



Общероссийский математический портал

А. В. Клещенко, В. В. Сорокина, А. Л. Чикин, Л. Г. Чикина, Моделирование процесса поступления стока речных наносов Дона в Таганрогский залив Азовского моря, *Матем. моделирование*, 2020, том 32, номер 3, 47–60

DOI: 10.20948/mm-2020-03-03

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.80

15 марта 2025 г., 17:54:59



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСТУПЛЕНИЯ СТОКА РЕЧНЫХ НАНОСОВ ДОНА В ТАГАНРОГСКИЙ ЗАЛИВ АЗОВСКОГО МОРЯ

© 2020 г. *А.В. Клещенко¹, В.В. Сорокина¹, А.Л. Чикин¹, Л.Г. Чикина²*

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН

²Южный федеральный университет
chikin1956@gmail.com

Публикация подготовлена в части анализа седиментационных процессов в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № гр. проекта АААА-А18-118122790121-5, в части разработки методов численного моделирования в рамках научного проекта РФФИ 18-05-80010 «Исследование и прогноз опасных гидрометеорологических и геолого-геоморфологических процессов в районах функционирования стратегических объектов на Азово-Черноморском побережье (исторические и современные аспекты)». Расчеты выполнены на кластере ЦКП "Высокопроизводительные вычисления".

DOI: 10.20948/mm-2020-03-03

Выявлены пространственно-временные особенности процесса осадконакопления взвешенных наносов на устьевом взморье Дона при разных ветровых ситуациях (сгонах, нагонах и слабом ветре переменных направлений) с применением математической модели ветровых течений, дополненной модулем переноса и седиментации взвешенного вещества. Показано, что под действием восточного ветра 6–8 м/с в течение всего расчетного периода (6–7 календарных дней) движение воды в Таганрогском заливе носит поступательный характер, а под действием юго-западного ветра такой же скорости картина линий тока меняется во времени, от поступательных движений в первые сутки до образования двух циркуляционных зон в районе г. Таганрога и в центральной части устьевого взморья. Показано, что поля концентрации взвеси подобны для разных фракционных групп взвешенного вещества. Под действием восточного ветра они вытянуты вдоль продолжения оси основных рукавов дельты на устьевом взморье, под действием юго-западного – прижаты к устьям. При сгоне тяжелые фракции взвеси оседают в районе Азово-Донского судоходного канала, а легкие выносятся течением в сторону залива. При нагоне оседание взвеси происходит вблизи устьевого створа, тяжелые фракции образуют три области деформации дна возле устьев основных рукавов, легкие – только две.

Ключевые слова: взвешенное вещество, седиментация, математическая модель, уравнение переноса, вычислительный эксперимент.

**MODELING OF THE PROCESS OF ENTERING
THE SUSPENDED SOLIDS RUNOFF OF THE RIVER DON
TO THE TAGANROG BAY OF THE SEA OF AZOV***A.V. Kleshhenkov¹, V.V. Sorokina¹, A.L. Chikin¹, L.G. Chikina²*¹Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the RAS²South Federal University

Using a mathematical model of wind currents, supplemented by a module of sediment transfer and sedimentation the spatio-temporal features of the river sediments accumulation on the Don mouth seaside at different wind conditions (eastern and western wind surges and light winds of variable directions) are revealed. It is shown that under the action of the east wind of 6–8 m/s during the entire settlement period (6–7 calendar days) the water movement in the Taganrog Bay is progressive, and under the action of the south-west wind of the same speed, the pattern of current lines changes in time from the progressive movements on the first day to the formation of two circulation zones in the area of the city of Taganrog and in the central part of the Don mouth seaside. It is shown that the fields of suspended matter concentration are similar for different fractions of solids. Under the action of the east wind, they stretched along the extension of the axis of the main branches of the delta at the bay, under the action of the south-west - pressed to the mouths of branches. During the eastern wind surges, the heavy fractions of sediment settle in the area of the Azov-Don navigable canal, and the light ones are carried by the stream towards the bay. During the western wind surges, the sedimentation of the suspended solids occurs near the wellhead, the heavy fractions form three areas of deformation of the bottom near the mouths of the main branches of the delta, the light ones - only two areas.

Keywords: suspended solids, sedimentation, mathematical model, transport equation, computational experiment.

1. Введение

Речной сток Дона, волнение и сгонно-нагонные течения, а также размыв берегов являются основными факторами осадконакопления в Таганрогском заливе Азовского моря и служат регулирующим механизмом самых разнообразных процессов – от водообмена и связи с морем до биологических. Исследованию осадконакопления в Азовском море и роли речного стока в этом процессе посвящено немало работ [1-8], в том числе с использованием методов математического моделирования [9-13]. Несмотря на сложившееся понимание основных закономерностей седиментации, особенности этого процесса в отдельных районах Азовского моря, таких как взморье Дона, прибрежные районы, изучены недостаточно.

Поток воды в Таганрогском заливе очень изменчив, что связано глав-

ным образом с действием ветра. Процесс переноса взвеси и накопления осадков является комплексным и требует проведения трудоемких и длительных экспедиционных исследований. Как отмечено в [14], при постановке и выполнении работ в 1960–1969 гг., связанных с исследованием современной эволюции дельты Дона, основой экспедиционных работ должны являться специализированные многосерийные океанографические съемки взморья, выполняемые в течение наиболее характерных фаз изучаемого режима, многосерийные челночные разрезы в устье и на баре основных и вторичных водотоков дельты, многосуточные станции с использованием автономных самописцев течений и т.д. Кроме того, для получения средних значений изучаемых параметров требуются наблюдения, значительно превышающие по длительности временной масштаб местных флуктуаций ветра.

