

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

© 2011 г. О. Ю. Лаврова^{1*}, М. И. Митягина¹,
К. Д. Сабинин^{1,2}, А. Н. Серебряный^{1,2}

¹Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

²Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева, Москва

*E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.06.2010 г.

Представлены результаты спутниковых наблюдений поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море. Высказывается предположение, что возможным механизмом генерации выявленных внутренних волн являются одноузловые сейши, узловая линия которых находится вблизи Апшеронского порога. Определены основные характеристики внутренних волн в Каспийском море, имеющие вид классических цугов солитонов. Выявлена сезонная зависимость в поверхностных проявлениях внутренних волн. Сделаны оценки скоростей горизонтальных течений в солитонах у поверхности, которые составляют ~ 0.2 м/с, что вполне достаточно для модуляции ветровой ряби.

Ключевые слова: внутренние волны, спутниковые изображения, радиолокация морской поверхности, сейши, Каспийское море

ВВЕДЕНИЕ

Использование данных спутникового дистанционного зондирования (ДЗ) морской поверхности существенно расширило наше представление о таком важном явлении, как внутренние волны (ВВ) в океане. В последнее время удалось выявить поверхностные проявления ВВ не только в хорошо изученных и подробно описанных в научной литературе районах Мирового океана, но и в замкнутых бассейнах: морях и больших озерах. Наблюдаемые ВВ в бесприливном бассейне существенно менее интенсивны, чем их аналоги в океане или морях с приливами, однако более разнообразны с точки зрения механизмов своего происхождения. Начиная с 70-х годов прошлого века, в шельфовых зонах Каспийского и Черного морей на протяжении многих лет проводились длительные и детальные исследования ВВ с помощью контактных методов (Коняев, 1975; Иванов и др., 1981; Иванов, Серебряный, 1982, 1983, 1985), в частности, с применением пространственных антенн распределенных датчиков температуры (Коняев, Сабинин, 1973), которые позволили не только подробно исследовать пространственно-временные характеристики волн, но также и изучить процессы, ответственные за генерацию цугов интенсивных ВВ. Главной особенностью поля ВВ в бесприливном море является относительно невысокий уровень амплитуд ВВ по сравнению со своими аналогами в океане. Эта особенность

впервые была продемонстрирована в работе (Иванов, Серебряный, 1982) путем сравнения измеренных частотных спектров короткопериодных ВВ Черного моря (измерения проводились на шельфе и в глубоководной части моря) с модельным спектром Гарретта–Манка (Garrett, Munk, 1972). Другая выявленная особенность – широкое распространение эффектов нелинейности во ВВ на шельфе бесприливного моря, аналогично тому, как это имеет место в море с приливами (Серебряный, 1990, 1993). Эффекты нелинейности (вертикальная и горизонтальная асимметрия профилей волн), а также “солитоноподобность” волн проявляются в интенсивных волнах, входящих в цуги, генерируемых при определенных обстоятельствах.

“Определенные обстоятельства” представляют собой совокупность процессов, ответственных за генерацию интенсивных ВВ в бесприливном море. Эти процессы были выявлены путем длительных наблюдений, проведенных со стационарных платформ в Каспийском и Черном морях. Эффективным механизмом генерации цугов интенсивных ВВ в бесприливном море служат выходы на шельф длинных ВВ – внутренних сейш и квазиинерционных ВВ (Иванов и др., 1981; Иванов, Серебряный, 1985), появляющихся, как правило, в послештормовую погоду. Выходящие на шельф длинные ВВ в бесприливном море играют ту же роль, что и внутренние приливы на шельфе океана. По мере распространения к

