

УДК 504.4.054

Л. И. Лавриненко, канд. техн. наук; **В. С. Кресин**, канд. техн. наук;
Г. И. Воронцова; **Е. В. Еременко**, д-р техн. наук
(УкрНИИЭП)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ЗАИЛИВАНИЯ ТАРАНЬЕЙ БУХТЫ АЗОВСКОГО МОРЯ

Приведены результаты комплексного исследования причин заиливания Тараньей бухты Азовского моря. Предложены рекомендации по ликвидации причин заиливания бухты и восстановлению ее рекреационных способностей.

Ключевые слова: моделирование морских течений, донные отложения, илы, Таранья бухта, Азовское море.

За последние десять лет существенно обострилась проблема заиливания бухты Таранья Азовского моря, что ведет к потере рекреационной способности прибрежной зоны, а также ко всему, что связано с размножением и выловом рыбы. Это в свою очередь негативно отражается на притоке отдыхающих в пгт Ялта (в курортный сезон) и в дальнейшем может привести к деградации самого поселка, бывшего ранее одним из популярнейших курортов на побережье Азовского моря.

Целью статьи является исследование причин и процессов, формирующих заиливание Тараньей бухты (а в будущем, возможно, и других бухт), и разработка мероприятий по ликвидации заиливания бухты.

Акватория бухты Таранья расположена в восточной части Белосарайского залива и ограничена на западе побережьем поселков Урзуф и Юрьевка, а на востоке – западной частью Белосарайской косы. В настоящее время экологическое состояние бухты является одним из наиболее неблагоприятных на украинском побережье Азовского моря. Особенностью бухты является ее близкое расположение к западной части Таганрогского залива и наличие преобладающих вдоль береговых морских стоково-ветровых течений западного направления. Такие течения неизбежно формируют в восточной части бухты горизонтальную циркуляцию воды с пренебрежимо малыми скоростями течений в прибрежной зоне, что способствует преобладанию процесса седиментации взвесей (в основном это илы), т. е. заиливанию бухты. Кроме того, восточнее от Белосарайской косы расположены канал судового хода и свалки грунтов, образованные многолетней расчисткой этого канала, а также устье р. Дон, воды которого содержат значительное

количество взвесей (в частности, содержание иловых частиц составляет ~ 40 г/м³). Таким образом, к постоянному источнику взвесей – стоку р. Дон – добавляются вторичные источники – свалки грунта и канал судового хода (естественная морфологическая «ловушка» для взвесей). Также дополнительным источником поступления взвешенных частиц может являться размыв береговой линии в районе поселков Юрьевка и Урзуф (обрывистые склоны, содержащие лессовидные суглинки).

В настоящее время толщина слоя иловых отложений в акватории бухты составляет от 2 до 4 метров и продолжает увеличиваться. Местами илы выходят на пляжи восточного побережья бухты (район пгт Ялта), исключая возможность отдыха населения в этом районе.

Исследование причин заиливания бухты Таранья осуществлялось как с использованием методов математического моделирования морских течений и процессов массопереноса взвешенных частиц, так и посредством натурных исследований. Натурные исследования проводились ПАО «Гидропроект» и включали в себя геоморфологическую и топографическую съемку береговой полосы, фотопанорамную съемку характерных участков и морфометрических форм, отбор пляжного материала для определения гранулометрических характеристик донных грунтов, отбор проб донных отложений в акватории бухты.

По данным выполненных гидрографических работ были построены продольные профили побережья и акватории бухты Таранья. Для каждого профиля было выполнено описание ситуации и характеристика поверхностного слоя грунта с указанием места отбора проб и их номера в соответствии с ведомостью гранулометрического состава. Часть проб была направлена в лабораторию для определения гранулометрического состава. По промерным профилям проведено зондирование грунтов (по 4-5 зондирований на профиль) с целью оценки мощности слоя донных отложений. По результатам зондирования на поперечных профилях были определены места и зоны скопления илов, а также толщина слоя илистых отложений. Плотность частиц донных отложений, определенная на выборочных поперечных профилях, находилась в диапазоне 2,55–2,67 г/см³. Результат определения гранулометрического состава пляжных отложений показал, что они на 90 % состоят из частиц диаметром более 0,01 мм. Гранулометрический анализ донных отложений в акватории бухты показал, что это частицы размером менее 0,05–0,01 мм.

