МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ

(МГУ, Ин-т водных проблем, АНИС)

Представлены результаты моделирования транспорта наносов на северном побережье Азовского моря в районе бухты Таранья. Работа выполнялась с целью изучения особенностей деформации рельефа дна при различных гидрометеорологических условиях. Полученные материалы показали, что деформации рельефа дна на рассматриваемом участке Азовского моря в значительной степени зависят от характера атмосферной циркуляции, в частности, от устойчивости во времени направления ветра.

На северном побережье Азовского моря, начиная примерно с середины 80-х годов, берег стал активно размываться [1]. По данным аэрофотосъемки, берег сместился в сторону суши более чем на 40 м, а за период с 1997 по 1999 гг. скорость размыва еще больше возросла и составила от 4 до 8 м в год на разных участках. При штормах размывы берега приобретают катастрофический характер [2].

В числе главных объектов исследования транспорта наносов, важных с практической позиции защиты берегов от размывов, находятся оценки деформации рельефа дна при действии ветров различных скоростей и направлений с учетом различий диаметра частиц наносов на отдельных участках прибрежной зоны. Названные оценки из-за многообразия природных условий и большой трудоёмкости работ крайне трудно сделать только экспериментальным путем. Такие исследования могут быть выполнены реально лишь путем моделирования с использованием данных гидрофизических и литодинамических изысканий.

В рассматриваемой работе представлены некоторые материалы численного моделирования транспорта наносов на северном побережье Азовского моря в районе бухты Таранья и в районе поселка Юрьевка, где ранее были проведены экспериментальные исследования гидро- и литодинамических процессов [2]. Расчеты производились с учетом параметров инфрагравитационных волн (ИГВ). Необходимость такого учета вызвана тем обстоятельством, что наблюдаемые на Азовском море активные процессы размыва берегов и переформирования рельефа дна можно объяснить совместным влиянием ИГВ и гравитационных ветровых волн.

Согласно известным представлениям [3-6] исследование интенсивности движения обломочного материала (наносов) является ключевым вопросом в изучении разнообразных проявлений и специфических особенностей абразионно-аккумулятивных процессов в береговой зоне моря. Существенной особенностью транспорта наносов является их способность к переотложению, приводящему к двум противоположным явлениям: к размыву донных и береговых отложений и к аккумуляции наносов. Эти явления находят свое выражение в возникновении донных и береговых образований, охватывающих по своим размерам широкий диапазон изменения пространственных масштабов. Таким образом, деформации рельефа дна не могут происходить без транспорта обломочного материала, точно так же, как и перенос твердого материала не может осуществляться без протекающих в береговой зоне процессов эрозии, абразии и аккумуляции наносов.

Количественной мерой интенсивности транспорта донного материала является вектор удельного объемного расхода наносов $q_s=(q_{sx}, q_{sy})$ с размерностью м^2/с. При известном распределении величины q_s расчет деформаций дна может быть проведен с помощью уравнения

$$\frac{\partial \widetilde{H}}{\partial t} = \frac{1}{1-\varepsilon}\left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y}\right)$$

где $\widetilde{H}$ - локальная глубина; ε - коэффициент пористости донного грунта.

Транспорт наносов в реальных условиях осуществляется в двух видах. Первый из них связан с движением твердого материала в придонной области потока, где частицы наносов перемещаясь по дну в виде качения, скольжения или сальтации. Эту форму движения

обломочного материала обычно принято называть транспортом донных наносов. Осуществление последнего в однонаправленных потоках может происходить и в виде движения донных микроформ (рифелей, гряд). При увеличении значений тангенциальных напряжений на дне потока до значений, соизмеримых с величиной гидравлической крупности донных частиц, которые, отрываясь от дна, способны более или менее длительное время находиться в водной толще без непосредственного контакта с дном. В таком случае принято говорить о переходе донного материала во взвешенное состояние, а его движение в водной толще потока называть транспортом взвешенных наносов.

Многообразие условий, в которых возникает необходимость исследования динамики береговой зоны моря, требует раздельного расчета составляющих транспорта обломочного материала: удельного расхода донных наносов q_{s1} и удельного расхода взвешенных наносов q_{s2}. Другим требованием к методике расчета является возможность их использования в достаточно широком диапазоне изменения гидравлических условий и, в частности, при неустановившемся режиме, возникающем под действием наиболее значимого и распространенного в береговой зоне гидродинамического фактора - ветрового волнения. Различные режимы последнего предполагают необходимость внесения в расчетные методики элементов универсальности с целью возможности их использования во всей прибрежной зоне.