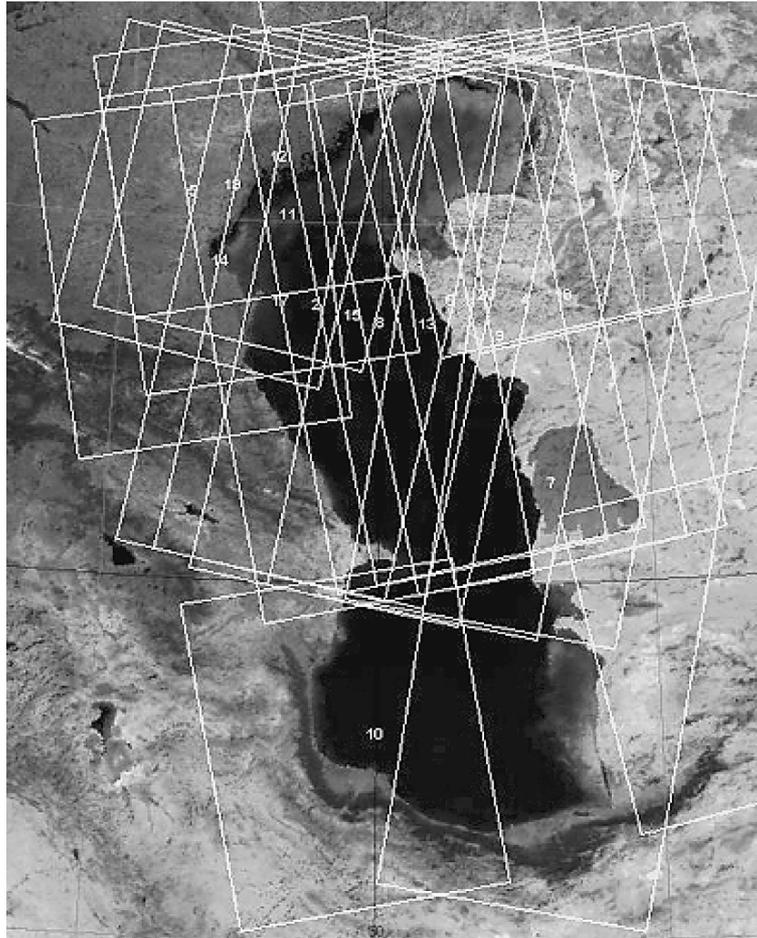


Рис. 1. Покрытие фреймами ASAR Envisat Wide Swath в мае 2009 г.

берегу, они сначала претерпевают нелинейную эволюцию, превращаясь из квазисинусоидальных в нелинейные волны, а затем генерируют пакеты солитоноподобных ВВ. В условиях узкого приглубого шельфа генерация волн максимальных амплитуд связана с подходом в прибрежную зону локальных фронтов сгонно-нагонного происхождения, наблюдающихся в периоды снятия ветрового напряжения и восстановления нарушенной сгоном или нагоном стратификации (Иванов, Серебряный, 1985; Власенко и др., 1997). В условиях широкого шельфа возможна генерация интенсивных ВВ движущейся поверхностной интрузией распресненных прибрежных вод (Иванов, Серебряный, 1983; Kao et al., 1978).

Изучению поверхностных проявлений ВВ в Черном море посвящена работа (Лаврова и др., 2009), в которой описан еще один новый выявленный механизм генерации ВВ в бесприливных морях, а именно генерация волн нестационарным фронтом (движущимся и/или подверженным инерционным колебаниям), связанным с прохождением холодного вихря.

В настоящей работе рассматриваются проявления ВВ в бесприливном Каспийском море.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Лаборатория аэрокосмической радиолокации Института космических исследований (ИКИ РАН) с февраля 2009 г. по настоящее время проводит оперативный мониторинг морской поверхности Каспийского моря на основе данных радиолокатора ASAR, установленного на ИСЗ Envisat и сканирующего радиометра ЕТМ+ ИСЗ Landsat-7. РЛИ были получены в подавляющем большинстве случаев в широкой полосе обзора (WSM) 430×400 км, с разрешением в точке 75 м на горизонтальной поляризации излучения и приема сигнала. На рис. 1 представлен пример покрытия акватории Каспийского моря фреймами ASAR Envisat WSM изображений в мае 2009 г. В остальные месяцы 2009 г. картина покрытий была примерно такой же, т.е. практически отсутствовали данные по Южному Каспию, что, возможно, сказалось на полученных результатах. С мая по сентябрь 2009 г., в период, благоприятный для фор-

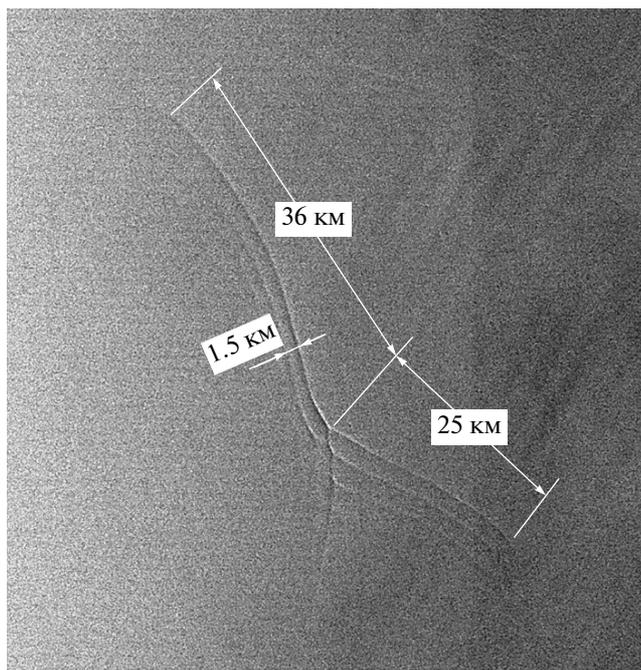


Рис. 2. Характерные пространственные характеристики ППВВ в Каспийском море. Фрагмент ASAR Envisat изображения (65×65 км), полученного 24.07.2009 г. в 18:23 UTC с разрешением 75 м.

мирования ВВ, было получено 100 радиолокационных изображений (РЛИ), 28 из которых содержали РЛ-образы поверхностных проявлений ВВ. Данные сканирующего радиометра ЕТМ + ИСЗ Landsat-7 были получены с открытого Интернет-ресурса <http://glovis.usgs.gov>. Данный сенсор функционирует в восьми каналах: (1) 0.450–0.515 мкм; (2) 0.525–0.605 мкм; (3) 0.630–0.690 мкм; (4) 0.760–0.900 мкм; (5) 1.550–1.750 мкм; (6) 10.400–12.500 мкм; (7) 2.080–2.350 мкм; (8) 0.520–0.900 мкм. Разрешение 1–5 и 7 каналов составляет 30 м, канала 6–60 м, монохроматические данные канала 8–15 м. Для решения задачи выявления поверхностных проявлений внутренних волн (ППВВ) использовались композиты каналов 3, 2 и 1. В рассматриваемый период (с мая по сентябрь 2009 г.) было проанализировано 21 изображение ЕТМ + ИСЗ Landsat-7, на четырех из них выявлены ППВВ.