Существенную помощь в понимании процессов осадконакопления может оказать анализ, выполненный с использованием математического моделирования, дополняя результаты наблюдений. С помощью вычислительных экспериментов на математической модели можно определить районы оседания речного твердого стока в зависимости от ветровой ситуации, а также выяснить, куда выносятся легкие и где оседают тяжелые фракции взвеси. Понимание пространственно-временных закономерностей седиментации речных наносов важно для составления прогнозов изменения глубин и заносимости морских подходных каналов к портам Азов и Таганрог, а также может помочь при оценке загрязнения Таганрогского залива тяжелыми металлами, частицами микропластика и другими веществами, ассоциированными со взвесью.

Цель настоящей работы заключается в определении локального распределения и осаждения взвешенного вещества разного фракционного состава, поступающего из рукавов дельты Дона при различных ветровых ситуациях (сгонах, нагонах и слабом ветре переменных направлений).

2. Материал и метод

2.1. Основные уравнения. Используемая для расчетов математическая модель содержит гидродинамическую и транспортную составляющие. Гидродинамическая составляющая описана двухслойной моделью ветрового течения, которая в общем виде приведена в [15]. Суть данной модели заключается в том, что в районах мелководья используются уравнения мелкой воды, в районах с относительно большой глубиной – трехмерные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости. Модель переноса взвешенного вещества представлена в [16], где реализована для изучения загрязнения южной части Цимлянского водохранилища.

В предположении, что донные отложения состоят из k фракций ($k = 1, \dots, N$), перенос взвеси описывается уравнением конвекции-диффузии

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \frac{\partial(uc_k)}{\partial x} + \frac{\partial(vc_k)}{\partial y} + \frac{\partial[(w - w_{sk})c_k]}{\partial z} = \varepsilon_{xy} \left(\frac{\partial^2 c_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_k}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c_k}{\partial z} \right),$$

где C_k – концентрация k -й фракции; u, v, w – компоненты скорости, w_{sk} – собственная скорость оседания k -й фракции; $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_z$ – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно. Предполагается, что в области устьевого взморья температура и концентрация взвешенного вещества не влияет на плотность вод в устье реки Дон.

На свободной поверхности задается условие $\varepsilon_z(\partial c_k / \partial z) + w_{sk}c_k = 0$. На дне ставится условие $\varepsilon_z(\partial c_k / \partial z) = E_{bk} - D_{bk}$, где E_{bk} – расход при размывании, а D_{bk} – расход оседающих частиц.

Поступление твердого стока из реки описывается уравнением $\varepsilon_{xy}(\partial c_k / \partial n) + V_r c_k = Q_{rk}$, где V_r – скорость реки; Q_{rk} – расход твердого стока (боковой приток); n – нормаль к боковой границе.

Весь процесс переноса взвешенного вещества в водной среде состоит из размывания донного осадка, если скорость течения достаточно большая, оседания взвешенных частиц в случае малой скорости течения и собственно самого переноса взвеси водной средой. Приведенные граничные условия учитывают процессы взмучивания и оседания вещества, поступление его через границы.

Расход D_{bk} оседающих частиц вычисляется по формуле [17]

$$D_{bk} = \begin{cases} 0, & \tau_b > \tau_{b \max} \\ \alpha_k w_{sk} c_{km}, & \tau_{b \min} < \tau_b \leq \tau_{b \max} \\ w_{sk} c_{km}, & \tau_b \leq \tau_{b \min} \end{cases},$$

где τ_b – напряжение сдвига; $\tau_{b \min}$ – критическое напряжение сдвига, ниже которого весь осадок откладывается на дне; $\tau_{b \max}$ – критическое напряжение сдвига слоя, выше которого весь осадок остается в суспензии, что приводит к нулевой скорости осаждения; α_k – это коэффициент от 0 до 1, относящийся к напряжению сдвига, и приблизительно равный $\alpha_k = 1 - (\tau_b - \tau_{b \min}) / (\tau_{b \max} - \tau_{b \min})$.

Расход E_{bk} поднявшихся со дна частиц вычисляется по формуле $E_{bk} = M(\tau_b - \tau_{ek}) / \tau_{ek}$ [18]. Здесь τ_{ek} – критическое сдвиговое напряжение на

размывание; M – экспериментальная постоянная, зависящая от свойств осадка.

Величина сдвигового напряжения τ_b вычисляется через скорость U_b у основания с учетом коэффициента донного трения f_w

$$\tau_b = \rho_w f_w U_b |U_b|.$$

Изменение рельефа дна задается уравнением

$$\rho_S (1 - \sigma) \frac{\partial Z}{\partial t} = D_b - E_b,$$

где σ – пористость дна; ρ_S – осредненная плотность донного осадка, D_b, E_b – суммарные расходы всех фракций, Z – толщина донного осадка.

2.2. Внешние данные для выполнения расчетов. Сток взвешенных наносов Нижнего Дона претерпел коренные изменения в XX веке вследствие гидротехнического строительства. Эти изменения касались как объемов стока, так и трансформации гранулометрического состава взвесей. Твердый сток Дона сократился с 4.4 в 1940–50-е гг. [14] до 0.3-0.4 млн. т/год в 2000–2004 гг. [19, 20]. В последний маловодный период 2007–2017 гг. он составил 0.15 млн. т/год [21]. При столь малом объеме стока речных взвесей, небольших глубинах на взморье Дона и в восточной части Таганрогского залива (в среднем 2.5–3 м), интенсивном воздействии на дно течений и волнения, величины накопления донных отложений ничтожно малы, а в некоторых частях акватории может наблюдаться их размыв. Определение количества образовавшихся осадков стандартными океанографическими методами существенно затруднено, однако результаты расчетов с использованием математической модели позволяют обозначить предполагаемые районы их накопления.

