

Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клещенков А.В., Кулыгин В.В.

**СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ HEC RAS И
МУЛЬТИКОМПАРТМЕНТАЛЬНОЙ БАЛАНСОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ
ПЕРЕНОСА И ТРАНСФОРМАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В РЕЧНОЙ ДЕЛЬТЕ:
СЛУЧАЙ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ Р. ДОН**

Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Российская федерация
berdnikovsv@yandex.ru

Аннотация

Предложен подход к совместному применению гидрологической модели HEC RAS и мультикомпарментальной балансовой модели для описания переноса и трансформации взвешенных веществ в речной дельте.

В устьевой области реки выделяются гидрологические районы (компарменты): русловые районы (основное русло, рукава и протоки дельты), пойменные районы, затапливаемые при высоких паводках и штормовых нагонах со стороны моря, и авандельта. Для выделенных районов строится динамическая модель баланса воды и веществ, переносимых водными массами. Введена параметризация процессов оседания взвешенных веществ и их взмучивания (ресуспензии) в зависимости от скорости движения воды и размера частиц. Рассматривается три градации взвеси по размерам: пелитовая фракция (глина), алевритовая фракция (ил) и мелкий песок.

Акцент сделан на оценке влияния морских штормовых нагонов на перенос и оседание взвешенных веществ в речную дельту в сравнении с гидрологическим режимом при отсутствии нагонов. Для описания потоков воды между районами, скоростей движения, динамики уровня и процессов затопления поймы применяется детальная гидрологическая модель HEC RAS, адаптированная к условиям устьевой области р. Дон. На основе данных полевых наблюдений в дельте Дона выполнена калибровка параметров модели и их верификация.

Выполнены расчеты переноса и накопления взвешенных веществ в устьевой области Дона для двух гидрологических режимов – без и с учетом нагона воды со стороны моря. Рассмотрена пространственно-временная изменчивость концентрации и гранулометрического состава взвешенных наносов в зависимости от гидрологических условий. Показано, что при нагоне воды с моря в дельту может поступать и накапливаться в ней более 21 % взвешенного материала, поступающего с нагонными морскими водами.

Ключевые слова

Мультикомпарментальная балансовая модель, взвешенное вещество, гидрологическая модель НЕС RAS, штормовой нагон, дельта, устьевая область, река Дон

Введение

Дельты рек мира являются важными географическими районами, включающими около 0,5 % площади суши, но населенными почти 5 % населения мира (Dunn et al., 2019). Еще 140 миллионов человек проживают в пределах 25 км от дельт, а 3,5 миллиарда — в дельтовых водосборных бассейнах (Tessler et al., 2015). Таким образом, почти половина населения земного шара проживает в дельтах или вблизи них и в их водосборных бассейнах.

Дельты включают в себя разнообразные ландшафты, такие как водно-болотные угодья, прибрежную растительность, реки, приливные каналы и эстуарные водоемы, которые обеспечивают важные экосистемные услуги (Rasghleight, 2010).

Вместе с тем дельты сталкиваются с различными угрозами (Syvitski et al., 2007; Giosan et al., 2014; Day et al., 2016; Day and Rybczyk, 2019), которые снижают ценность экосистемных товаров и услуг. Глобальное эвстатическое повышение уровня моря, превышающее 3-4 мм/год (Dieng et al., 2017), рассматривается как реальная угроза для дельт мира (Giosan et al., 2014, Day and Rybczyk, 2019). Плотины и водохранилища как в самих дельтах, так и вверх по течению также представляют серьезную угрозу для дельт из-за сокращения поступления взвешенных наносов, а также из-за использования пресной воды населением, промышленностью и сельским хозяйством (Wolters, 2015).

Дельта реки Дон расположена в европейской части юга России и является самой восточной из дельт Средиземно-Черноморского бассейна. В сравнении с 48 крупнейшими дельтами земного шара (Dunn et al., 2019), она может занимать 45-е место по площади дельты, 20-е место по площади бассейна и 27-е место по численности проживающего здесь населения.

За последние 60 лет морской край дельты Дона перестал выдвигаться в море после введения в эксплуатацию Цимлянского водохранилища в 1953 г. и низконапорных плотин ниже по течению (Venevsky et al., 2022; Venevsky et al., препринт). На отдельных участках фронт дельты даже стал двигаться в сторону суши. Причиной, с одной стороны, стало уменьшение поступления речных наносов (более чем в 10 раз). С другой стороны, в тот же время произошли изменения в региональной атмосферной циркуляции. Преобладающими ветрами стали западные и юго-западные, формирующие значительные штормовые нагоны морской воды в дельту, которые способны приносить большое количество взвеси. В последние годы положение фронта дельты стабилизировалось.

Кроме стабилизации морского края дельты с середины 1980-х годов начала уменьшаться средняя ширина речных каналов. Максимальное изменение проявляется на

расстоянии 15-20 км от морского края. Здесь к 2020 г. средняя ширина каналов уменьшилась на 80-100 м или 10 %. Возможное объяснение этому – зарастание и заиливание каналов из-за поступления взвешенных веществ при нагонах воды с моря.