Кроме того, для интерпретации РЛИ привлекались данные сенсоров MODIS ИСЗ Aqua/Terra, MERIS ИСЗ Envisat и AVHRR ИСЗ NOAA оптического и ИК-диапазонов, несущие информацию о полях температуры морской поверхности и мезомасштабной динамике вод. Карты температуры поверхности моря, а также данные прибрежных метеостанций использовались для выявления возможных зон апвеллинга, релаксация которого, как было указано выше, является одним из механизмов генерации ВВ в непривливых морях.

Поскольку контактных подспутниковых измерений с судна летом 2009 г. не проводилось, то для оценки гидрологической обстановки использовались данные контактных измерений температуры, солености, плотности морской воды, накопленные за многие десятилетия на кафедре океанологии МГУ им. М.В. Ломоносова и любезно предоставленные нам для анализа доцентом кафедры В.С. Тужилкиным.

Всего за время наблюдений было получено и обработано более 500 спутниковых изображений морской поверхности исследуемых районов. Большой объем экспериментального материала позволил не только впервые обнаружить ППВВ в Каспийском море, но и восстановить картину их пространственной и временной изменчивости. Кроме того, комплексное использование данных, различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК-данные), пространственному разрешению и ширине полосы съемки дало уникальную возможность восстановить целостную картину метеорологических и гидродинамических явлений и процессов в исследуемом районе. На основе анализа всей совокупности параметров, полученных из данных ДЗ, определены возможные факторы, приводящие к генерации наблюдаемых ВВ непривливого происхождения, и сделаны оценки пространственных характеристик выявленных ВВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики выявленных ВВ

ППВВ в Каспийском море, выявленные на спутниковых изображениях, отличаются большим разнообразием. На одном кадре РЛИ (430×400 км) часто выявляется несколько цугов ВВ, что свидетельствует о наличии нескольких мест генерации, расположенных на относительно небольшом расстоянии. ППВВ, наблюдаемые в Каспийском море, имеют вид классических цугов солитонов. Для взаимодействующих цугов наблюдаются характерные для нелинейных взаимодействий искривления фронтов, фазовые сдвиги и пр. Как правило, цуги распространяются к берегу и наблюдаются над глубинами 50–200 м. Длина ведущей волны в цуге может достигать 1.5 км, а протяженность фронтов до 50 км (рис. 2). Ширина цуга зависит от количества волн, входящих в него, в среднем она составляет 2.5 км, но может достигать и 6 км. Основные характеристики ППВВ, выявленных на спутниковых изображениях, описаны в таблице.

Достаточно часто фронты в цуге представляют собой концентрические дуги, что дает возможность с определенной точностью выявить район генерации данного цуга. Как правило, это неод-

Характеристики ВВ, выявленных на спутниковых изображениях

Дата	Время, UTC	Число пакетов на снимке	Местоположение пакетов	Глубина места, м	Ширина пакета, м	Максимальная длина волны, м	Число волн в пакете
22.08.2003	06:45	>6	38°22' с.ш.; 51°58' в.д.	80	различная	1500	различное
04.07.2007	18:26	3	40°00'–41°00' с.ш.; 50°07'–52°00' в.д.	140–200	3500; 1900; 1500	1500; 1000; 600	3; 5; 3
21.05.2009	18:33	3	37°55'–38°30' с.ш.; 49°01'–49°17' в.д.	40–80	1200; 1500; 1400	450; 375; 300	6; 9; 7
22.05.2009	06:45	4	40°12'–41°40' с.ш.; 51°25'–52°07' в.д.	70–180	3800; 2250; 3008	1200; 750; 1300	5; 7; 5;
28.05.2009	18:14	3	39°55'–40°18' с.ш.; 51°40'–51°59' в.д.	80	1300	220	4; 8; 7
31.05.2009	07:04	>12	39°20'–40°45' с.ш.; 51°10'–52°06' в.д.	70–200	различная	750	различное
16.06.2009	18:17	1	40°02' с.ш.; 51°50' в.д.	80	1000	1000	2
26.06.2009	06:45	1	39°47' с.ш.; 52°26' в.д.	50	3340	900	7
02.07.2009	18:14	3	39°45'–40°15' с.ш.; 51°53'–52°30' в.д.	50	2260; 1200; 1900	900; 1200; 675	4; 2; 3
05.07.2009	18:20	3	40°10'–40°25' с.ш.; 52°00'–52°20' в.д.	40–70	1560; 1600; 1200	800; 800; 670	4; 5; 3
18.07.2009		1	40°26' с.ш.; 52°25' в.д.	40	1030	630	4
24.07.2009	18:23	3	39°42'–41°13' с.ш.; 51°07'–52°00' в.д.	60–150	6320; 720; 5000	900; 720; 2200	10; 2; 3;
25.07.2009	06:33	1	41°10' с.ш.; 51°43' в.д.	170	3600	3600	2
27.07.2009	18:29	1	40°08' с.ш.; 52°09' в.д.	50	1200	670	3
28.07.2009	06:39	1	39°50' с.ш.; 52°02' в.д.	70	4300	1200	9
31.07.2009	06:45	2	39°30' с.ш.; 52°05' в.д. 39°29' с.ш.; 52°20' в.д.	50–100	4050; 4725	750; 975	6; 9
06.08.2009	18:14	>6	40°13'–43°15' с.ш.; 50°49'–52°12' в.д.	30–150	различная	1200	различное
09.08.2009	18:20	8	39°31'–44°09' с.ш.; 50°11'–52°06' в.д.	40–100	различная	825	различное
12.08.2009	18:26	4	39°31'–44°09' с.ш.; 50°11'–52°06' в.д.	40–70	2775; 2550	750; 1100; 825	4; 5; 5; 3
15.08.2009	18:31	1	42°58' с.ш.; 50°52' в.д.	70	3900	675	6
16.08.2009	06:42	2	40°14' с.ш.; 52°25' в.д. 41°01' с.ш.; 52°27' в.д.	50	3525; 3375	825; 675	7; 6
25.08.2009	18:17	2	42°23' с.ш.; 52°10' в.д.; 43°18' с.ш.; 50°55' в.д.	200; 80	2770; 1350	450; 375	8; 5
28.08.2009	18:23	5	39°15' с.ш.; 51°51' в.д.; 43°23' с.ш.; 50°52' в.д.	100; 60	различная	450; 1125	различное
31.08.2009	06:36	1	41°59' с.ш.; 52°05' в.д.	60	2250	600	5

