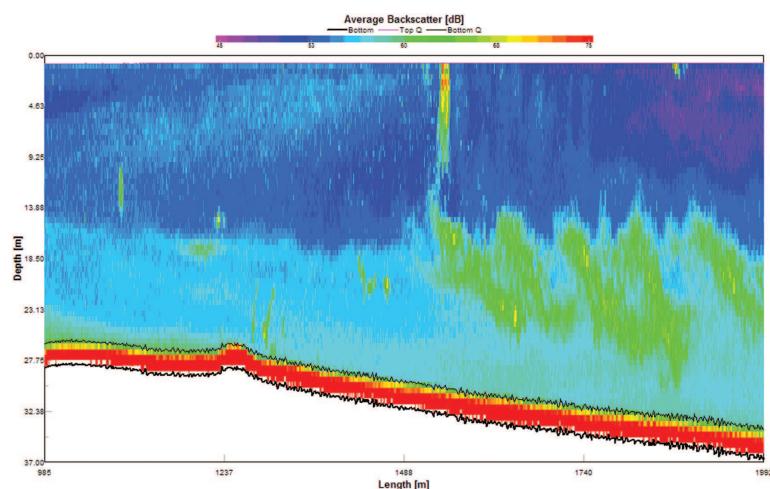
Говоря о сливковых полосах на северо-восточном шельфе Черного моря, мы должны упомянуть спиралевидные сливковые полосы на морской поверхности, которые сопровождают проходящие над шельфом субмезомасштабные вихри, делая их видимыми на космических снимках (Лаврова, 2005). В октябре 2006 г. нами проводились многосуточные исследования течений на акватории шельфа, прилегающей к Голубой бухте (Серебряный, Лаврова, 2008) во время которых удалось достаточно подробно изучить трехмерное строение прибрежного антициклического вихря, диаметр которого был около 25 км. Остановимся на важном вопросе – структуре течений в вихре. На рис. 6 показано распределение интенсивности течения с глубиной для разреза 8 октября, когда вихрь появился на траверсе наблюдения. Напомним, что цветовая гамма на рисунке 6 от лиловой до красной, через голубую, зеленую, желтую, означает переход от скоростей течений от 0 до 30 см/с. На приведенном разрезе характерно появление струй интенсивного течения, выходящих из глубины моря к поверхности. Струи разделены областью слабого течения размером около 1500 м. Они выходят на поверхность, при этом образуя сдвиговые течения. Создаваемые ими сдвиговые течения на морской поверхности образуют слики, подавляя поверхностное волнение в сантиметровом диапазоне, что дает возможность наблюдать спиралевидный рисунок вихрей на спутниковых снимках.

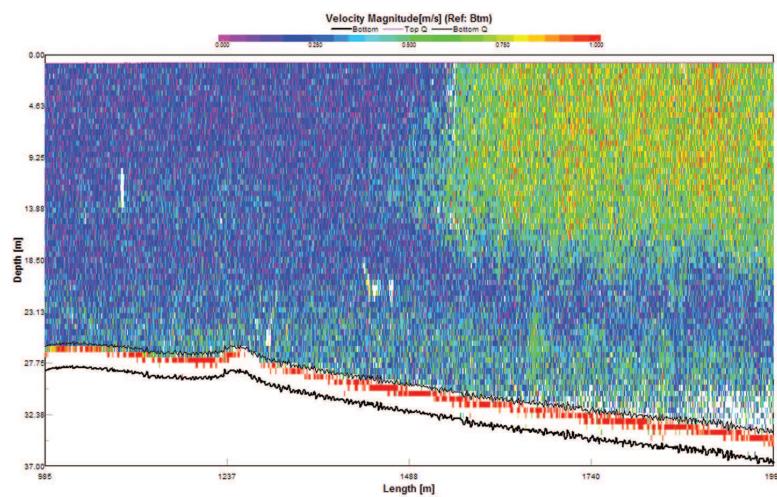
## **Наблюдения в Японском море. Уединенная сливковая полоса – маркер фронта области сдвиговой неустойчивости течений в морской стратифицированной среде**

