

Ю.Н.Горячкин, В.В.Фомин

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В КАЛАМИТСКОМ ЗАЛИВЕ

Представлены результаты численного моделирования и натурных измерений волновых течений в Каламитском заливе. Обсуждаются их качественные и количественные характеристики, определяемые изменениями поля ветрового волнения. Рассмотрено движение донных наносов, связанное с волновыми течениями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *ветровое волнение, течение, донные наносы, спектральная модель SWAN, Каламитский залив.*

В динамике прибойной зоны главную роль играют волновые течения. Они возникают, главным образом, как результат процессов диссипации энергии и потери импульса в волнах, распространяющихся к берегу. Составляющими волновых течений являются как поперечные по отношению к изобатам, так и вдольбереговые течения. К поперечным могут быть причислены потоки, связанные со стоковым переносом и направленные к берегу, а также компенсационное противотечение, действующее в противоположном направлении. Сюда же относятся и разрывные течения в виде узких струй, отходящих от берега. Вдольбереговые течения условно подразделяются на энергетические (генерируемые в результате превращения количества движения трансформирующихся косоподходящих волн в количество движения поступательного вдольберегового потока) и градиентные, обусловленные изменениями уровня моря. Энергетическое течение является одним из основных факторов формирования вдольбереговой компоненты потока наносов. При натурных наблюдениях практически невозможно идентифицировать тот или иной вид течений, поскольку все они, как правило, действуют одновременно. Да и измерений таких крайне мало, что связано с техническими и организационными проблемами. В настоящей работе рассматриваются модельные и натурные характеристики волновых течений, полученные для региона Западного Крыма. В 2005 – 2008 гг. Морским гидрофизическим институтом НАН Украины были проведены эксперименты по изучению течений в прибойной зоне Западного Крыма, где они наиболее важны с точки зрения движения наносов. Измерения выполнялись в пгт.Николаевка и г. Евпатория. При этом решались следующие основные задачи: выявление связи направлений течений с направлениями ветровых волн; получение характеристик течений для конкретных штормов; сравнение натурных данных с модельными расчетами.

Западная часть Крыма является акваторией с интенсивной штормовой деятельностью. Открытое штормовым ветрам от большинства направлений западное побережье Крыма является одной из наиболее энергоактивных зон Черноморского бассейна. Повторяемость скорости ветра ≥ 10 м/с в Евпатории (10,6 %) более чем вдвое превышает повторяемость таких штормовых ветров в районе Херсонесского маяка (4,9 %) [1].

© Ю.Н.Горячкин, В.В.Фомин, 2010

Район пгт. Николаевка. Для описания динамических процессов в исследуемом районе применялась совместная модель, разработанная в [2]. Базовыми блоками модели являются: спектральная модель *SWAN* [3 – 6] и трехмерный сигма-координатный модуль расчета течений [7, 8].

Береговая черта в районе Николаевки практически прямолинейная, а изобаты параллельны берегу. Поэтому при моделировании динамических процессов распределение глубин аппроксимировалось функцией, зависящей только от координаты y , ориентированной по нормали к берегу, при этом использовались осредненные данные промеров и распределения глубин, снятые с навигационной карты. Уклоны дна по мере увеличения расстояния от берега имеют следующие количественные характеристики. В прибрежной полосе шириной 0 – 30 м уклоны дна достигают 0,1; на участке 30 – 90 м 0,025; на участке 90 – 300 м 0,01; на участке 300 – 1000 м 0,005.

Первым этапом моделирования было получение фоновых значений высот, направлений и периодов волн, подходящих к побережью Николаевки со стороны открытого моря. С этой целью для конкретных значений скорости и направления ветра с помощью модели *SWAN* рассчитывались характеристики установившегося ветрового волнения для всего Черного моря с горизонтальным шагом 5 км. Далее рассматривались ближайшие к району Николаевки узлы расчетной сетки. Данные в этих узлах были использованы в качестве граничных условий для моделирования параметров волнения непосредственно в прибрежной зоне Николаевки.