Экосистема Азовского моря, куда впадает р. Дон, в настоящее время испытывает беспрецедентное сочетание негативных факторов, включающее повышение солености и температуры вод (Бердников и др., 2022), трансформацию водного сообщества, вызванную вытеснением аборигенных видов инвазионными таксонами, предположительно в связи с изменением климата в регионе (Berdnikov et al., 2023).

Большие нагоны, возможно спасая дельту от разрушения, приносят соленую воду, что должно неизбежно сказаться как на развитии водно-болотных сообществ дельты, так и на процессах биогеохимической трансформации веществ, поступающих с рекой и из моря, в зоне их взаимодействия (Герасюк, Бердников, 2021). Последняя все чаще смещается вглубь дельты.

Целью настоящей работы является описание подхода к моделированию влияния морских факторов (штормовые нагоны, приливы) на перенос и накопление взвешенных веществ и связанных с ними химических соединений в дельте в условиях недостаточной водности речного стока (период маловодья) и проникновения соленых вод глубоко в дельту.

1 Материал и методы

1.1 Регион исследования

Дельта Дона имеет классическую треугольную форму с вершиной на востоке в Ростове-на-Дону, где рукав Мертвого Донца ответвляется от реки Дон, фронтом дельты на западе ($39^{\circ}11' - 39^{\circ}43'$ в.д. и $47^{\circ}05' - 47^{\circ}16'$ с.ш.) и занимает площадь около 540 км^2 . Бассейн Нижнего Дона (территория, включающая Цимлянское водохранилище и бассейн реки Дон ниже плотины) имеет длину до устья 310 км и площадь бассейна $169\,000 \text{ км}^2$.

В ландшафте дельты Дона, близком к уровню моря, преобладают водно-болотные угодья и множество водотоков, начиная от первичных и вторичных водотоков и многочисленных ериков (небольших каналов, соединяющих внутренние водоемы дельты). Основными рукавами (каналами стока, протоками) в дельте являются Старый Дон, Большая Каланча, Мокрая Каланча, Большая и средняя Кутерьма, Мертвый Донец (рис. 1). Ниже г. Азов Старый Дон превращен в Азово-Донской судоходный канал (более подробно см. Матишов и др., 2019). Глубина проток Дона колеблется от 2 до 20 метров. Количество проток и ериков в дельте увеличивается по направлению к морю, а площадь островов уменьшается.

Высота дельты в основном составляет 0,5–1 м. В центральной части встречаются небольшие приподнятые «холмы» высотой до 5–6 м, являющиеся остатками старой поймы. Топография дельты была значительно изменена деятельностью человека в результате

строительства оросительных (глубина 0,5–2,5 м) и дренажных (глубина 2–4 м) каналов, малых искусственных водохранилищ (площадью 0,3–1 км²) и небольших плотин (высотой 2–5 м).



Рисунок 1. Регион исследования. Точками отмечены пункты наблюдения за уровнем и расходом воды.

1.2 Подход к моделированию водного и вещественного баланса устьевой области Дона

Для моделирования динамики воды и вещества в дельте предлагается подход, учитывающий разный пространственно-временной масштаб наблюдаемых здесь явлений. События, связанные с нагоном воды со стороны моря как правило не превышают трех-четырёх суток. В остальные периоды времени, более длительные, территория дельты не затопливается. Таким образом годовом временном интервал можно разбить на подинтервалы с разным типом гидрологического режима: а) относительно короткий по времени, когда дельта подвержена

затоплению в результате поступления водных масс со стороны моря при штормовом нагоне и б) более длительным периодам, когда пойменные и русловые участки гидрологически не связаны. Вода и находящиеся в ней растворенные и взвешенные вещества перемещаются по русловым участкам в сторону моря, а на участках суши, расположенных в пойме дельты, протекают независимые от гидрологии реки процессы. Следует отметить, что в период весеннего половодья при больших расходах воды (для дельты Дона это расходы более $2000 \text{ м}^3/\text{с}$) территория дельты также может затапливаться речными водами, но в данной статье мы оставим этот случай за пределами рассмотрения.

В пространственном аспекте выделены следующие типы участков устьевой области. Во-первых, это русловые участки, каналы (протоки), которые постоянно находятся под водой и по которым вода и содержащиеся в ней растворенные и взвешенные вещества перемещаются в сторону моря, а при нагонах воды с моря могут перемещаться и в обратном направлении. Во-вторых, это участки поймы дельты, которые в основном в течение года представляют собой сушу, но иногда, в период нагонов или речных паводков затапливаются. На некоторых участках находятся населенные пункты, водные объекты естественного или искусственного происхождения, их пересекает множество ериков постоянного или временного (в период дождей) стока, есть водно-болотные угодья, заросшие тростником, луга, имеются пруды для выращивания рыбы. На значительной территории дельты Дона расположен природный парк «Донской» - особо охраняемая природная территория. В-третьих, это довольно большой участок Таганрогского залива – авандельта (подводная наклонная часть дельты, располагающаяся за её фронтом).