Анализ геологического строения района показал, что природные донные отложения представлены мелкозернистыми песками, зеленовато-серыми глинами. Прибрежная часть местами представлена сухими и влажными переотложенными илами; это свидетельствует о том, что приносимые илы перекрывают морские песчаные отложения. В районе пгт Юрьевка были обнаружены размывы берега, в результате которых в море выносятся относительно большое количество песчаных и лессовидных пород. Выносимый песок в основном остается в прибрежной зоне; до 90 % лессовидных пород выносятся вглубь моря (в основном на расстояние 120–150 м от береговой линии). Наиболее заиленными являются центральная и восточная части акватории бухты.

Для изучения морских течений в Тараньей бухте и процессов массопереноса был разработан комплекс математических моделей, а также была проведена их верификация на основе проведенных натурных исследований. Учитывая мелководность моря и основываясь на работах [1–16], для решения задачи о распространении взвешенных веществ в акватории моря используется уравнение:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{H} \cdot \frac{\partial}{\partial x} DH \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{1}{H} \cdot \frac{\partial}{\partial y} DH \frac{\partial C}{\partial y} - k \cdot (C - sb), \quad (1)$$

где $u(x, y)$, $v(x, y)$ – проекции вектора скорости течения на оси OX и OY соответственно, м/с; x, y – координаты осей OX и OY соответственно; $C(x, y)$ – распределение концентрации взвешенных веществ в плане водного объекта, г/м³; $H(x, y)$ – распределение глубин в плане водного объекта, м; D – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; k – коэффициент седиментации, определяемый согласно [1], 1/с; sb – мутность, определяемая согласно [1], г/м³.

Выражение (1) является дифференциальным уравнением в частных производных, входящим в двумерную краевую задачу о распространении водой взвешенных веществ. Граничными условиями для этой задачи являются:

а) для твердой границы G_T – условие непротекания

$$\left(\frac{\partial C}{\partial N} \right)_{G_T} = 0, \quad (2)$$

б) для жидкой границы $G_{жс}$ задается поток взвешенных веществ

$$q_T = \left(V_N \cdot C - D \frac{\partial C}{\partial N} \right)_{G_{жс}}, \quad (3)$$

где N – внешняя нормаль к границе; V_N – проекция потока на внешнюю нормаль к границе.

На основе работ [2–8] получены уравнения, описывающие распределение средней по глубине скорости в мелком водоеме и с учетом системы координат (рис. 1), где $H(x, y, t) = h(x, y) + \xi(x, y, t)$ – полная глубина водоема; $h(x, y)$ – отметка дна водоема; $\xi(x, y)$ – отметка поверхности водоема:

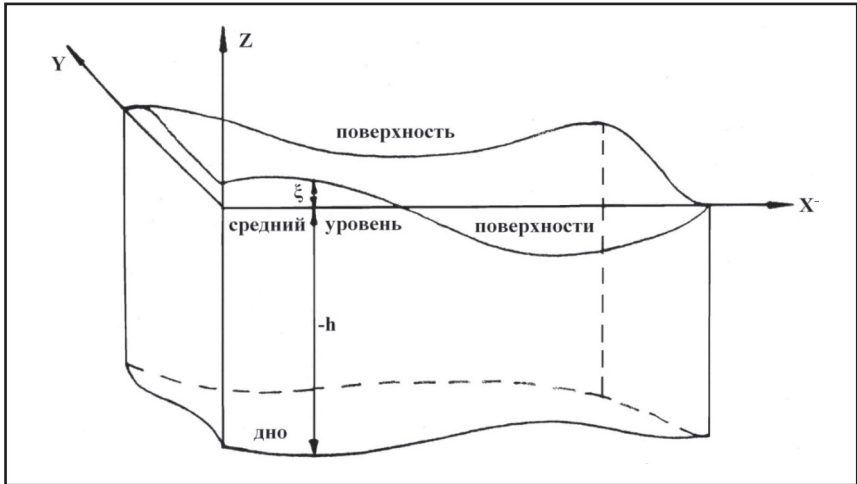


Рис. 1. Система координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} &= -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{H} \mu_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{-\xi}^{\xi} + \mu \nabla^2 \bar{u} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} &= -g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{1}{H} \mu_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{-\xi}^{\xi} + \mu \nabla^2 \bar{v} \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} H}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} H}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

или, переходя к дивергентному виду, [3, 4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{U^2}{H} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{UV}{H} &= -g \frac{\partial}{\partial x} \frac{H^2}{2} + \mu_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{-h}^{\xi} + \mu \nabla^2 U \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{UV}{H} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{V^2}{H} &= -g \frac{\partial}{\partial x} \frac{H^2}{2} + \mu_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{-h}^{\xi} + \mu \nabla^2 V \\ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $U = \langle u \rangle = \bar{u}H$, $V = \langle v \rangle = \bar{v}H$ (6).

По отношению к выделенному объему воды (например, на рис. 1) две внешние силы формируются касательными напряжениями на границах «дно – вода» и «воздух – вода». Результаты исследований различных форм задания трения у дна при стоковых течениях [3, 4, 6, 7] показывают, что традиционно используемый при описании открытых потоков квадратичный закон трения у дна позволяет получить наиболее точное описание поля скоростей и в приближении плановой задачи.

Из результатов аналогичных исследований, проведенных для ветровых течений [3, 8, 9], следует, что и в этом случае квадратичный закон трения позволяет получить более точные результаты. Следуя авторам перечисленных выше работ, для касательных напряжений у дна примем при $z = -h$:

$$\mu_z \frac{\partial U}{\partial z} = K_g \bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} = K_g U \sqrt{U^2 + V^2} / H^{2.5} \quad (7)$$

$$\mu_z \frac{\partial V}{\partial z} = K_g \bar{v} \sqrt{\bar{v}^2 + \bar{u}^2} = K_g V \sqrt{U^2 + V^2} / H^{2.5} \quad (8)$$

где K_g – коэффициент трения у дна.

Совпадение результатов сравнительных исследований при расчетах стоковых течений, проведенных при $K_g = 2,6 \cdot 10^{-3}$ (приводимая обычно в литературе величина), когда \bar{u} , \bar{v} измеряются в м/с, и при значениях K_g , вычисленных с использованием ряда эмпирических зависимостей [3, 4], свидетельствует о достаточной достоверности величины $K_g = 2,6 \cdot 10^{-3}$.

Касательные напряжения, создаваемые воздушными потоками у поверхности водоема, являются основной вынуждающей силой в задаче о ветровом течении. В работе [4], содержащей обзор современных идей и методов в области определения касательного напряжения у поверхности водоема по известным характеристикам состояния приводной атмосферы, отмечены два основных подхода к описанию взаимодействия воздушных потоков с водной поверхностью. В рамках первого подхода рассматривается взаимодействие волн, вызванных воздушными потоками, с основной толщей воды. В рамках второго подхода это взаимодействие интегрально (по аналогии с трением о дно) выражается эмпирическим коэффициентом аэродинамического сопротивления водной поверхности. Такой двойкий подход находит свое отображение и в недавних работах [11, 12, 13]. При этом две из указанных работ использовали второй подход. Необходимо отметить, что в настоящее время большинство исследователей [3, 4, 12, 13] также используют в своих расчетах подход, когда эмпирический коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности своим численным значением интегрально учитывает взаимодействие волн с вызвавшими их воздушными потоками и водной толщей. Нами использовано представление о взаимодействии волнения со стоковым течением в виде интегрального коэффициента. При этом проекции касательного напряжения на оси OX , OY при $z = \xi$ имеют вид:

$$\mu_z \frac{\partial U}{\partial z} = \rho_a C_z W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} = \tau_{(x)}^{(1)} \quad (9)$$

$$\nu \mu_z \frac{\partial v}{\partial z} = \rho_a C_z W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} = \tau_{(y)}^{(1)},$$