На втором этапе проводилось моделирование установившихся полей волнения с высоким пространственным разрешением. Расчетная область представляла собой прямоугольник размером 2 км во вдольбереговом направлении (вдоль оси x) и 1 км в поперечном направлении (вдоль оси y). Шаг сетки по x составлял 50 м, по y 10 м. При расчетах волнения по угловой координате дискретность модели составляла 5° . По частотной координате использовалась неравномерная сетка с 31 узлом. Минимальная частота волн $\sigma_1 = 0,06$ Гц. Остальные частоты ($n > 1$) определялись по рекуррентной формуле: $\sigma_n = 1,1 \sigma_{n-1}$. Максимальное значение высоты волн в зоне обрушения определялось соотношением: $h_{\max} = \gamma H$, где $\gamma = 0,6$ – параметр обрушения и H – глубина бассейна. Донное трение рассчитывалось с учетом масштаба донных шероховатостей в соответствии с теорией Гранта-Мадсена [9].

На последнем этапе с учетом полученных полей волнения выполнялись моделирование осредненных по времени волновых течений, расчет потоков наносов и оценки скоростей деформаций дна. Расчеты проводились на период 12 ч. Как показали предварительные численные эксперименты, за указанный период поля волновых течений выходят на установившийся режим.

Учитывая географическое положение исследуемого района, моделирование волновой динамики проводилось для 4-х наиболее опасных, с точки зрения генерации интенсивного волнения, направлений ветра (северо-западного, западного, юго-западного и южного). Эти направления соответствуют максимальные разгоны волн. Рассматривалось 3 значения скорости ветра: $W = 10$ м/с – слабый шторм, $W = 15$ м/с – умеренный шторм, $W = 25$ м/с – сильный шторм.

Перейдем к рассмотрению волновых течений, т.е. прибрежных потоков, вызванных короткопериодными ветровыми волнами и зыбью. Эти течения

представляют собой суммарный дрейф на фоне орбитального движения частиц воды. В штормовых условиях скорости волновых течений в прибрежной зоне обычно значительно выше, чем скорости постоянно действующих течений больших масштабов, таких, например, как дрейфовые или термохалинные течения.

В рамках используемой совместной модели энергетической составляющей волнового течения является вдольбереговая компонента скорости течений $\bar{U}$.

На рис.1 показано распределение осредненной по глубине вдольбереговой компоненты скорости течений $\bar{U}$ по нормали к берегу для скоростей ветра: 10 м/с (рис.1, а); 15 м/с (рис.1, б); 25 м/с (рис.1, в); черта сверху – операция осреднения. Осредненные значения рассматриваются по той причине, что U практически не меняется по глубине. Система координат выбрана так, что

при $\bar{U} > 0$ энергетическое течение направлено на юг, а при $\bar{U} < 0$ – на север.

Представляет интерес рассмотреть влияние на $\bar{U}$ направления ветра. Как видно, при северо-западном ветре (кривые 1) вдольбереговое течение всегда направлено на юг. Для юго-западного (кривые 3) и южного (кривые 4) направлений эта зависимость обратная – при всех скоростях ветра течение направлено на север.

В случае западного ветра (кривые 2) энергетическое течение ведет себя более сложным образом. При слабых и умеренных штормах генерируемое течение направлено на юг. Причем, при слабых штормах максимумы не превышают 0,01 м/с. В условиях сильного шторма вдольбереговое течение меняет знак (направлено на север). Следует также отметить, что в целом энергетическое течение северного направления оказывается на 40 – 50 % интенсивнее течения южного направления. Как видно из графиков, в рассматриваемых нами случаях абсолютные значения скоростей вдольберегового течений могут достигать 0,4 м/с.