В качестве граничных условий для модельных экспериментов было задано поступление взвешенных веществ из трех основных рукавов дельты Дона: Большая Кутерьма, Мокрая Каланча и Старый Дон (судоходный канал). Это поступление, или боковой приток, ($Q_{бок}$) рассчитано на основе данных экспедиционных исследований [19]: расходов воды (Q_w), взвешенных наносов (R), площадей живого сечения реки (S) в устьях рассматриваемых рукавов (табл.1). Так же рассчитана скорость течения в устье рукавов (V). Согласно [19], наибольшее количество взвеси поступает через рукав Кутерьма, что учитывалось при задании граничных условий.

В пределах Азовского моря преобладающими являются ветры восточного и западного направлений [22]. Ветры с западной составляющей вызы-

вают нагон воды из Таганрогского залива и подъем уровня в Дону, ветры с восточной составляющей вызывают сгон воды и падение уровня [23]. Исследование сгонно-нагонных явлений в дельте Дона показали, что большинство сгонов и нагонов (за исключением экстремальных случаев) происходит при действии ветра со скоростью в среднем 7 м/с [24].

Таблица 1. Гидрологические параметры устьев основных рукавов дельты Дона.

Название рукава	Q_w , м ³ /с	R , кг/с	Ширина русла b , м	Глубина русла H , м	S , м ²	$Q_{бок}$, кг/м ² с	V , м/с
Большая Кутерьма	286	4.7	770	3	1540	0.0031	0.186
Мокрая Каланча	141	1.7	700	3	1400	0.0012	0.101
Старый Дон (проток Песчаный, судоход- ный канал)	160	3.5	440	5	1470	0.0024	0.109

Модельные расчеты проводились на период 6–7 календарных дней при следующих ветровых ситуациях: безветренная погода, восточный ветер 6–8 м/с, юго-западный ветер 6–8 м/с. При этом учитывалось распределение по рукавам Дона поступающего в залив твердого стока.

3. Результаты и их обсуждение

Хотя численное исследование процесса осадконакопления речных наносов выполнено для области устьевого взморья Дона, расчеты гидродинамики и переноса вещества были сделаны для всего Таганрогского залива. Использована математическая модель ветровых течений Таганрогского залива [25], которая достаточно адекватно описывает эти процессы в водоеме. Подобная модель для Азовского моря в целом в настоящее время используется в программном комплексе EX-MARE [26] для прогнозирования опасных явлений.

Задача решалась конечно-разностными методами на равномерной сетке. Шаг сетки по горизонтали составлял $\Delta x = \Delta y = 200$ м, по вертикали $\Delta z = 0.5$ м с числом узлов $617 \times 357 \times 19$, что дало 4200000 ячеек. Шаг по времени задавался 600 с. После индексации ячеек в расчетной области число ячеек с неизвестными параметрами стало примерно 650000. Исследование консервативности построенных моделей гидродинамики не проводилось. Численная реализация модели осуществлялась на высокопроизводительных вычислительных системах в среде MPI с использованием пакета параллельных подпрограмм Aztec.

3.1. Пространственно-временные особенности распределения взвешенных наносов на устьевом взморье Дона. Численно установлено, что при действии восточного ветра 6–8 м/с в течение всего расчетного периода

(6–7 календарных дней) движение воды носит поступательный характер с отсутствием каких-либо циркуляционных зон.

При действии юго-западного ветра 6–8 м/с картина линий тока меняется во времени. В первые сутки движение воды имеет поступательный характер (рис.1А). Затем начинают образовываться две циркуляционные зоны: одна в районе Таганрога, другая примерно в центральной части устьевоего взморья. Через 4–5 суток движение воды принимает установившийся характер с двумя ярко выраженными циркуляционными зонами (рис.1Б).

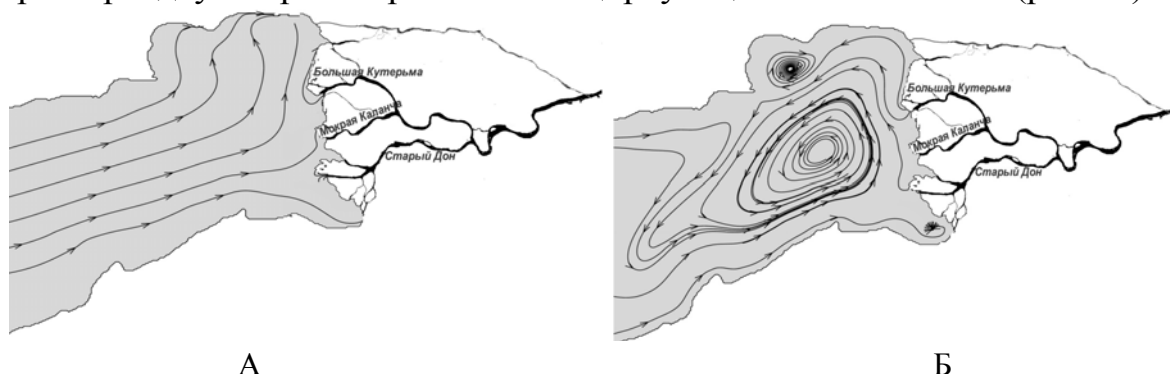


Рис.1. Линии тока течения в Таганрогском заливе после первых суток действия юго-западного ветра 6–8 м/с (А) и после 4 суток действия юго-западного ветра 6–8 м/с (Б).

При проведении численного исследования распределения твердого стока по взморью рассмотрены два типа взвешенного вещества: относительно легкое и относительно тяжелое. Входные данные для этих типов вещества заданы значениями критического напряжения на оседание и размывание, а также скоростью оседания. Вычислительные эксперименты показали, что поля концентрации взвеси подобны для обеих фракционных групп.