Совсем другое происхождение уединенной сливковой полосы, связанное со сдвиговой неустойчивостью течений в толще моря, было нами обнаружено при исследованиях, проводимых на шельфе Японского моря. Сдвиговая неустойчивость течений с образованием пакета опрокидывающихся внутренних волн наблюдалась в прибрежной зоне Японского моря 17 сентября 2004 г. при работе с исследовательской яхты, оборудованной ADCP (см. рис. 7). При выходе из бухты Витязь во время отлива была встречена мощная струя течения, движущаяся вдоль береговой черты на северо-запад со скоростью 0.7-0.8 м/с. По глубине это течение простипалось от поверхности до слоя пикноклина на горизонте 19 м. Под слоем скачка наблюдалось противотечение юго-западной направленности со скоростью 0.2-0.3 м/с. Простая оценка показала, что в этом случае выполнялся критерий Майлса, т.е. число Ричардсона было заведомо меньше 1/4. Следовательно, на границе слоев должна была быть вихре-волновая неустойчивость, что мы и наблюдаем на рис. 7 (вверху). Слой интенсивного течения «подстилается» пакетом из 5 разрушающихся внутренних волн с высотами 10-12 м и длинами 60-80 м. Поверхностное проявление этого процесса – уединенная сливковая полоса, совпадающая с передним фронтом струи интенсивного течения было ясно различима на морской поверхности моря (см. рис. 8). Фронт струи интенсивного течения проявился в толще воды в виде узкой вертикальной полосы усиленного обратного рассеяния. Обращает на себя внимание также усиление сигнала обратного рассеяния акустического сигнала в области цуга обрушающихся внутренних волн (billows).

## **Наблюдения в Белом море. Сулои и границы, очерченные на поверхности полосами пены**

Наконец рассмотрим несколько примеров сулоинных полос из наблюдений, проведенных на Белом море в августе 2006 г., во время 80-го рейса НИС «Профессор Штокман». Ранее, более двадцати лет назад Институт океанологии провел специальную экспедицию по изучению сулоя Белого моря (Баренблatt и др., 1986; Баренблatt и др., 1986а; Лейкин, 1987). Был изучен фронтальный сулой в мелководном проливе, генерировавшийся с полусуточной периодичностью сильным приливным течением. Были измерены спектры морского волнения в зоне сулоя, и было показано, что для зон толчей и обрушиваний в интервале частот от 0,5 до 1,5-2 Гц форма спектра близка к равновесному спектру Филлипса, т.е. спектр спадает с частотой по закону «-5».





*Рис. 7. Струя интенсивного вдольберегового течения, создающая сдвиговую неустойчивость течений, и генерирующая пакт обрушающихся внутренних волн: вверху – картина объемного обратного рассеяния; внизу – распределение модуля течения в толще воды на разрезе (более сильным течением соответствуют красно-желтые тона палитры)*



*Рис. 8. Уединенный слик, встреченный при пересечении фронта интенсивного течения с развитой вихревой волновой неустойчивостью. Выход из бухты Витязь 17 сентября 2004 г., Японское море*

Несколько раз при движении судна в тихую погоду в Двинском заливе мы пересекали четко обозначенные на морской поверхности полосы пены, которые могут рассматриваться как следы от прошедших с приливным течением сулоев (рис. 9 и 10). Непосредственно сулой был встречен нами в проливе Восточная Салма. Сулой был на стадии развития и его фронт не состоял из волн обрушивания, а только был обозначен интенсивной рябью (рис. 11). На завершающем этапе экспедиции, когда судно снова было в Двинском заливе и двигалось параллельно одновременно и береговой черте и границе фронта зарождающегося сулоя, представилась возможность визуально наблюдать развитие сулоя во времени. В этом случае приливное течение сформировало на поверхности сначала вытянутую на многие километры узкую зону ряби ориентированную почти параллельную береговой черте, которая продвигаясь к берегу, постепенно превращалась в образование типа невысокой уединенной поверхностной волны с широким фронтом, чья высота постепенно нарастала. С определенного момента на широком гребне сулоя стали появляться признаки обрушений в виде почти периодически расположенных по фронту сулоя «барашков» (см. рис. 12).

Далее мы не имели возможности продолжить наблюдение за процессом из-за смены курса судна и удаления от сулоя, но по нашему мнению полученные наблюдения вполне доказательны, чтобы указывать на сулой как фактор, порождающий часто встречающиеся на поверхности Белого моря пенные полосы.



Рис. 9. Полоса пены в Двинском заливе. Вид вблизи



Рис.10. Полосы пены в Двинском заливе Белого моря



Рис. 11. Снимок сулоя в проливе Восточная Салма, Белое море (август 2006 г.)