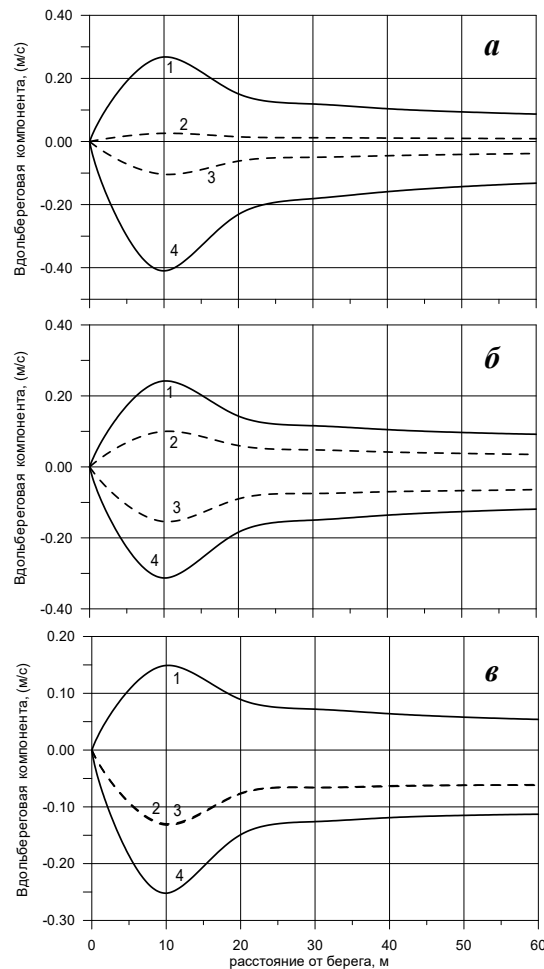


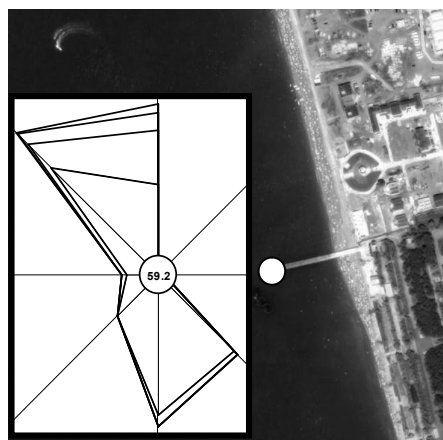
Рис. 1. Распределение вдольбереговой компоненты скорости течений $\bar{U}$ при скоростях ветра: 10 (а); 15 (б); 25 (в) м/с. Цифры у кривых соответствуют следующим направлениям ветра: 1 – северо-запад; 2 – запад; 3 – юго-запад; 4 – юг.

Как же соотносятся модельные расчеты с реальными течениями? Для ответа на этот вопрос воспользуемся данными наших наблюдений в районе пгт. Николаевка. Измерители течений были установлены в голове причала, расстояние от уреза составляло 62 м, глубина 5 м, импеллер измерителей размещался в 1 м от дна. Измерения течений в непосредственной близости от берега сопряжены с большими трудностями, т.к. всегда существует риск повреждения или утраты измерителей течений и заклинивания импеллеров. Поэтому для большей надежности устанавливалось по два измерителя, работавших синхронно. Наблюдения проводились непрерывно с октября по декабрь 2005 г., дискретность измерений составляла 15 мин. Параллельно проводились наблюдения за ветром, волнением (визуально и с помощью струнного волнографа) и уровнем моря. В период наблюдений преобладали ветра северных румбов. При этом их повторяемость составляла около 22 %. Вторыми по повторяемости являлись ветра от северо-восточного направления и в меньшей степени восточных направлений. Их повторяемость составляла от 8 до 23 %. Наибольшая повторяемость северо-восточных ветров отмечалась в октябре. Ветра от южных румбов наблюдались гораздо реже – не более 15 %. Что касается скорости ветра, то за период наблюдений она была преимущественно небольшой. Средняя скорость ветра варьировала около величины 3 м/с. Несмотря на относительно небольшую повторяемость ветров от южных направлений, наибольшие средние и максимальные скорости наблюдались именно при их действии. Максимальные скорости ветра достигали 10 – 12 м/с. Повторяемость штиля в отмеченный период последовательно уменьшалась от 9 % в октябре до практически нуля в декабре. В октябре 2005 г. отмечалось преобладание волнения от северо-запада, в ноябре резко преобладало волнение от западного направления, а в декабре, сохраняя значительную повторяемость западного волнения, преобладало волнение от юго-запада.

Западные и юго-западные ветра, имея меньшую повторяемость, но значительную силу, оказывают решающее влияние на режим волнения. В период наблюдений преобладало незначительное волнение (высота волны до 0,5 м). В октябре оно составляло 75 % всех случаев, уменьшившись до 50 % в декабре. Штиль в период наблюдений в среднем составлял 6 % всех случаев. В целом за период наблюдений отмечалось увеличение повторяемости значительного волнения (высота волны 1,0 м и выше) от октября к декабрю. Максимальные высоты волн, достигавшие величин 1,5 – 2,5 м, отмечались при действии юго-западного ветра, что вполне естественно, учитывая величину разгона волн.