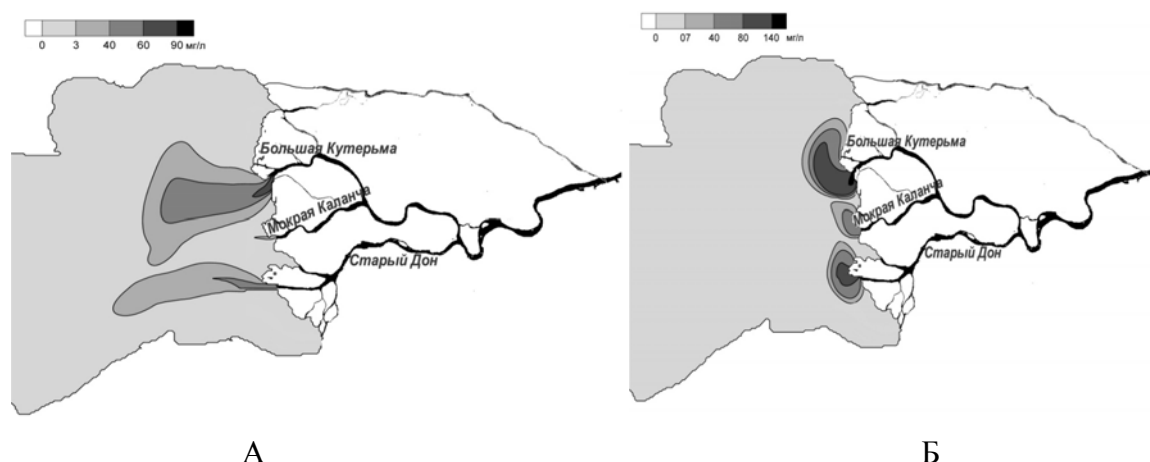


Рис.2. Распределение концентраций взвешенного вещества (мг/л) на взморье Дона после действия восточного ветра 6–8 м/с в течение 7 суток (А) и после действия юго-западного ветра 6–8 м/с в течение 7 суток (Б).

Существенное влияние на распределение взвешенного вещества ока-

зывает ветровая ситуация. Распространение взвеси при действии восточного ветра 6-8 м/с (сгон) происходит в виде двух пятен: одно, более широкое, образовано взвесью из рукава Большая Кутерьма, другое, вытянутое вдоль Азовского судоходного канала, – из рукава Старый Дон (рис.2А). Количество взвешенных наносов, поступающих из рукава Мокрая Каланча, изначально значительно меньше, чем из двух других рукавов. Кроме того, скорость течения при сгоне воды успевает снизить здесь концентрацию взвеси до значений, пренебрежимо малых по сравнению с концентрациями, образованными твердым стоком из рукавов Большая Кутерьма и Старый Дон.

При действии юго-западного ветра 6-8 м/с (нагон) течение воды «прижимает» взвесь к устьям рукавов Дона, не давая распространяться в сторону залива. Нагонное течение препятствует проникновению взвеси из рукава Мокрая Каланча, тем самым образуя третье пятно взвешенного вещества (рис.2Б).

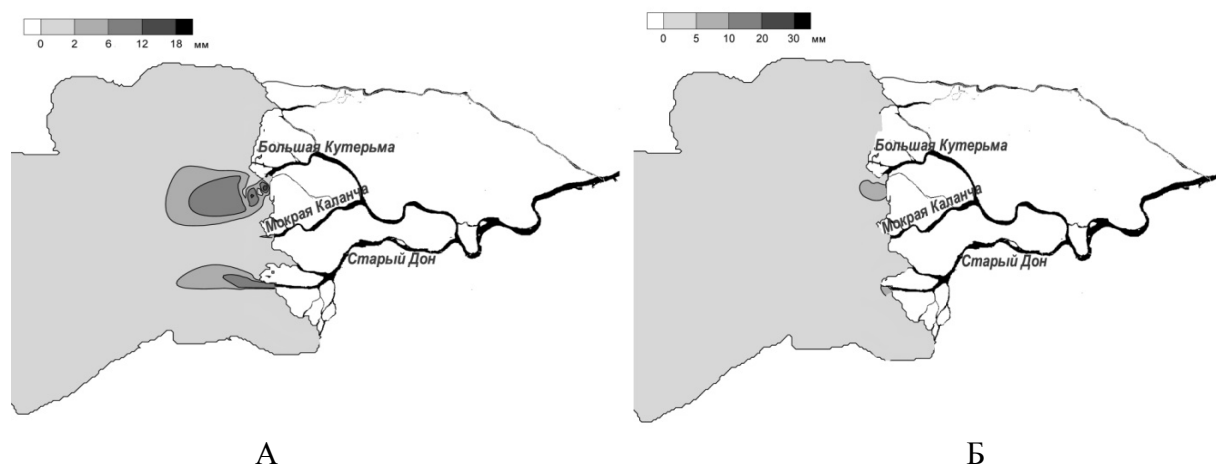


Рис.3. Величина деформации дна (мм) на взморье Дона в случае крупной взвеси (А) и мелкой взвеси (Б) при действии восточного ветра 6-8 м/с.

Численное исследование процесса деформации дна за счет осадконакопления твердого стока показало, что при восточном ветре 6-8 м/с крупная взвесь начинает оседать ближе к устьевому створу (рис.3А) и деформация дна при этом значительней, чем при оседании мелкой взвеси (рис.3Б). Легкие фракции взвеси не осаждаются в районе Азово-Донского судоходного канала в отличие от тяжелых фракций, а выносятся течением в сторону залива.

При действии юго-западного ветра 6-8 м/с оседание взвеси происходит вблизи устьевого створа. Тяжелые фракции образуют три области деформации дна (рис.4А), легкие – только две (рис.4Б).