где ρ_a – плотность воздуха; C_z – коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности; W_x , W_y – проекции скорости ветра на высоте δ над поверхностью водоема на оси OX , OY ($\delta \approx 2$ м).

В обзорной работе [4] рекомендуется и в случае ветровых течений использовать для эмпирического коэффициента C_z такое же значение, что и для $K_g = 2,6 \cdot 10^{-3}$. В этой же работе отмечено следующее: в силу того, что эмпирические выражения для вычисления C_z , предлагаемые различными авторами, приводят к противоречивым результатам,

большинство исследователей используют соотношения (12) при $C_z = 0,0026$. При этом отмечается, что удовлетворительные результаты этих исследований «... свидетельствуют о принципиальной правильности и высокой статистической достоверности этих формул при $C_z = 0,0026$ ».

С учетом сезонных изменений розы ветров (рис. 2) в среднегодовом разрезе доминирующим является северо-восточный ветер. Ветер с этим румбом и скоростью 5 м/с был выбран в качестве тестового для расчетов течений и распределения взвесей по акватории.

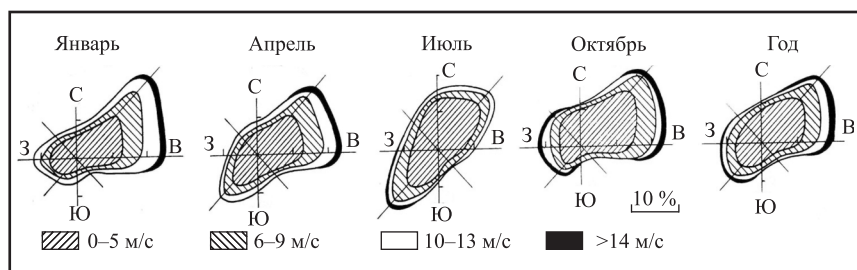


Рис. 2. Изменение розы ветров в течение года

Сопоставление результатов расчетов переноса взвешенных веществ, выполненных для всей акватории Азовского моря, с космическими снимками, отображающими мутность Азовского моря, позволяет утверждать, что основные тенденции в распределении взвесей отображаются удовлетворительно, а численные значения концентраций взвесей соответствуют данным натурных исследований [14–16]. Таким образом, проведенные расчеты позволили сделать вывод об адекватном описании процессов переноса взвесей для Азовского моря.

Поскольку бухта находится на относительно большом удалении от устья Дона, то основную массу переносимых взвесей составляют илы, что подтверждается натурными измерениями (более тяжелые фракции седиментировали в донные отложения в приустьевой части Дона). Расчетная картина течений в бухте, формируемая вдольбереговым течением Таганрогского залива, для северо-восточного ветра представлена на рис. 3. Из нее следует, что в восточной части акватории бухты имеет место локальная циркуляция водных масс, а участок с малыми скоростями течений занимает прибрежную акваторию на протяжении всего северо-восточного побережья бухты.