Из рис.2 отчетливо видно, что в период измерений преобладали вдоль-береговые течения. Наибольшей повторяемостью отличались течения от севера и северо-запада (22 %). Немного меньше повторяемость течений от юга, юго-востока. Вместе с тем, заметно, что течения, направленные на юг, имеют малые скорости, в противоположность течениям, направленным на север, что подтверждает модельные расчеты. Осредненный за весь период вектор течений показал интегральный перенос вдоль берега на север.

Необходимо отметить, что в большей части случаев (60 %) отмечались крайне малые скорости течений (менее 2 см/с), в 34 % случаев их величина достигала 20 см/с и только в 6 % случаев превышала эту величину. Максималь-



Р и с . 2 . Суммарная роза течений в пгт.Николаевка (октябрь – декабрь 2005 г.). Цифры внутри круга – повторяемость отсутствия течений в %.

ная зарегистрированная скорость течения составила 75 см/с. На суммарной розе заметно существование течений от других направлений, хотя их повторяемость и невелика. Просмотр конкретных реализаций показывает, что они проявляются в период смены направлений переноса. Характерно, что течений с большими скоростями, направленных

от берега, не отмечено. Это может свидетельствовать о малой роли (по крайней мере, в период измерений) разрывных и компенсационных течений.

Для выявления связи характеристик течений с волнением нами были просмотрены реализации и отобраны все случаи, когда наблюдались резкие возрастания скоростей течений, которые сведены в таблицу. Из неё видно, что все случаи резкого возрастания скоростей течений соответствовали значительному по высоте волнению. При этом в семи случаях из восьми наблюдалось волнение от запада и юго-запада. Этому волнению соответствовали течения, направленные вдоль берега на северо-запад. В одном случае наблюдалось волнение от северо-запада, которому соответствовало направление течения на юг. Такой результат соответствует модельным расчетам, рассмотренным выше.

Расчетные модельные величины абсолютных значений скоростей вдольберегового течений составляют 20 – 40 см/с, что, в общем, близко к реально наблюдаемым (табл.).

Выявить статистически значимую связь скорости течения с величиной волнения, к сожалению, не удалось, поскольку в четырех случаях в условиях усиления шторма наблюдалась остановка приборов из-за заклинивания их импеллеров водорослями и донными отложениями.

Район г.Евпатория. Измерения течений проводились в голове причала, минимальное расстояние от уреза составляло 130 м, глубина 8 м, импеллер

Т а б л и ц а . Характеристики волн и течений.

№ п/п	направление волнения, °	максимальная высота волны, м	направление течения, °	максимальная скорость течения, см/с
1	240	1,0	340	22
2	210	1,8	350	26
3	310	0,7	180	21
4	220	1,6	320	45
5	230	2,0	340	42
6	240	1,0	340	32
7	270	1,7	340	45
8	240	2,7	340	75