Рис. 12. Сулоя в Двинском заливе. Заметна периодичность «барабашков» по фронту сулоя

#### **Фронтальный раздел между морскими и прибрежными опресненными водами.**

В Двинском заливе нами были встречены фронтальные разделы, имеющие характерный вид полосы, разделяющих два полупространства – одно с выглаженной поверхностью воды (со стороны реки) и другое – покрытое рябью (с морской стороны) (см. рис. 13). Проведенная регистрация в режиме буксировки параметров приповерхностного слоя (данные В.Т. Паки и В.И. Баранова) выявила, что видимой на поверхности моря резкой поверхностью полосе соответствует резкое (на 2°C) похолодание воды, одновременно с увеличением солености на 4 %. Отметим, что на поверхности фронтальной полосы были скопления мелкого мусора. В момент нашего прохода фронтальный раздел не сопровождался сулой, однако можно предположить, что в приливную фазу на этом разделе генерируется фронтальный суль.



Рис. 13. Снимок в Двинском заливе Белого моря (август 2006 г.). Фронтальная зона разделяет распределившую рекой воду залива (справа) и морскую воду (слева)

## Заключение

Непосредственной причиной появления сливковых и сулойных полос во всем перечисленном многообразии ситуаций служат генерируемые в приповерхностном слое области схождения и расхождения течений. Причем в случае относительно чистой морской воды (с малым содержанием поверхностно-активных веществ) дивергенция течений ведет к образованию на поверхности моря областей ослабленного поверхностного волнения или сливковых областей, а конвергенция – к усилению поверхностного волнения.

На основе изложенного материала в этой и предыдущей статье (Серебряный, 2012) сформулируем следующие выводы:

1. сходные по виду поверхностные проявления процессов, протекающих в толще моря, могут иметь разную природу;
2. поверхностные проявления внутренних волн лучше изучены, чем поверхностные проявления другого происхождения;
3. поверхностные проявления внутренних волн в замкнутых и полузамкнутых морях наблюдаются преимущественно в виде сливков, в то время как для интенсивных внутренних волн открытого океана характерны сулои;
4. происхождение чередующихся на морской поверхности полос сливков и усиленного волнения можно однозначно связывать с внутренними волнами, или с вихрями, если полосы образуют спиралевидные или грибовидные структуры;
5. происхождение одиночных полос на морской поверхности связано с многими причинами, среди них – единственные внутренние волны; встречные течения; внутренние боры; фронт акватории, где развита вертикальная сдвиговая неустойчивость течений; локальные гидрологические фронты в прибрежной зоне различного происхождения.
6. для более эффективного использования космических радиолокационных снимков необходимо проводить дальнейшие исследования поверхностных проявлений гидрофизических процессов в море, в том числе в режиме подспутниковых измерений.

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” в период с 2003 по 2006 гг.

## Литература

1. Баренблатт Г.И., Лейкин И.А., Казьмин А.С. и др. Сулой в Белом море. 1. Наблюдения сuloя и его связь с приливным течением // Морск. гидрофиз. журн. 1986. Т. 2. № 2. С. 49-53.
2. Баренблатт Г.И., Лейкин И.А., Казьмин А.С. и др. Сулой в Белом море. 2. Связь сuloя с локальным рельефом дна и измерения волнения // Морск. гидрофиз. журн. 1986. Т. 2. № 5. С. 47-51.
3. Иванов В.А., Лисиченок А.Д., Серебряный А.Н., Тарасов Л.Л. Внутренние боры в прибрежной зоне Черного моря // Акустика океана. Доклады 11-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2006. С. 330-335.
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. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648-656.
6. Лаврова О.Ю. Слики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. №.2. С. 118-123.
7. Лейкин И.А. Исследование спектров морского волнения на горизонтально-неоднородном течении в зоне сuloя // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № 1. С. 52-58.
8. Серебряный А.Н. Слико- и сuloеобразующие явления в море. Внутренние волны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №2. С.275-286.
9. Серебряный А.Н., Иванов В.А. Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика (в печати).
10. Серебряный А.Н., Лаврова О.Ю. Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. №.2. С. 206-215.
11. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Явления на поверхности океана по визуальным наблюдениям // Океанология. 1986. Т. 26. №1. С.5-14.

## Slick- and suloy generating processes in the sea. Fronts of different origin

A.N. Serebryany<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Andreyev Acoustics Institute,  
117036 Moscow, Shvernik Str. 4  
E-mail: serebryany@hotmail.com

<sup>2</sup> Space Research Institute, RAS,  
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.

Review on slick- and suloy generating processes in the sea, based on author's 30-year experimental experience is presented. The experimental evidences of connection of variety of fronts with their surface manifestations are considered. Set of examples from observations in the Black and White Sea as well in the Sea of Japan is demonstrated.

**Keywords:** slicks, suloys, fronts, internal waves, internal bores, currents, fields of divergence and convergence, shelf, ADCP.