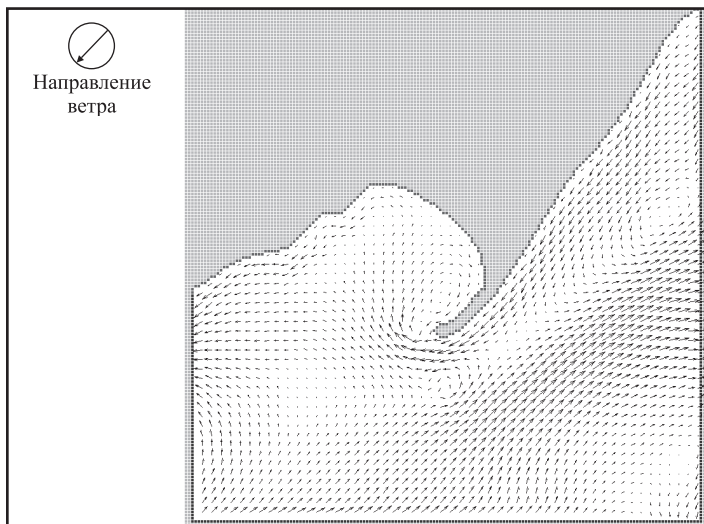


Рис. 3. Распределение векторов скорости в бухте Таранья (Белосарайская коса) при северо-восточном ветре со скоростью 5 м/с

Именно в восточной прибрежной зоне и в зоне циркуляции водных масс отложения илов приблизились непосредственно к береговой линии, исключив возможность купания и отдыха на наилучших участках побережья бухты.

Таким образом, можно указать на наличие постоянно действующего механизма по заиливанию акватории бухты – это особенности формирования течений в бухте Таранья. Однако действия одного этого механизма еще недостаточно. Необходимо наличие постоянно действующих источников иловых взвесей. Как уже отмечалось, из всех фракций взвесей, выносимых Доном, к западной части Таганрогского залива течения доносят наиболее легкую иловую составляющую. Исследования показали, что до западной части Таганрогского залива доходит около 50 % илов, пересекающих створ устья р. Дон. Их концентрация равна приблизительно 35–40 г/м³. Фактически концентрации иловых взвесей при различных ветровых ситуациях составляют ~ 60–90 г/м³.

Известно, что акваторию Таганрогского залива пересекает канал судового хода, являющийся с точки зрения гидравлики «гидравлической ловушкой» для транспортируемых взвесей. Необходимость

постоянной проводки судов вынуждает выполнять периодическую расчистку канала, при этом извлекаемый материал донных отложений поступает на свалки грунтов, обозначенные на картах Азовского моря и расположенные, в том числе, между каналом и северным берегом Таганрогского залива. Поскольку работы по расчистке канала велись десятилетиями, то эти свалки, в совокупности с самим каналом, превратились во вторичный источник заиливания за счет взмучивания илов с мощностью, обеспечивающей концентрации взвесей в этой зоне до величины 90 г/м^3 .

При существующих гидрометеоусловиях заиливание бухты Таранья будет продолжаться до тех пор, пока отложения илов не достигнут той фазы, когда акватория бухты превратится, как и свалки грунтов, во вторичный источник иловых взвесей. После чего наступит очередь следующей (в западном направлении) косы северного побережья. Предварительные расчеты показывают, что это может произойти в течение ближайших 5-7 лет.

Заиливание акватории бухты обеспечивается двумя составляющими: а) сток р. Дон, наличие канала судового хода, наличие свалок грунта; б) особенностью формирования течений в акватории бухты. Поэтому при решении задачи о прекращении заиливания бухты можно говорить либо о ликвидации свалок грунта (задача экономически неосуществимая), либо об изменении условий формирования течений в акватории бухты. Второй подход экономически вполне осуществим, а учитывая экологическую направленность такого мероприятия, затраты инвестора могут быть отнесены (как это принято во многих странах мира) на погашение соответствующей части его налоговых обязательств.

При рассмотрении вопроса об изменении условий формирования течений в акватории бухты теория гидродинамики оставляет практически одно решение – строительство канала в основании Белосарайской косы. Очевидно, что при любом румбе ветра будет иметь место разность отметок поверхности воды на обоих концах канала, а следовательно, картина течений в акватории бухты существенно изменится.