нородности рельефа, банки, резкие поднятия дна, все они характерны именно для восточного склона Среднего Каспия. На рис. 3 представлен фрагмент изображения, полученного в результате композиции каналов 3, 2 и 1 ETM + ИСЗ Landsat-7. Съемка проводилась в области солнечного блика, и в отличие от РЛИ, на которых передний фронт проявляется в виде яркой светлой полосы, что со-

ответствует усилению рассеяния РЛ-сигнала и соответственно сулою (Булатов и др., 2003), на данном оптическом изображении ППВВ проявляются в виде темных полос. На указанном фрагменте хорошо различаются несколько цугов, распространяющихся под углом друг к другу. Расстояние между цугами А и В, В и С составляет соответственно 14 и 13 км. Расчеты показывают, что дан-

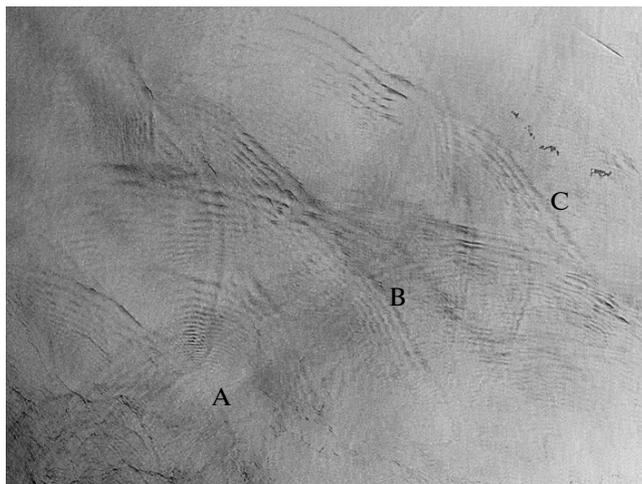


Рис. 3. Множественные проявления пакетов ВВ, распространяющихся в виде концентрических окружностей. Средняя длина волны – 750 м. Буквами отмечены цуги, для которых вычислялась скорость их распространения. Фрагмент Landsat-7 ETM+ изображения (42×35 км), полученного 31.05.2009 г. с разрешением 30 м. Композиция каналов 3, 2 и 1.

ные цуги распространяются со скоростью примерно 50 см/с.

Близкие оценки скорости распространения цугов ВВ получены и для случая, представленного на рис. 4а. Данное РЛИ получено с высоким пространственным разрешением (12.5 м) на вертикальной поляризации излучения и приема. На его увеличенном фрагменте (рис. 4б) хорошо видно взаимодействие трех цугов солитонов.

Сезонная зависимость районов проявлений ВВ в Каспийском море в 2009 г.

Проведенный в 2009 г. спутниковый мониторинг акватории Каспийского моря показал, что все многочисленные поверхностные проявления цугов ВВ зарегистрированы в период с третьей декады мая до конца августа. Первый случай ППВВ выявлен 21 мая в юго-западной части Каспия, вблизи м. Лимир; последний раз в сезоне ППВВ наблюдались 28 августа в районе Казахского залива. Прослеживается четкая сезонная зависимость локализации ВВ: если в мае—начале июня ВВ наблюдались в южном Каспии, то по мере прогрева воды в течение лета места зарождения и распространения ВВ сдвигались на север. Большая часть ППВВ была выявлена в восточной части Каспийского моря севернее Апшеронского порога в районе 40° с.ш., 52° в.д. (см. таблицу). На рис. 5 схематично представлены основные районы наблюдений ППВВ в разные периоды.