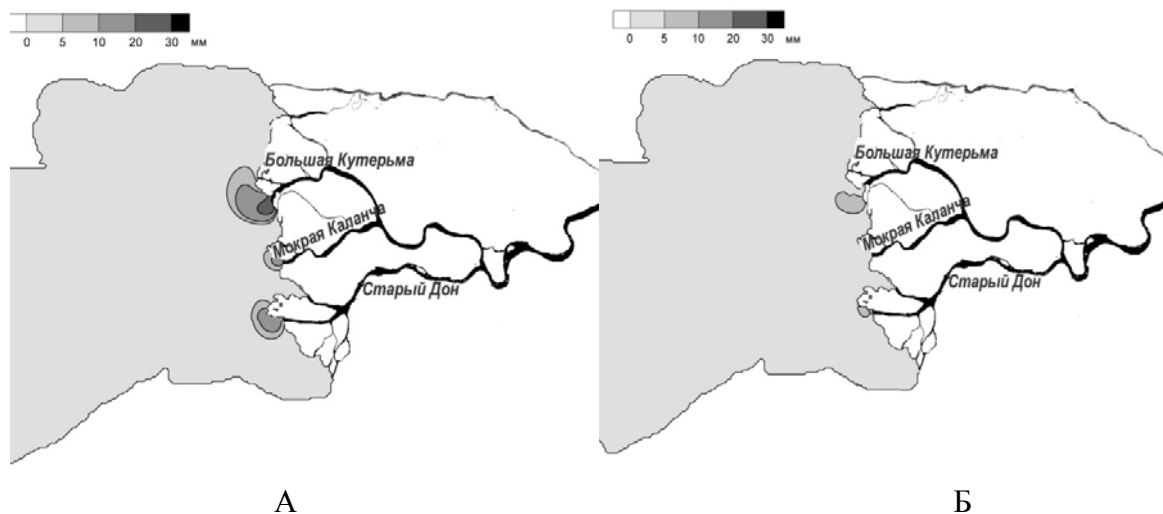


Рис.4. Величина деформации дна (мм) на взморье Дона в случае крупной взвеси (А) и мелкой взвеси (Б) при действии юго-западного ветра 6-8 м/с.

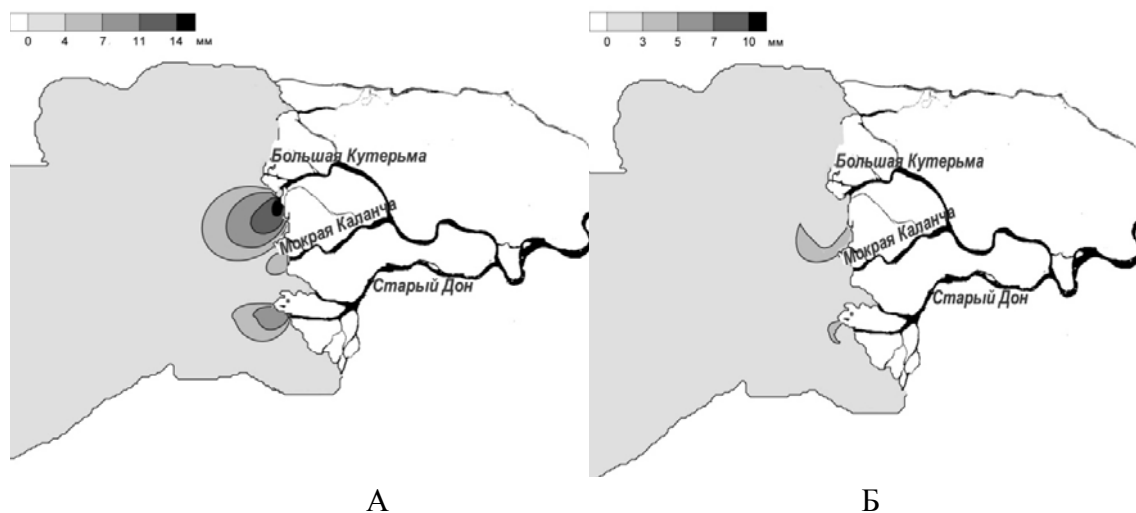


Рис.5. Величина деформации дна (мм) на взморье Дона в случае крупной взвеси (А) и мелкой взвеси (Б) при действии слабого ветра переменных направлений.

При слабом ветре переменных направлений на величину осаждаемого осадка влияет только течение в основных рукавах дельты Дона. Это особенно четко выражено в окрестности устья Большой Кутерьмы. Тяжелая взвесь начинает оседать сразу за устьем, как только скорость истекания резко падает (рис.5А). Легкая взвесь продолжает перемещаться, пока скорость течения не станет достаточно малой. В этом случае прослеживается свободное от легкой взвеси пятно вблизи устьев рукавов (рис.5Б).

С целью верификации математической модели был выполнен отбор проб воды с последующим определением концентрации общей взвеси. Отбор проб проводился в ходе рейса на НИС «Профессор Панов» в период с 26 по 28 июля 2018 года. Метеорологическая обстановка на момент проведения морских научных работ характеризовалась устойчивым ветром вос-

точных румбов со скоростью 3–5 м/с 26 июля при движении от устья рукава Старый Дон вглубь залива и 7–12 м/с 28 июля при движении обратно, в сторону дельты Дона.

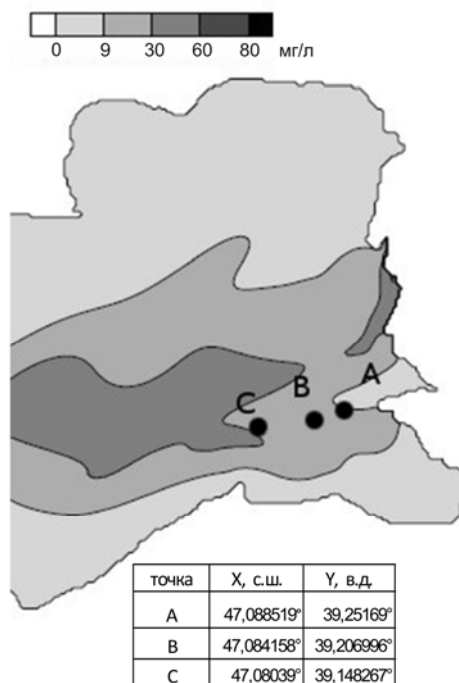


Рис.6. Распределение концентрации взвешенного вещества (мг/л) на конец эксперимента (28.07.2018 г.) и точки наблюдений за концентрацией взвеси в период 26 – 28.07.2018 г.