Кроме того, в зонах трансформации и обрушения ветровых волн в ряде случаев могут наблюдаться значительные вторичные течения, связанные с изменением уровня свободной поверхности (нагоном), индуцированным тангенциальными напряжениями ветра на свободной поверхности и волновыми радиационными напряжениями. Учет последних при расчете транспорта наносов, а также учет гравитационных сил, действующих на донные и взвешенные наносы в условиях наклонного дна, в значительной мере предопределяет точность используемой расчетной методики.

Таким образом, метод расчета транспорта наносов в береговой зоне должен учитывать следующие основные факторы:

- разделение транспортируемого материала на донные и взвешенные наносы;
- нестационарный волновой характер движения водных масс и наносов;
- взаимодействие ветрового волнения с различными видами нестационарных и квазистационарных движений в береговой зоне.

В общем случае при расчете транспортирующей способности водных потоков на заданном участке береговой зоны в качестве исходных данных необходимо использовать:

- пространственные распределения глубин H, нагонов ξ и среднего диаметра частиц донных наносов d_{cp};
- поля компонентов скорости течений V_x, V_y;
- значение расчетного периода волнения T и пространственные распределения высоты h, длины λ и угла подхода α волн.

Отраженные в данной статье работы можно описать следующей схемой. На основе топографических карт (масштаба 1:100 000) и навигационных карт масштабов от 1:1000 000 до 1:100 000 были созданы электронные карты, содержащие батиметрию и контуры береговых линий всего Азовского моря, прибрежной зоны в районе бухты Таранья, и на меньшей расчетной сетке - в районе поселка Юрьевка. По опубликованным метеорологическим данным были определены возможные скорости и направления ветра с различной обеспеченностью в двух случаях (см. таблицу) и для 8 румбов направлений устойчивого ветра. По выбранным величинам скоростей и направлений ветра были рассчитаны поля течений, ветровых и инфрагравитационных волн, и затем поля расходов наносов, деформаций рельефа дна.

Повторяемость ветров в районе бухты Таранья [7,8]

НАПРАВЛЕНИЕ ВЕТРА	ПОВТОРЯЕМОСТЬ, %	
	Средняя многолетняя	За период 1997–2001 гг.
Северный	9	10
Северо-западный	12	12
Западный	12	16
Юго-западный	12	8
Южный	7	9
Юго-восточный	5	28
Восточный	19	5
Северо-восточный	19	12

Параметры ветровых волн на акватории Азовского моря были рассчитаны с учетом сгонно-нагонных колебаний уровня моря. При численном моделировании уровня применялась гидродинамическая модель мелкого моря [9]. В качестве исходных данных использовалась батиметрическая карта моря и поля ветра на расчетной сетке. Далее производился расчет волнения, в основном, согласно приведенным в работах [10-13] рекомендациям по методике, изложенной в [14].

Методика расчета ветрового волнения включала следующие процедуры:

- определения по заданной скорости ветра в каждой расчетной точке локальной высоты волн (без учета зыби) с учетом известного параметрического соотношения;
- учета в каждой расчетной точке составляющих волн, распространяющихся из других зон сеточной области (учет зыби);
- учета рефракции путем численного интегрирования дифференциального уравнения для фазовой скорости (расчет производился лишь для случаев уменьшающихся глубин);
- определения других параметров (связанных с высотой волн) – периодов, длин, фазовых скоростей волн, орбитальных скоростей волнового движения на поверхности и на дне.

Максимальное значение придонной орбитальной скорости в волновом потоке u_m, средняя волновая скорость u_0 и амплитуда колебаний частиц жидкости у дна a_δ (радиус придонных орбит частиц жидкости) определялись по зависимостям [10]:

$$u_m = 2\sqrt{2\pi}\left(1+2\sqrt{3r}\right)^{1/2}\exp\left(-\sqrt{3r}\right)\frac{h}{T}, \quad r=\frac{\widetilde{H}}{\lambda}, \quad u_0=\frac{2u_m}{\pi}, \qquad a_\delta=\frac{u_m T}{2\pi},$$

где $\widetilde{H}=H+\xi$ - локальная глубина; $h,\ T,\ \lambda$ - средняя высота, период и длина волн.

Максимальное значение динамической скорости на дне волнового потока в условиях зернистой шероховатости u_{*m} рассчитывалось по формуле [15]

$$u_{*m}=\frac{0.4u_m}{\ln\left(0.64\,a_\delta/d_{cp}+1\right)},$$

где d_{cp} - средний диаметр частиц донных наносов.