Анализ архивных РЛ-данных, полученных в 2003 и 2007 гг., и оперативных данных за май—начало июня 2010 г. показал, что ППВВ наблюдались практически в тех же районах, что и в 2009 г. Время массового проявления ВВ – июнь—первая половина июля – связано, на наш взгляд, с формированием сезонного термоклина. В Среднем и Южном Каспии в летний период величина солености относительно постоянна по глубине, поэтому в первом приближении можно считать, что градиент плотности пропорционален только градиенту температуры. Со второй половины июля происходит сильный прогрев воды до больших глубин, скачок термоклина неярко выражен и прижат ко дну. Как показывают контактные из-

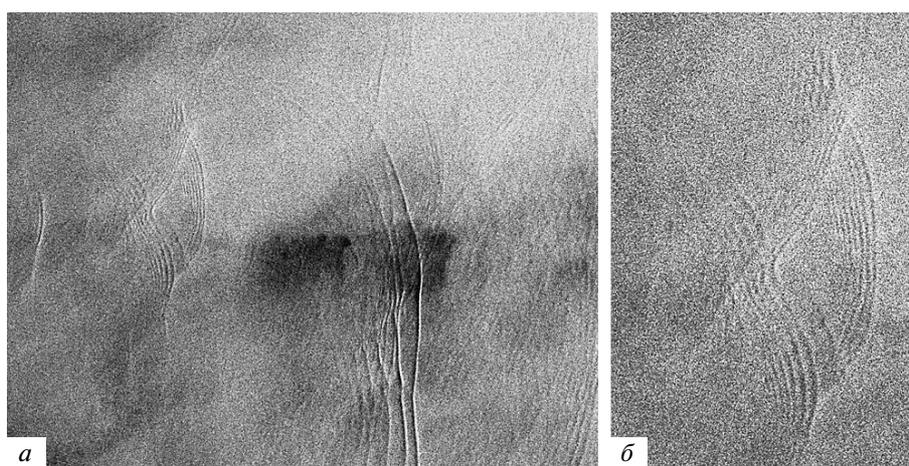


Рис. 4. Примеры поверхностных проявлений нелинейных взаимодействий цугов ВВ в Каспийском море: а – фрагмент ASAR Envisat изображения (50×37 км), полученного 22.08.2003 г. в 06:47 UTC с разрешением 12.5 м; б – увеличенный фрагмент (15×16 км) данного РЛИ, демонстрирующий взаимодействие трех цугов солитонов.

мерения, проводившиеся в данном районе осенью 1972 и летом 1973 гг. во второй половине лета и осенью, ВВ либо совсем отсутствовали, либо имели сравнительно небольшую высоту (Коняев, 1975). Соответственно нет и поверхностных проявлений, которые можно было бы обнаружить на спутниковых изображениях.

Сейши – возможный механизм генерации выявленных ВВ

Каспийское море, крупнейшее в мире замкнутое озеро-море. Оно, как и Черное море, может быть отнесено к бесприливным морям. На побережье высота прилива не превышает 12 см, а в открытом море – 2 см. Как было отмечено выше, зарождение ВВ в морях со слабыми приливами возможно при протекании активных динамических процессов, связанных с возникновением и релаксацией прибрежного апвеллинга, вихрями различных масштабов, сгонно-нагонными явлениями, осцилляциями с инерционной частотой гидрологических фронтов, сейшами и внутренними борами. Летний апвеллинг имеет большое значение для Каспийского моря, в корне меняя динамические процессы на акватории (Архипкин, 1990). Он наблюдается ежегодно вдоль всего восточного побережья Среднего Каспия и частично проникает даже в Южный Каспий. Подъем холодных глубинных вод происходит с различной интенсивностью в результате воздействия преобладающих в летний сезон юго-восточных ветров. Ветер данного направления вызывает отток теплых поверхностных вод от берега и подъем более холодных вод из промежуточных слоев. Как следствие, на поверхности воды наблюдается понижение температуры (7° – 15° С). Горизонтальные градиенты температуры достигают 2.3° С на поверхности и 4.2° С на глубине 20 м. Очаг апвеллинга постепенно смещается с 41° – 42° с.ш. в июне к 43° – 45° с.ш. в сентябре (Архипкин, 1990).

Анализ данных прибрежных метеостанций (Баку и Красноводска) и карт фактической погоды (<http://cliware.meteo.ru/meteo/>) показал, что в периоды, предшествующие проявлениям ВВ, не было условий для возникновения значительного апвеллинга, и на картах поверхностной температуры, построенных по данным MODIS ИСЗ Aqua/Terra и AVHRR ИСЗ NOAA (<http://smis.iki.rssi.ru/archive/>), он не наблюдался. Наиболее вероятным механизмом, ответственным за генерацию выявленных на спутниковых изображениях ВВ, на наш взгляд, являются сейши.