Модельный эксперимент на 26-28 июля 2018 г. выполнен с использованием данных о ветровой ситуации ГМС Таганрог. Расчетные значения концентрации взвешенного вещества сравнивались с наблюдаемыми величинами взвеси в трех точках (А, В, С) устьевого взморья Дона (рис.6). Относительная погрешность расчетов на конец эксперимента (28.07.2018 г.) в выбранных точках изменялась от 1 до 12%. Лучшие результаты наблюдались в точке В, где погрешности расчетов составляли 9.5% в начале и 3.5% в конце эксперимента.

Анализ сопоставления результатов моделирования и данных наблюдений показал высокую степень соответствия расчетных и наблюдавшихся *in situ* значений (рис.7). Обращает на себя внимание схожая в обоих случаях тенденция: пониженные концентрации взвеси вблизи устья реки и повышенные в более маристой части залива, что также говорит об адекватности модели.

4. Заключение

Специфика гидродинамических ситуаций в Таганрогском заливе Азовского моря определяет необходимость разработки и применения специаль-

ных методик полевых исследований и методов математического моделирования, позволяющих получать информацию о характере седиментационных процессов на акватории, дифференцированных по типам: штиль, сгон, нагон, а также для отдельных их стадий (развитие, стабилизация и затухание).

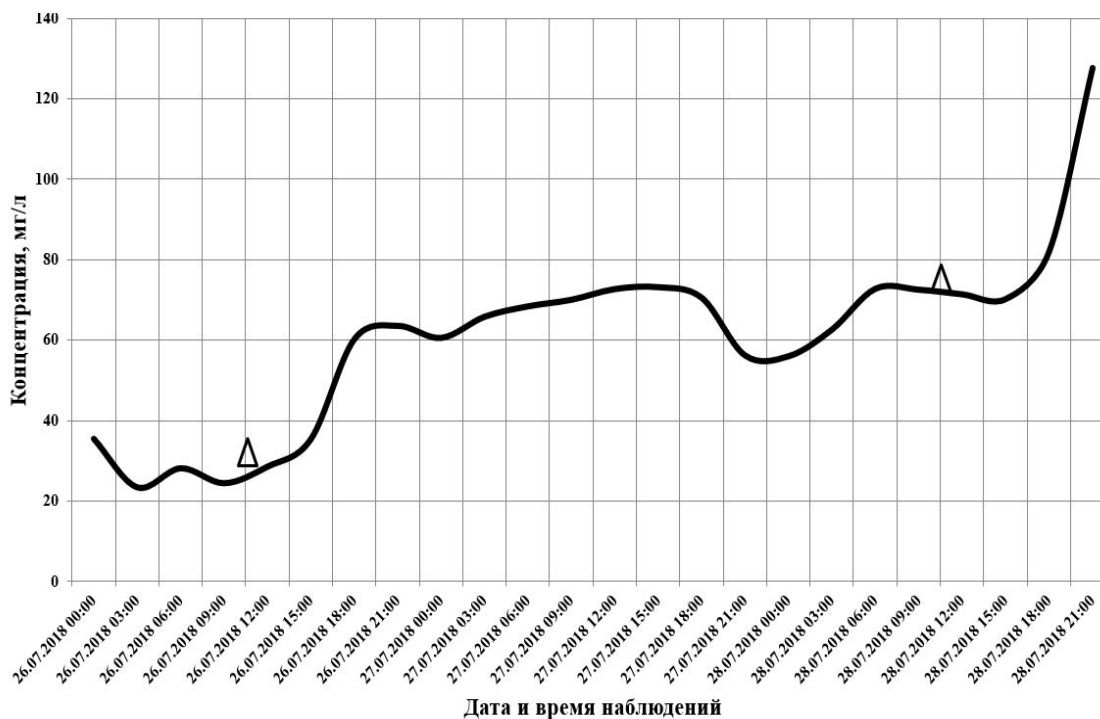


Рис.7. Расчетные "—" и наблюдаемые "Δ" значения концентрации взвешенного вещества в точке В в период 26–28.07.2018 г.

Предложенный в настоящей работе подход позволил выполнить оценку пространственно-временных особенностей распределения взвешенных наносов на взморье Дона при разных гидродинамических ситуациях. Свойства используемой двухслойной математической модели дали возможность быстро адаптировать ее для Таганрогского залива, отличающегося большой неоднородностью глубин. Численная реализация модели на высокопроизводительных системах позволяет оперативно получать результаты для долгосрочных прогнозов.

Результаты численных экспериментов согласуются с натурными данными для относительно небольших временных промежутков, а также с имеющимися в литературе представлениями о распределения речных взвесей на устьевом взморье Дона. Так, согласно [14], оседание крупной взвеси происходит на расстоянии 3–4 км от устьев главных рукавов и на расстоянии 0.5–1 км от устьев второстепенных рукавов дельты Дона. Результаты модельных оценок также хорошо согласуются в качественном плане с данными экспедиционных исследований ЮНЦ РАН в 2006–2018 гг.

Количественные отличия концентраций взвешенного вещества по ре-

зультатам расчетов и данным наблюдений в Таганрогском заливе позволяют косвенно оценить автохтонную составляющую взвеси и оконтурить районы, где концентрация взвешенного вещества в воде определяется уже не речным стоком, а другими внутриводоемными процессами, прежде всего взмучиванием нелитифицированных донных отложений.