Учитывая большую изменчивость продолжительностей штормового ветра, известную по результатам анализа многолетних измерений [7], расчеты волнения производились за фиксированный временной интервал, равный трем суткам. В этом случае возможно сравнение зависимых от волнения и течений характеристик наносов при различных условиях волнообразования в шторме.

Искомые значения средних высот инфраграватационных волн определялись по соотношению [16]:

$$\bar{h}_{игв} \approx \frac{\gamma \bar{h}^2}{q^2\sqrt{2\pi}},$$

где $\gamma = \bar{k} \cdot cth(\bar{k}H)$, $\bar{k} = \frac{2\pi}{\bar{\lambda}} = \frac{4\pi^2}{g\bar{\tau}^2}$, $q = 1{,}185$, $\bar{\tau}$ - средний период, H - глубина.

В каждой расчетной точке учитывались также составляющие ИГВ, распространяющихся из других зон сеточной области

$$\tilde{h}_x = \sum_i \frac{a_x \tilde{h}_{xi}}{r_i}\Delta x, \qquad \tilde{h}_y = \sum_i \frac{a_y \tilde{h}_{yi}}{r_i}\Delta y,$$

где $(\tilde{h}_x, \tilde{h}_y)$ - суммарный вектор высоты ИГВ; $(\tilde{h}_{xi}, \tilde{h}_{yi})$ - текущий вектор высоты ИГВ, найденный по предыдущей формуле (для $\bar{h}_{игв}$) с учетом направления распространения гравитационных ветровых волн; a_x, a_y - коэффициенты; $\Delta x, \Delta y$ - шаги расчетной сетки по оси X и Y; r_i - расстояние до текущей точки. Расчет производился, также как и для ветрового волнения, по лучам ИГВ с учетом их затенения сушей.

Используемый в настоящей работе метод расчета удельного объемного расхода наносов и деформаций дна в береговой зоне основан на публикациях А.Е.Михинова [3, 15, 17, 18]. При расчетах также были учтены рекомендации, изложенные в публикациях [4-6, 19, 20].

При расчетах выполнялись следующие процедуры:

- определения условий начала размыва деформируемого дна;
- оценки постоянных составляющих удельных тангенциальных напряжений;
- оценки тангенциальных напряжений, обусловленных регулярными течениями;
- определения напряжений, обусловленных асимметрией волновых движений;
- определения суммарных средних тангенциальных напряжений;
- определение параметров донных микроформ;
- определение удельного расхода донных и взвешенных наносов;
- оценки составляющих суммарного расхода наносов и деформации рельефа дна.

Все расчеты реализованы в программном блоке на языке Visual Basic 6.

Некоторые результаты расчета полей относительных деформаций дна представлены на рисунках 1 – 6. На этих рисунках отрицательные значения относительных деформаций характеризуют размыв, а положительные – аккумуляцию наносов. Отметим, что полученные значения отражают средние относительные деформации дна в пределах площади, ограниченной шагом расчетной сетки. По осям X и Y он составляет соответственно 31 и 52 м для малой сетки, и 341 и 277 м для большой сетки.

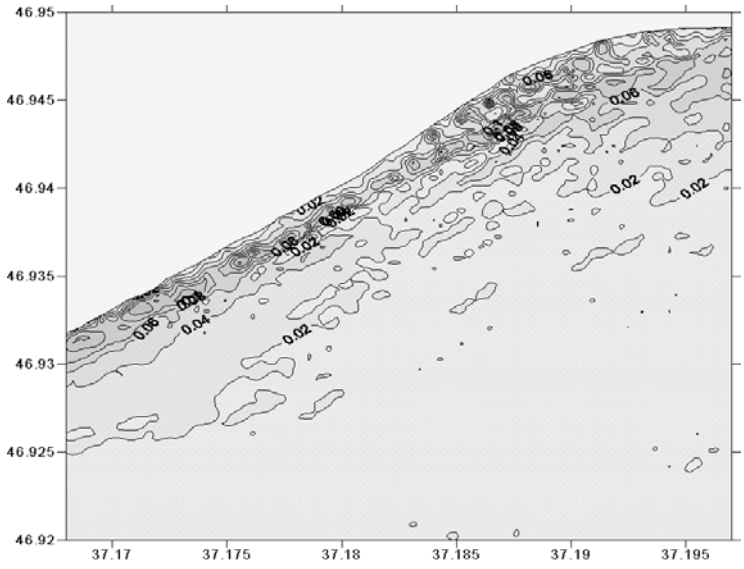

Рис.1. *Относительные деформации дна (в метрах) в районе п.Юрьевка при действии устойчивого* ***северо-западного*** *ветра со скоростью 20 м/с.*