Сейши – свободные стоячие волны, возникающие в водоемах под действием внешних сил, – представляют собой характерный вид колебательных движений. В Каспийском море они образуются вследствие быстрых изменений атмосферного давления или ветра над различными участками по-

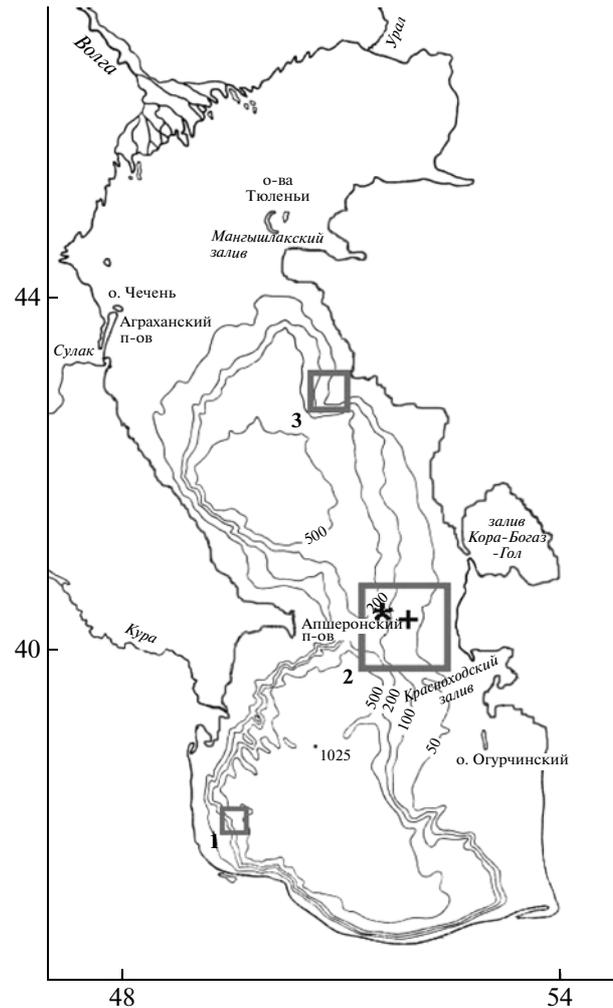


Рис. 5. Карта-схема Каспийского моря. Квадратами отмечены районы ППВВ, выявленных на спутниковых изображениях в 2009 г.: 1 – в конце мая; 2 – в июне–начале августа; 3 – в августе. Крестиком отмечено положение гидрологической станции 1976 г., звездочкой – 1977 г.

верхности водоема. Размах сейшевых колебаний, по наблюдениям в Баку и Махачкале, может достигать до 70 см. Изучение сейшевых колебаний в Каспийском море проводилось как путем статистического анализа наблюдений за уровнем моря в разных пунктах, так и с помощью теоретического моделирования (Блатов и др., 1990). Сопоставление обоих методов позволило выделить ряд сходных, обоснованных результатов. Показано, что независимые сейшевые колебания возникают не только в Среднем и Южном Каспии, которые разделены подводным Апшеронским порогом, но и в крупных заливах. Выделены доминирующие периоды 8.5–8.7 ч и 4.2–4.6 ч, обусловленные наличием продольных сейш всего Каспийского моря (одно- и двухузловой соответственно). Узловая линия продольной одноузловой сейши глубоко-

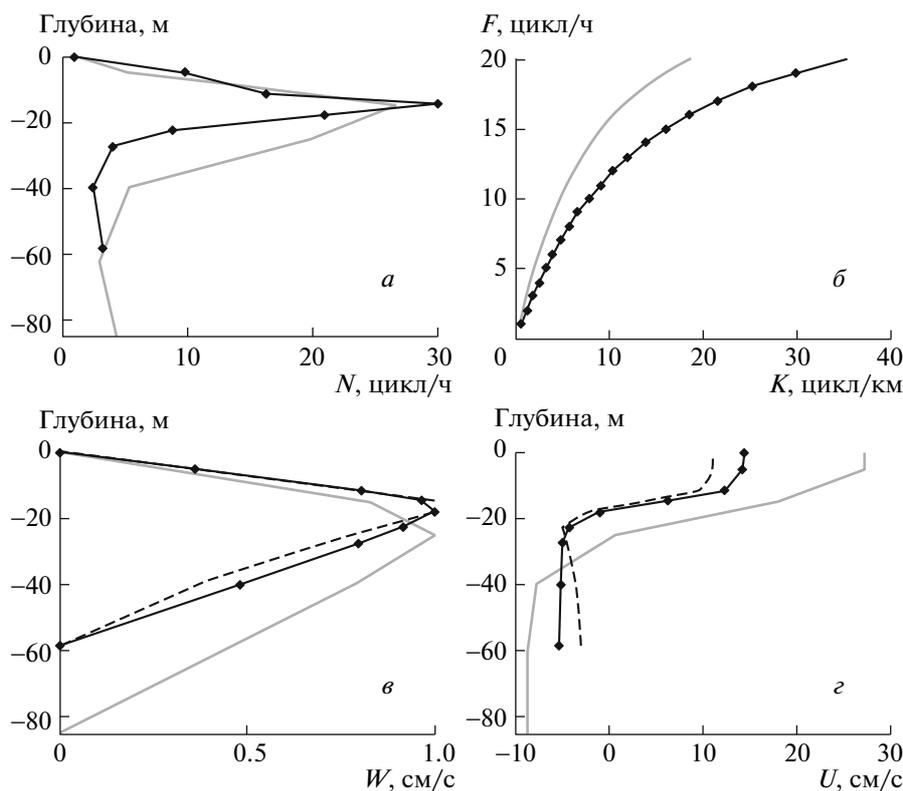


Рис. 6. Результаты расчета параметров ВВ для плотностной стратификации в 1976 г. (линия с маркерами и штрихпунктирная линия) и 1977 г. (серая сплошная линия): *а* – профили частоты плавучести; *б* – дисперсионные кривые ВВ низшей моды; *в* – сплошные кривые: профили амплитуд вертикальных скоростей для ВВ с частотой 0.12 ц/ч, пунктир: то же для частоты 5 ц/ч (максимальные скорости приняты равными 1 см/с); *з* – профили соответствующих горизонтальных скоростей.