Полученные результаты планируется в дальнейшем использовать при изучении специфических загрязняющих веществ, поступающих с речным стоком в Азовское море, таких как тяжелые металлы, микропластик и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.Г. Панов, М.К. Спичак. Об условиях осадконакопления в Азовском море // Современные осадки морей и океанов. Под ред. Н.М. Страхова. – М.: Изд. АН СССР, 1961, с.512-520;
D.G. Panov, M.K. Spichak. Ob usloviiakh osadkonakopleniia v Azovskom more. // Sovremennye osadki morei i okeanov. Pod red. N.M. Strahova. – M.: Izd. AN SSSR, 1961, s.512-520.
2. М.В. Федосов. Некоторые характеристики осадкообразования в Азовском море. // Современные осадки морей и океанов. Под ред. Н.М. Страхова. – М.: Изд. АН СССР, 1961, с.504-511;
M.V. Fedosov. Nekotorye kharakteristiki osadkoobrazovaniia v Azovskom more. // Sovremennye osadki morei i okeanov. Pod red. N.M. Strahova. – M.: Izd. AN SSSR, 1961, s.504-511.
3. Ю.П. Хрусталева, Л.З. Ганичева, Л.З. Клунникова, И.А. Мирзоян. Количественное распределение и основные типы взвеси Азовского моря // Лавинная седиментация в океане. – Ростов-н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1982, с.95-118;
Yu.P. Hrustalev, L.Z. Ganicheva, L.Z. Klunnikova, I.A. Mirzoyan. Kolichestvennoe raspredelenie i osnovnye tipy vzvesi Azovskogo moria // Lavinnaiia sedimentatsiia v okeane. Rostov-n/D: Izd-vo Rost. un-ta, 1982, s.95-118.
4. С.Я. Черноусов, Ю.В. Артюхин. Основные черты осадконакопления во внутриконтинентальных водоемах аридной зоны (на примере оз. Балхаш и Азовского моря). // Лавинная седиментация в океане. – Ростов-н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1982, с.162-170;
S.Ya. Chernousov, Yu.V. Artyuhin. Osnovnye cherty osadkonakopleniia vo vnutrikontinentalnykh vodoemakh aridnoi zony (na primere oz. Balhash i Azovskogo moria). // Lavinnaiia sedimentatsiia v okeane. – Rostov-n/D: Izd-vo Rost. un-ta, 1982, s.162-170.
5. Ю.П. Хрусталева. Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны. – Л.: Наука, 1989, 261 с.;
Yu.P. Hrustalev. Zakonomernosti osadkonakopleniia vo vnutrikontinentalnykh moriakh aridnoi zony. – L.: Nauka, 1989, 261 s.
6. Л.Я. Грудина. Перенос осадочного материала в Азовском море. – М.: 1989, автореф. дисс. канд. геогр. наук;
L.Ya. Grudinova. Perenos osadochnogo materiala v Azovskom more. – M.: 1989, avtoref. diss. kand. geogr. nauk.
7. Ю.П. Хрусталева, О.В. Ивлиева. Проблемы антропогенной морской седиментологии (на примере Азовского моря). – Ростов-на-Дону: ГЕФЕСТ, 1999, 196 с.;
Yu.P. Hrustalev, O.V. Ivlieva. Problemy antropogennoi morskoi sedimentologii (na primere Azovskogo morya). – Rostov-na-Donu: Gefest, 1999, 196 s.

8. *О.В. Ивлиева.* Особенности осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. – Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 2009, 320 с.;
O.V. Ivlieva. Osobennosti osadkonakopleniia v Azovskom more vo vtoroi polovine XX veka. – Rostov-na-Donu: Izd. YUFU, 2009, 320 s.
9. *В.В. Сорокина.* Особенности терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. – Ростов-на-Дону: 2006, дисс. к.г.н.
V.V. Sorokina. Osobennosti terrigenного osadkonakopleniia v Azovskom more vo vtoroi polovine XX veka. – Rostov-na-Donu; 2006, diss. k.g.n.
10. *В.В. Сорокина, С.В. Бердников.* Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море // *Океанология*, 2008, т.48, №3, с.456-466;
англ. пер.: *V.V. Sorokina and S.V. Berdnikov.* Mathematical Modeling of the Terrigenous Sedimentation in the Sea of Azov // *Oceanology*, 2008, v.48, №3, p.418-427.
11. *Л.Г. Чикина, А.Л. Чикин.* Математическая модель процесса заиления подходовых судоходных каналов в Таганрогском заливе // *Матем. моделир.*, 2009, №2, с.29-35;
L.G. Chikina, A.L. Chikin. Matematicheskaiia model processa zaileniia podkhodnykh sudokhodnykh kanalov v Taganrogskom zalive // *Matem. modelir.*, 2009, t.21, №2, s.29-35.
12. *А.И. Сухинов, А.Е. Чистяков, Е.А. Проценко.* Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежной зоне мелководных водоемов // *Матем. моделирование*, 2013, т.25, №12, с.65-82;
англ. пер.: *A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, E.A. Protsenko.* Mathematical modeling of sediment transport in the coastal zone of shallow reservoirs // *Math. Models Comput. Simul.*, 2014, v.6, №4, p.351-363.
13. *А.И. Сухинов, А.Е. Чистяков, А.В. Шишениа, Е.Ф. Тимофеева.* Предсказательное моделирование прибрежных гидрофизических процессов на многопроцессорной системе с использованием явных схем. // *Матем. моделирование*, 2018, т.30, №3, с.83-100;
A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, A.V. Shisheniya, E.F. Timofeeva. Predskazatelnoe modelirovanie pribrezhnykh gidrofizicheskikh processov na mnogoprocessornoii sisteme s ispolzovaniem yavnykh skhem // *Matem. modelirovanie*, 2018, t.30, №3, s.83-100.
14. *А.М. Бронфман, Е.П. Хлебников.* Азовское море. Основы реконструкции. – Л.: Гидрометеиздат, 1985, 271 с.;
A.M. Bronfman, E.P. Khlebnikov. Azovskoe more. Osnovy rekonstruktsii. – L.: Gidrometeoizdat, 1985, 271 p.
15. *А.Л. Чикин.* Двухслойная математическая модель ветровых течений в водоемах, имеющих большие площади мелководья // *Матем. моделирование*, 2009, т.21, №12, с.152-160;
A.L. Chikin. Dvukhsloinaia matematicheskaiia model vetrovykh techenii v vodoemakh, imiushchikh bolshie ploshchadi melkovodia // *Matem. modelirovanie*, 2009, t.21, №12, s.152-160.
16. *А.Л. Чикин, И.Н. Шабас, С.Г. Сидиропуло.* Моделирование процесса переноса загрязняющего вещества в Цимлянском водохранилище // *Водные ресурсы*, 2008, т.35, №1, с.53-59.
англ. пер.: *A.L. Chikin, I.N. Shabas and S.G. Sidiropulo.* Modeling Pollutant Transport in the Tsimlyanskoe Reservoir // *Water Resources*, 2008, v.35, №1, p.51-57.
17. *A.J. Mehta, and E. Partheniade.* An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment // *Journal of Hydraulic Research*, 1975, v.13, №4, p.361-381.
18. *E. Partheniades,* Erosion and deposition of cohesive soils // *Journal of the Hydraulics Division*, 1965, v.91, Issue 1, p.105-139.
19. *Д.Г. Матишов, Г.В. Пряхина, И.В. Федорова, В.В. Сорокина.* Современный сток воды и наносов в дельте реки Дон (по результатам экспедиционных исследований) // *Вестник Южного научного центра РАН*, 2008, т.4, №3, с.72-77;
D.G. Matishov, G.V. Pryakhina, I.V. Fedorova, V.V. Sorokina. Sovremennyi stok vody i