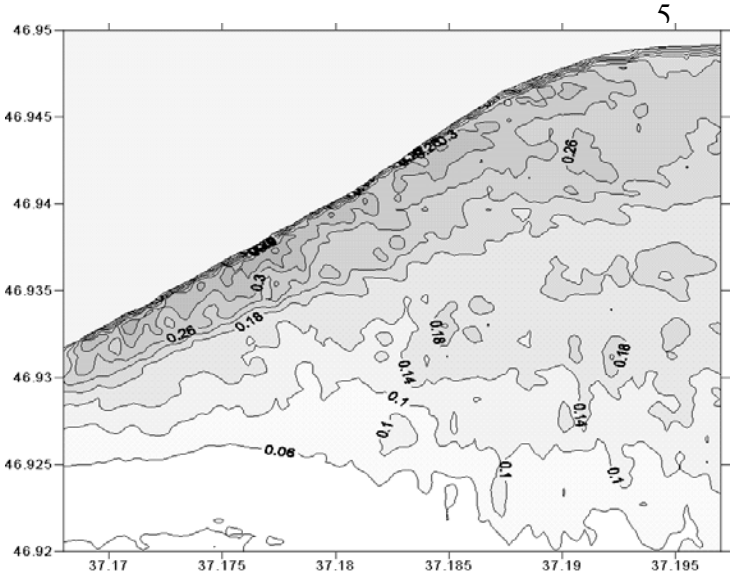

Рис.2. *Относительные деформации дна (в метрах) в районе п.Юрьевка при действии устойчивого* ***юго-западного*** *ветра со скоростью 20 м/с.*

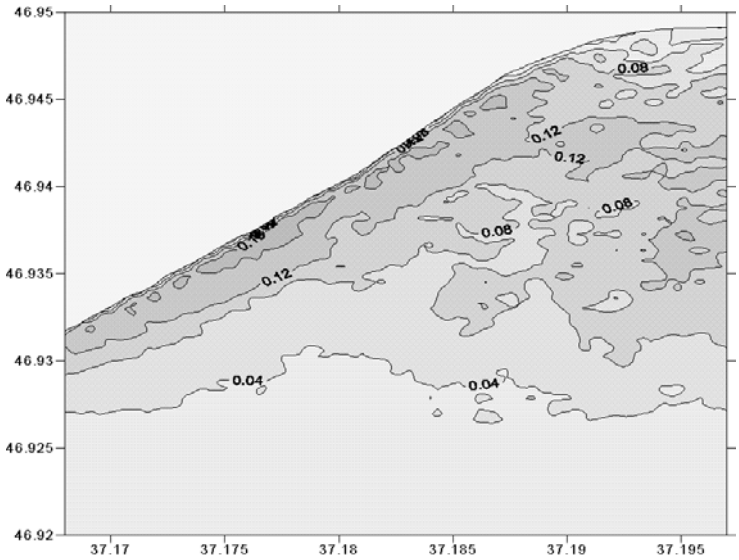

Рис.3*. Относительные деформации дна (в метрах) в районе п.Юрьевка при действии устойчивого* ***юго-восточного*** *ветра со скоростью 20 м/с.*

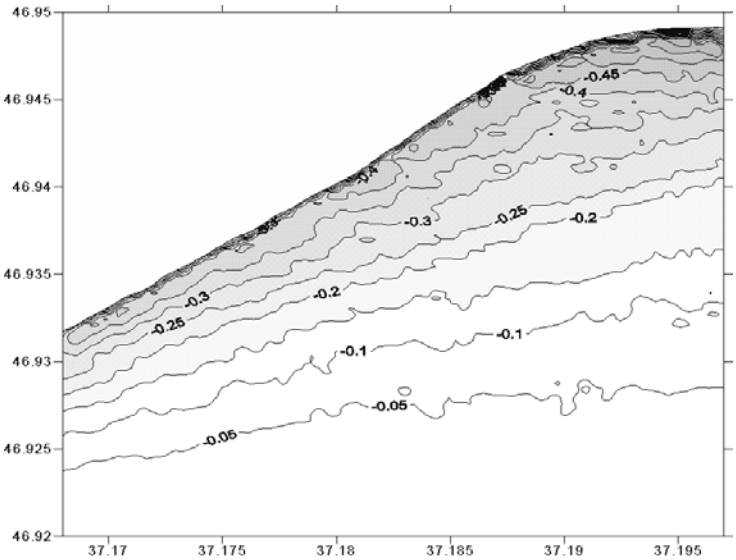

Рис.4. *Относительные деформации дна (в метрах) в районе п.Юрьевка при действии устойчивого* ***северо-восточного*** *ветра со скоростью 20 м/с*