водного Каспия проходит примерно через Апшеронский порог. Можно предположить, что интенсивные сейшевые течения, натываясь на крутой склон, генерируют распадающиеся на цуги солитонов колебания термоклина подобно тому, как это происходит под воздействием приливных течений над краем океанских шельфов.

Оценка возможности проявлений ВВ на морской поверхности

Для определения более детальных характеристик выявленных ВВ из имеющихся архивных данных судовых гидрологических измерений были выбраны данные двух станций. Первая станция, № 760722014, проводила измерения 22.07.1976 г. в точке с координатами 40°10' с.ш. и 52°00' в.д.; глубина места 57 м (на рис. 5 отмечена крестиком). Вторая станция, № 770818, проводила измерения 18.08.1977 г. в точке с координатами 40°16' с.ш. и 51°40' в.д.; глубина места 112 м (на рис. 5 отмечена звездочкой). Эти станции расположены в районе, где наиболее часто выявлялись ППВВ. По данным этих гидрологических станций были рассчитаны профили частоты плавучести (рис. 6а),

дисперсионные соотношения (рис. 6б), профили амплитуд вертикальной (рис. 6в) и горизонтальной (рис. 6з) орбитальных скоростей низкочастотных ВВ, которым должны соответствовать профили внутренних солитонов в приближении уравнения Кортевега де Вриза (КдВ), а также фазовые скорости этих волн. Все оценки выполнялись в предположении, что генерация ВВ происходит под действием сейшевых колебаний с характерным для Среднего Каспия периодом 8.5–9 ч. Рассчитанная фазовая скорость низкочастотной (восьмичасовой) ВВ для более глубоководной станции, выполненной вблизи края шельфа в 1977 г., равная 0.69 м/с, оказалась заметно выше, чем скорость над более мелководным участком в 1976 г., равная 0.44 м/с. Полагая, что гидрологические условия в этой части Каспия в 1976 и 1977 гг. были более или менее одинаковыми, можем считать, что средняя скорость движения низкочастотных ВВ на трассе должна быть около 0.5 м/с, что близко к оценке, полученной по космическим изображениям поверхностных проявлений пакетов коротких ВВ. Последние напоминают хорошо известные проявления внутренних соли-

тонов на океанских шельфах (Бондур, 2004; Sabinin, Serebryanu, 2005).

Амплитуды горизонтальных скоростей, показанных на рис. 6г, даны для случаев, когда максимальные вертикальные скорости условно принимаются равными 1 см/с.

Приведенные на рис. 6 результаты кинематических расчетов не позволяют судить о реальных значениях скоростей, но их можно приблизительно оценить исходя из следующих соображений. Во внутренних солитонах отношение горизонтальной орбитальной скорости U к фазовой C в верхнем слое составляет обычно несколько десятых долей (Sabinin, Serebryanu, 2005). Отсюда, если $U/C = 0.2-0.3$, то в глубоководной части горизонтальные течения в солитонах должны достигать у поверхности ~ 0.2 м/с, а в более мелководной ~ 0.1 м/с, что вполне достаточно для модуляции ветровой ряби, (Бондур и др., 2010). Модуляция коротких гравитационно-капиллярных волн приводит к модуляции отраженного РЛ-сигнала, что позволило выявить ППВВ из космоса.

Можно получить представление и о горизонтальных течениях в коротких волнах, следующих за солитонами и хорошо заметных на снимках (рис. 3, 4) в виде квазипериодических структур, если задаться типичной высотой этих волн в 2–3 м (Иванов, Серебряный, 1985). Частота этих “хвостовых” волн со средней длиной около 300 м равна 5 ц/ч (рис. 6б), а профиль амплитуд вертикальных смещений в верхних слоях моря практически не отличается от профиля низкочастотных волн (рис. 6в) при меньшей фазовой скорости $C = 42$ см/с. Из уравнения неразрывности следует, что горизонтальные орбитальные течения равны фазовой скорости, умноженной на вертикальный градиент амплитуды A колебаний водных слоев: $U = C dA/dz$. Если эта амплитуда возрастает в верхнем слое от 0 до 2 м (на глубине 15 м), то $dA/dz = 0.133$ и $U = 6$ см/с, что также достаточно для того, чтобы и “хвосты” солитонов проявлялись на спутниковых РЛИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

РЛИ ASAR Envisat и данные сканирующего радиометра ETM + ИСЗ Landsat-7 позволили выявить и детально исследовать ППВВ в Каспийском море. В отсутствие существенных приливов основным механизмом, приводящим к генерации данных ВВ, являлись сейшковые колебания с частотой 8.5–9 ч. В отличие от ППВВ в бесприливном Черном море, ППВВ на Каспии отличаются большими пространственными масштабами, частотой проявления, имеют вид классических цугов солитонов и их взаимодействия обладают эффектами нелинейности.