- nanosov v delte reki Don (po rezultatam ekspeditsionnykh issledovaniy) // Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra, 2008, t.4, №3, s.72-77.
20. В.В. Сорокина, О.В. Ивлиева, П.М. Лурье. Динамика стока на устьевых участках рек Дон и Кубань во второй половине XX века // Вестник Южного научного центра РАН, 2006, т.2, №2, с.58-67;
V.V. Sorokina, O.V. Ivlieva, P.M. Lur'e. Dinamika stoka na ustevykh uchastkakh rek Don i Kuban vo vtoroi polovine XX veka // Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra, 2006, t.2, №2, s.58-67.
21. А.В. Клещенок. Особенности твердого стока р.Дон в современный маловодный период // Сб. докладов межд. науч. конф. памяти выдающегося русского гидролога Ю.Б. Виноградова «Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии» [Электронный ресурс]; С.-Петербург, 28–30 марта 2018 года / Ред. О. М. Макарьева. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2018, 982 с.;
A.V. Kleshchenkov. Osobennosti tverdogo stoka r.Don v sovremennyi malovodnyi period // Sb. dokladov mezhd. nauch. konf. pamiati vydayushchegosia russkogo gidrologa Yu.B. Vinogradova «Tret'i vinogradovskie chteniia. Grani gidrologii» [Elektronnyi resurs]; S.-Peterburg, 28–30 marta 2018 goda / Red. O.M. Makar'eva. – SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2018, 982 s.
22. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 05. Азовское море. Справочник // СПб: Гидрометеоздат, 1991, 237 с.;
Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Tom 05. Azovskoe more. Spravochnik // SPb: Hidrometeoizdat, 1991, 237 s.
23. Н.А. Родионов. Гидрология устьевой области Дона. – М.: Гидрометеоздат, 1958, 98 с.;
N.A. Rodionov. Hidrologiya ust'evoi oblasti Dona. – M.: Hidrometeoizdat, 1958, 98 s.
24. Е.П. Пономаренко, В.В. Сорокина, П.А. Бирюков. Сгонно-нагонные явления в дельте реки Дон в 2007–2010 гг. и их прогнозирование // Вестник ЮНЦ РАН, 2012, т.8, №1, с.28-37;
E.P. Ponomarenko, V.V. Sorokina, P.A. Biryukov. Sgonno-nagonnye yavleniia v delte reki Don v 2007-2010 gg. i ikh prognozirovaniie // Vestnik YuNTs RAN, 2012, t.8, №1, s.28-37.
25. А.Л. Чикин. Моделирование ветровых течений в Таганрогском заливе // Труды Южного научного центра РАН. – Изд. ЮНЦ РАН, 2009, с.123-126;
A.L. Chikin. Modelirovanie vetrovykh techenii v Taganrogskom zalive // Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN. – Izd. YUNC RAN, 2009, s.123-126.
26. С.В. Бердников, В.В. Кулыгин, И.В. Швердяев, И.А. Третьякова и др. Программный комплекс "EX-MARE" – система краткосрочного прогнозирования опасных природных явлений в регионе Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика. Сб. статей в 3 т. Т.1: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – Южный федеральный университет: Из-во ЮФ. – Ростов-на-Дону, 2015, с. 47-59;
S.V. Berdnikov, V.V. Kulygin, I.V. SHeverdyayev, I.A. Tret'yakova i dr. Programmnyi kompleks "EX-MARE" – sistema kratkosrochnogo prognozirovaniia opasnykh prirodnykh yavlenii v regione Azovskogo moria // Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Sb. statei v 3 t. T.1: Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem. – YFU: Iz-vo YuFU. – Rostov-na-Donu, 2015, s.47-59.

Поступила в редакцию 22.04.19

После доработки 16.09.19

Принята к публикации 21.10.19