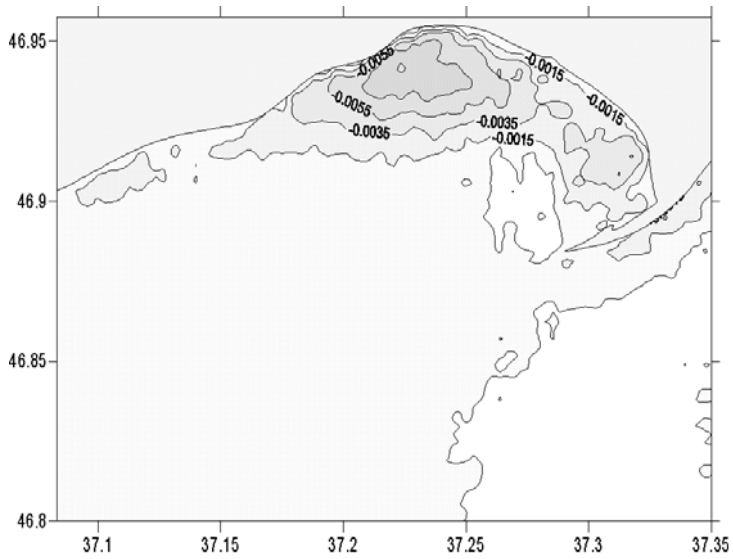

Рис. 5. *Относительные деформации дна (в метрах) в районе бухты Таранья при действии среднемноголетнего ветра со скоростью 20 м/с, обеспеченность направлений которого представлена в соответствующей графе таблицы.*

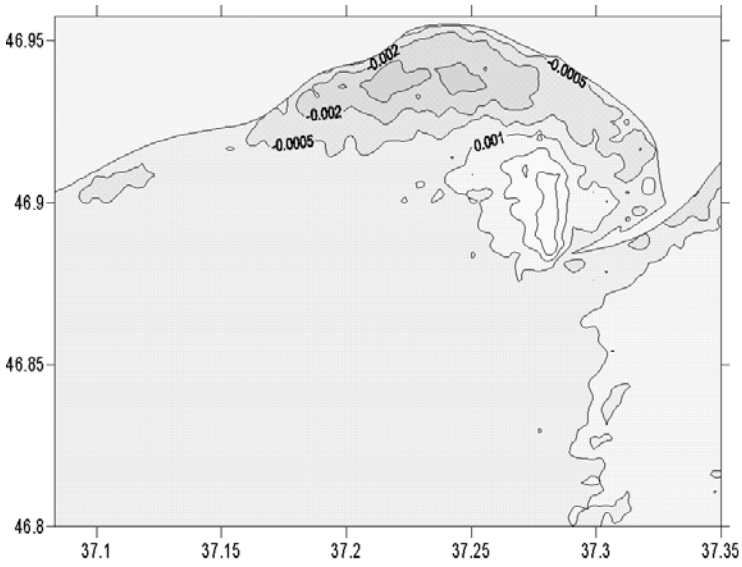

Рис. 6*. Относительные деформации дна (в метрах) в районе бухты Таранья при действии среднего за 5 лет (1997-2001) ветра со скоростью 20 м/с, обеспеченность направлений которого представлена в соответствующей графе таблицы.*

Из полученных материалов следует, что деформация рельефа дна на рассматриваемом участке Азовского моря различна в зависимости от скорости и направления ветра. С возрастанием скорости ветра увеличиваются амплитуды деформаций дна, и изменяется пространственное положение зон размыва и аккумуляции наносов, в частности происходит образование подводных валов на расстоянии от уреза тем большим, чем больше скорость ветра. Пространственное положение зон размыва и аккумуляции наносов в большой степени зависят от направления ветра.