Наблюдается сезонная неоднородность в проявлениях ВВ на поверхности, связанная, по всей

видимости, с положением слоя скачка плотности. По мере прогрева верхнего слоя воды и заглуждения термоклина районы локализации ВВ сдвигаются на север. Выделены три основных района в зависимости от сезона: юго-западная часть Каспия, вблизи м. Лимир (конец мая); восточная часть Каспия от м. Бекдаш до п-ова Челекен (июнь–июль); восточная часть Каспия от Актау до Казахского зал. (август). Проявление ВВ именно в восточной части Среднего Каспия вызвано тем, что восточный шельф более пологий по сравнению с западным и более широкий.

Скорость распространения выявленных нелинейных цугов солитонов в Каспийском море оценивалась как по спутниковым изображениям, так и по данным гидрологических станций. Наблюдается хорошее соответствие полученных результатов: и в том и другом случае скорость составляет примерно 50 см/с.

Проведено исследование и межгодовой изменчивости ППВВ в Каспийском море. Проанализированы архивные РЛ-данные за 2003 и 2007 гг., а также оперативные спутниковые данные за 2010 г. (май–начало июня). Выявлено, что пространственные характеристики (длины волн и протяженность фронтов, количество волн в цуги и др.) остаются постоянными. Изменяются районы локализации пакетов. В августе 2003 г. ППВВ встречались существенно южнее, чем в тот же период 2009 г. А ППВВ в начале лета 2010 г. обнаружены над западным шельфом севернее Апшеронского п-ва. Следует отметить, что в данном районе ВВ регулярно выявлялись при контактных измерениях (Коняев, 1975).

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ: грант 08-05-00831-а. Спутниковые РЛ-данные предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта Bear 2775 и С1Р.6342. Авторы благодарны В.С. Тужилкину (кафедра океанологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова) за предоставленные данные контактных измерений гидрологических параметров в Каспийском море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипкин В.С. Особенности структуры и динамики прибрежного апвеллинга в Каспийском море // Каспийское море. Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. С. 61–74.
- Блатов А.С., Ведев Д.Л., Косарев А.Н. О сейшах в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 1990. № 8. С. 109–114.
- Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. М.: Наука, 2004. С. 55–117.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых за-

- глубленной плавучей струей. Ч. 3. Поверхностные проявления внутренних волн // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 1–10.
- Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.Н., Шуган И.В. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // УФН. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87.
- Власенко В.И., Иванов В.А., Красин И.Г., Лисиченок А.Д. Генерация интенсивных короткопериодных внутренних волн в шельфовой зоне Крыма во время протекания прибрежного апвеллинга // Морской гидрофизический журн. 1997. № 3. С. 3–16.
- Иванов В.А., Коняев К.В., Серебряный А.Н. Группы интенсивных внутренних волн в шельфовой зоне моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17. № 12. С. 1302–1309.
- 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.
- Иванов В.А., Серебряный А.Н. Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 6. С. 661–665.
- 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.
- Коняев К.В. Экспериментальное исследование короткопериодных внутренних волн в море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 3. С. 285–296.
- Коняев К.В., Сабинин К.Д. Новые данные о внутренних волнах в море полученные с помощью распределенных датчиков температуры // ДАН СССР. 1973. Т. 209. № 1. С. 86–89.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55.
- Серебряный А.Н. Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. № 3. С. 285–293.
- Серебряный А.Н. Проявление свойств солитонов во внутренних волнах на шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 2. С. 244–252.
- Garrett C., Munk W. Space-time scales of internal waves // Geophys. Fluid Dynam. 1972. V. 3. № 3. P. 225–264.
- Kao T.W., Pao H.P., Park G. Surface intrusions, fronts and internal waves: a numerical study // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. № C9. P. 4641–4650.
- Sabinin K., Serebryany A. Intense short-period internal waves in the ocean // J. Marine Res. 2005. V. 63. P. 227–261.

Satellite Observations of Internal Waves Surface Manifestations in the Caspian Sea

O. Yu. Lavrova¹, M. I. Mityagina¹, K. D. Sabinin^{1,2}, A. N. Serebryany^{1,2}

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

²N.N. Andreev Acoustics Institute, Moscow

Results of satellite observations of internal wave surface manifestations in the Caspian Sea are presented. It has been proposed that the possible reason for detected internal waves generation was uninodal seiches with nodal line located in the vicinity of the Apsheron Sill. Main parameters of internal waves in the Caspian Sea looking like classical soliton trains were retrieved. Three main regions of their localization depending on time were established. In May, IW packets were observed in the western part of the South Caspian Basin, in June and in July all manifestations were observed in the eastern part, near the Apsheron Sill, and in August, the localization of IW shifted to the north. Horizontal current velocity of the solitons was assessed. According to the assessment, velocity was about 0.2 m/s that is sufficient to modulate short gravity-capillary waves and make internal waves visible from space.

Keywords: internal waves, satellite imaging, sea surface radar observations, seiches, the Caspian Sea