С использованием разработанных авторами математических моделей были выполнены многовариантные расчеты течений и концентраций взвесей в исследуемой акватории. На рис. 4 приведено расчетное распределение скоростей в бухте после строительства канала при наиболее вероятном северо-восточном ветре со скоростью 5 м/с . Из анализа

распределения течений и концентраций взвесей следует, что наличие канала существенно изменит картину течений в бухте и, как следствие, вместо накопления илов в донных отложениях будет иметь место их транспортировка за пределы бухты. Наличие канала приведет к ликвидации зоны циркуляции в восточной части бухты. Именно эта циркуляция является главной причиной заиливания Тараньей бухты. Расчеты интенсивности взмучивания донных отложений показали, что величина взмучивания донных отложений возрастает от 2 до 5 раз в зависимости от румба ветра и конкретного участка акватории бухты. Анализ распределения течений при наиболее вероятных румбах ветра для всего Азовского моря показывает, что взвеси, выносимые из бухты, будут подхватываться течениями глобальных горизонтальных циркуляций и выноситься в центральную часть моря, где их накопление происходит уже тысячи лет. Таким образом, проведенные расчеты показывают, что строительство канала у основания Белосарайской косы решает две проблемы – предотвращение дальнейшего заиливания и улучшение экологической ситуации бухты в целом. При строительстве канала предполагается выполнение берегоукрепительных работ с целью недопущения размыва Белосарайской косы.

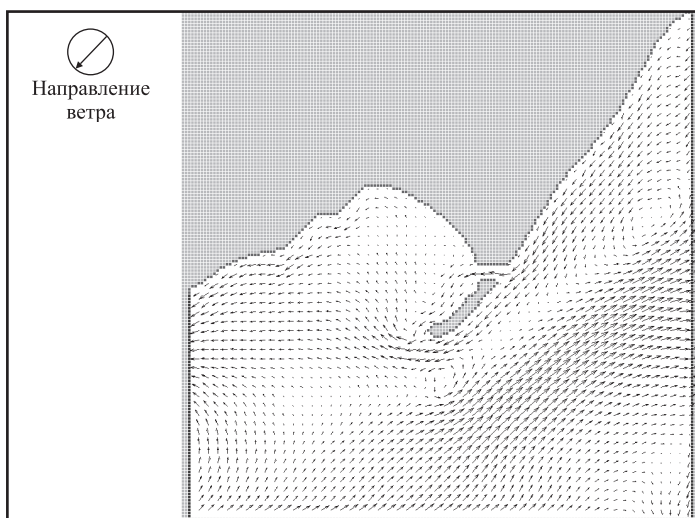


Рис. 4. Распределение векторов скорости в акватории бухта Таранья при северо-восточном ветре со скоростью 5 м/с при наличии канала в основании Белосарайской косы

Для очистки Тараньей бухты от илов и восстановления ее рекреационной способности предложен комплекс мероприятий, включающий: строительство канала в средней части Белосарайской косы; очистку от илов в пляжной зоне и на расстоянии до 500 м в прибрежной морской акватории на участке от восточной границы пгт Ялта до западной оконечности Белосарайской косы; расчистку русел рек Белосарайка и Камышеватая; выполнение берегоукрепительных работ на пляжном участке в районе профилей ПП2-ПП5 (пос. Юрьевка) по предотвращению размыва глинистых склонов; строительство ливневой канализации пгт Ялта с соответствующими очистными сооружениями.

Выводы

1. Комплексные исследования причин заиливания бухты Таранья показали, что основной механизм заиливания бухты связан с особенностью морских течений, формирующих в восточной части бухты циркуляционное течение. Количество ила, которое оседает на дно, наибольшее в той части бухты, где есть застойные зоны и зоны с локальными горизонтальными циркуляциями водных масс. Размыв береговой линии дает незначительный вклад в заиливание акватории бухты.