Результаты расчетов указываю на замедление роста относительных деформаций дна с увеличением скорости ветра. Такой характер отражает тенденцию ограничения высот волн с увеличением скорости ветра. Однако важным обстоятельством при сравнении тенденции изменения скорости ветра и относительных деформаций дна является влияние на последние устойчивости ветра. Под термином устойчивости здесь понимается сохранение среднего направления ветра во времени. Полученные материалы показывают, что чем больше интервал времени устойчивого ветра (иначе, чем больше длительность шторма с сохранением среднего направления ветра), тем больше относительные деформации дна.

С изменением среднего диаметра частиц наносов $d_{ср}$ при постоянной скорости ветра изменяется пространственное положение зон размыва и аккумуляции наносов, в частности, образование подводных валов происходит на различном расстоянии от уреза. При этом амплитуды деформаций дна изменяются незначительно.

Результаты расчетов для бухты Таранья показывают, что при действии среднемноголетнего ветра отчетливо проявляется тенденция процессов размыва берега и дна (эрозии и абразии) в северной части бухты, и значительно меньше аккумуляции наносов, в основном, лишь севернее вершины Белосарайской косы. При действии среднего за 5 лет (1997-2001) ветра возрастают процессы аккумуляции наносов севернее вершины косы, а процессы размыва в северной части бухты ослабевают. Если тенденции транспорта наносов сохраняется такой как в названный 5 летний период, то можно ожидать роста косы и некоторое уменьшение процессов размыва в северной части бухты. Конечно, для более обоснованного вывода об эволюции литодинамических процессов в бухте должны быть выполнены расчеты за длительный период времени (не менее одного активного штормового сезона).

Полученные при численном моделировании материалы в целом показывают, что характер изменений рельефа дна и береговой линии в основном на качественном уровне подтверждается данными натурных наблюдений [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивлиева О.В. Интенсивность современных процессов абразии берегов Азовского моря. Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. Труды VI конференции. ИВП РАН. Москва. 2004. С.366–369.
2. Ещенко Л.А., Шипилова Л.М. Особенности динамики прибрежных вод на севере Приазовья. В кн. «Экосистемные исследования Азовского моря и побережья». Т.4., // Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2002, 447 с.
3. Михинов А.Е. Динамика наносов в морской прибрежной зоне. Диссерт. на соиск. уч. степ. доктора геогр. наук., М., 1992, - 583 с.
4. Van Rijn L.C. Sediment transport, part I: bed load transport, part II: suspended transport, part III: bed forms and alluvial roughness // J. Hydraul. Eng. - 1984. - 110. No.12, - p. 1733-1754
5. Анцыферов С.М., Косьян Р. Д. Взвешенные наносы в верхней части шельфа. - М.: Наука, 1986.
6. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001, 272 с.
7. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.5. Азовское море. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 236 с.
8. Лоция Азовского моря. http://katamaran.ru/maps/azov/1.htm
9. Филиппов Ю.Г. Численное исследование колебаний уровня и течений северной части Каспийского моря при различных значениях его фонового уровня. Водные ресурсы, том 24, номер 4, 1997, с.424-429.
10. Глуховский Б.Х. Исследование морского ветрового волнения, Л., Гидрометеоиздат 1966, 284с.
11. Методические указания. Расчет режима морского ветрового волнения. Вып.42, М: 1979.
12. Руководство по расчету параметров ветровых волн ГУГМС ММФ. - Л.: Гидрометеоиздат, 1969.
13. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М., Стройиздат, 1986, 1989, измен. 2, 1995.
14. Трубкин И.П., Филиппов Ю.Г. Методика и некоторые результаты расчета ветровых волн в Балтийском море при оценке воздействия на окружающую среду. Экологические системы и приборы, 2003, №.12, с 46-50.
15. Михинов А.Е. Транспорт наносов и динамика донного рельефа в береговой зоне открытых водоемов // ВИНИТИ АН СССР. - М., 1988. - Деп. в ВИНИТИ 15.11.88, № 8123-В88.
16. Трубкин И.П. О высотах инфраграватационных волн в мелком море. Экологические системы и приборы, 2005, №… (в печати).
17. Михинов А.Е. Динамика наносов в морской береговой зоне. // Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря - Киев: Наук. думка, 1991. - с. 158-176
18. Михинов. А.Е. Гидродинамическая неустойчивость в прибойной зоне // Итоги науки и техники. Сер. Океанология. Т.9. ВИНИТИ АН СССР. М. - 1993. 67 с.
19. Онищенко Э.Л. Определение концентрации и состава взвешенных наносов в придонном слое верхней части шельфа. Дисс. к.ф.-м.н. М.: ИО АН СССР, 1977.
20. Руководство по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях - М,: Гидрометеоиздат, 1975, 238с.