измерителей размещался в 1 м от дна. Измерения проводились непрерывно в течение 3-х лет с января 2006 по декабрь 2008 г., что позволило получить статистически достоверные характеристики течений. В период измерений в Евпаторийской бухте отмечалось резкое преобладание северо-восточных ветров, что является характерной особенностью данного района. Напротив, сильное волнение наблюдалось в узком секторе от юга и юго-запада. Это вполне естественно, учитывая географическое положение района наблюдений. В отличие от Николаевки, где береговая линия прямолинейная, Евпаторийская бухта имеет довольно сложную конфигурацию берега, во многом определяющую характер течений в прибойной зоне. Среднегодовые розы течений, полученные в течение трех лет, качественно подобны. Преобладают течения, направленные от берега (южные, юго-восточные). Основная особенность течений – это крайне малая величина их скорости. В подавляющем большинстве случаев (около 97 %) скорость не превышает 10 см/с. При малых скоростях течений какой-либо выраженной связи с локальным ветром не отмечается. Отдельно нами были выбраны моменты времени, когда отмечались течения со скоростью более 10 см/с. Оказалось, что эти течения действуют в двух довольно узких секторах. Один из секторов – юго-западный, другой – восточный, что в целом соответствует ориентации береговой линии к западу и востоку от места измерений. Сравнение течений с величинами и направлениями волнения показало, что моменты усиления течений соответствуют развитому волнению от южных и юго-западных направлений с высотой волны более 1,5 м. В такие моменты скорость течения возрастает до 15 – 20 см/с, что в целом меньше значений, полученных при измерениях в Николаевке. По-видимому, это связано с большей глубиной и большим расстоянием от уреза воды в месте измерений в г. Евпатория. Максимальная измеренная величина скорости течения за 3 года составила 45 см/с. Необходимо при этом отметить, что в наиболее сильные шторма импеллеры обеих измерителей останавливались из-за запутывания водорослями. Так что, вероятно, скорости максимальных течений могут быть и большими. Ранее нами было показано, что скорости в придонном слое примерно в 2 раза меньше, чем в поверхностном [10]. В течение 4-х месяцев течения измерялись одновременно в двух пунктах. Измерения показали, что в непосредственной близости от берега (вспомогательная точка измерений – 60 м от уреза) даже при относительно небольшом волнении (3 – 4 балла) течения в прибойной зоне направлены строго вдоль берега, тогда как в основной точке измерений (130 м) течения могут быть любых направлений.

Математическое моделирование показало [11], что генерируемые поверхностным волнением течения в районе исследований имеют вид струйных вдольбереговых потоков со скоростями от 20 до 40 см/с, интенсивность и положение которых зависит, в первую очередь, от угла подхода волн к побережью. Максимальные вдольбереговые скорости волновых течений характерны для интенсивного волнения от южных румбов.

Практическое приложение полученных результатов связано с расчетом движения донных наносов. Математическое моделирование показало, что существенные их движения в районе Николаевки возникают лишь при умеренных и сильных штормах. В этих случаях вдольбереговые потоки наносов

могут достигать $\sim 2 \text{ кг м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$. Их направление находится в полном соответствии с направлением энергетических течений. Кроме того, наиболее интенсивные вдольбереговые потоки наносов формируются при северо-западных и южных ветрах, т.е. в случаях, когда угол между направлением ветра и направлением береговой черты минимален.

Движения наносов в Евпаторийском заливе возбуждаются лишь при ветрах, действующих со стороны Черного моря и генерирующих интенсивное штормовое волнение высотой 1,5 – 2 м. При этом основные потоки наносов в заливе сосредоточены в прибрежной зоне, где их величина составляет $\sim 0,2 - 0,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ для песка средней зернистости (0,5 мм). Поскольку все области конвергенции потоков наносов лежат южнее залива, их движение в заливе имеет однонаправленный характер и, в целом, соответствует направлению циркуляции. При западном и юго-западном направлении ветра здесь преобладают процессы эрозии дна, а при южном – процессы аккумуляция наносов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н. Штормовой ветро-волновой режим у черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009 г.– вып.19.– С.56-69.
2. Фомин В.В., Иванов В.А. Объединенная численная модель течений, волнения и транспорта наносов озера Донузлав // Морской гидрофизический журнал.– 2006.– № 2.– С.1-23.
3. Booij N., Ris R., Holthuijsen L. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation // J. Geophys. Res.– 1999.– 104 (C4).– P.7649-7666.
4. SWAN Cycle III version 40.11, User Manual.– Delft University of Technology, Netherlands, 2000.– 117 p.
5. Фомин В.В., Дьяков Н.Н. Ветровое волнение и транспорт наносов в Азовском море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.– вып.8.– С.175-181
6. Фомин В.В., Иванов В.А. Численное моделирование ветрового волнения в районе острова Коса Тузла // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.10.– С.233-242.
7. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Тр. УкрНИГМИ.– 2002.– вып.249.– С.246-255.
8. Фомин В.В., Репетин Л.Н. Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журнал.– 2005.– № 4.– С.32-42.
9. Grant W.D., Madsen O.S., Combined wave and current interaction with a rough bottom // J. Geophys. Res.– 1979.– 84.– P.1797-1808.
10. Горячкин Ю.Н. Придонные течения в Каламитском заливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.17.– С.258-264.
11. Иванов В.А., Фомин В.В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– 363 с.

Материал поступил в редакцию 15.11.2010 г.