2. Судовой ход, расположенный восточнее Белосарайской косы, является стабильной морфологической «ловушкой» для илов и потенциальным вторичным источником загрязнения побережья иловой составляющей. Свалки грунтов, расположенные между судовым ходом и восточной частью Белосарайской косы, также являются источником илового загрязнения Тараньей бухты (степень их активности определяется характером течений и носит сезонный характер).

3. В качестве основного мероприятия по удалению илов из Тараньей бухты и восстановления ее рекреационной способности предлагается строительство канала в основании Белосарайской косы.

1. *Караушев А. В.* Теория и методы расчета речных наносов / *А. В. Караушев.* – Л. : Гидрометиздат, 1977. – 272 с.
2. *Рихтмайер Р.* Разностные методы решения краевых задач / *Р. Рихтмайер, К. Мортон.* – М. : Мир, 1972. – 418 с.
3. *Вольцингер Н. Е.* Теория мелкой воды / *Н. Е. Вольцингер, Р. В. Пясковский.* – Л. : Гидрометиздат, 1977. – 208 с.
4. *Вольцингер Н. Е.* Основные океанологические задачи теории мелкой воды / *Н. Е. Вольцингер, Р. В. Пясковский.* – Л. : Гидрометиздат, 1968. – 300 с.

5. Численные методы расчета штормовых нагонов : сб. ст. / Пер. Н. Е. Вольцингера и др.; под ред. М. С. Грушевского. – Л. : Гидрометиздат, 1964. – 223 с.
6. *Richtmayer R. D., Lennon G.W.* Computation of tidal condition in the Thames estuary by the initial value method. Proc. Inst. Civ. Engr., v. 31, 25-56.
7. *Сегерлинд Л.* Алгоритм расчета ветровых течений со скольжением у дна в мелководных водоемах / *Л. Сегерлинд* // Проблемы охраны и использования вод, 1973. – Вып. 3. – С. 113-121.
8. *Svansson F.* Determination of the wind stress coefficient by water level computation. Comm. On V Conference of Baltic Oceanographers, 1966.
9. Морской гидрофизический журнал // МГИ НАН Украины, № 2, 2006.
10. Морской гидрофизический журнал // МГИ НАН Украины, № 4, 2008.
11. Морской гидрофизический журнал // МГИ НАН Украины, № 4, 2010.
12. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика / *П. Роуч.* – М. : Мир, 1980. – 616 с.
13. *Васильев О. Ф.* Математическое моделирование качества воды в реках и водоемах / *О. Ф. Васильев* // В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрологич. съезда. – Л., 1976. – Т. 9. – С. 161-169.
14. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Азовское море. – Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1991. – Т.V. – 236 с.
15. *Хрусталеv Ю. П.* Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны / *Ю. П. Хрусталеv.* – Л. : Наука, 1989. – 261 с.
16. *Мамыкина В. А.* Береговая зона Азовского моря / *В. А. Мамыкина, Ю. П. Хрусталеv.* – Ростов-на-Дону : Изд-во РГУ, 1980. – 174 с.

Лавріненко Л. І., Кресін В. С., Воронцова Г. І., Єременко Є. В. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ЗАМУЛЮВАННЯ ТАРАНЯЧОЇ БУХТИ АЗОВСЬКОГО МОРЯ

Наведено результати комплексного дослідження причин замулювання акваторії Таранячої бухти. Запропоновано заходи щодо ліквідації причин замулювання та відновлення її рекреаційної здатності.

Ключові слова: *модельовання морських течій, донні відклади, мули, Тараняча бухта, Азовське море.*

Lavrynenko L. I., Kresin V. S., Vorontsova G. I., Eremenko E. V. RESEARCH THE CAUSES OF SILTATION TARANJA BAY AZOV SEA

The results of a comprehensive study of the causes siltation Taranja Bay of the Azov Sea. The recommendations for addressing the causes siltation of the bay and restore its recreational abilities.

Keywords: *simulating of sea currents, ground sediments, silts, Taranja Bay, Azov Sea.*