Разделив русловые сегменты на отдельные участки с учетом ветвления основного русла на рукава, протяженности каждого сегмента, получаем для устьевой области Дона следующее гидрологическое районирование (рис. 2). Всего выделено 106 компартментов (Дополнительные материалы, табл. ДМ1). Район с номером 103 объединяет авандельту. Район с номером 105 представляет собой участок основного русла реки Дон от г. Ростов-на-Дону до станции Раздорская, где установлен так называемый замыкающий гидрологический створ (граница устьевой области Дона). Участки поймы дельты справа и слева от русловых сегментов представляют собой водосборные территории, откуда вода по сложной системе ериков стекает в основные рукава.

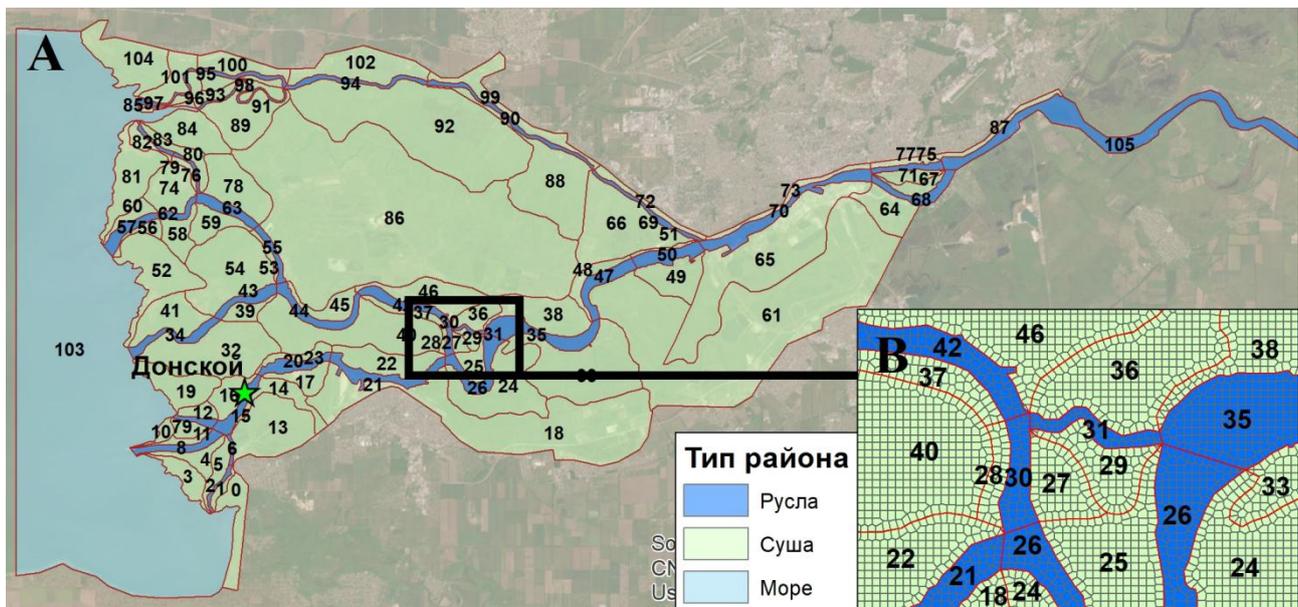


Рисунок 2. Гидрологическое районирование устьевой области Дона (А), гидрографическая сеть (Б) и пример сеточного разбиение для моделирования гидрологического режима с применением программного комплекса HEC RAS (B)

Для моделирования переноса и трансформации взвешенных и растворенных веществ в устьевой области используются две модели:

- а) мультикомпарментальная балансовая модель DeltaRiverBalanceModel;
- б) гидрологическая модель устьевой области Дона на базе программного комплекса HEC-RAS.

Информационной основой для исследования служат:

- база данных (БД) автоматизированных наблюдений за уровнем воды на гидрологических постах ЮНЦ РАН в дельте Дона за 2007–2020 гг. (<http://meteo.ssc-ras.ru/#>);

- БД гидрохимических показателей, полученных в ходе экспедиционных работ ЮНЦ РАН в устьевой области Дона в 2007–2021 гг. (Клещенков и др., 2023).

Гидрологическая модель устьевой области Дона на базе программного комплекса HEC-RAS

Программный комплекс HEC-RAS предназначен для моделирования течения воды по системам открытых каналов и вычисления профилей водной поверхности, применяется, в частности, в исследованиях по управлению поймами для оценки последствий затопления (The place for HEC-RAS modelers [Электронный ресурс]; Hicks, Peacock, 2005). Исследование течения воды в дельтах в условиях сгонно-нагонных и приливных колебаний уровня моря в последнее время также получает распространение (Pandey et al., 2021; Wang X, et al., 2021). Здесь мы опираемся на опыт оценки затопления дельты Дона в период экстремального нагона в сентябре 2014 г. (Шевердяев и др., 2017).

Расчётная область разделена на 87951 ячеек, средняя площадь ячеек — 10 тыс м², минимальная — 1,1 тыс м², максимальная — почти 25 тыс м². Для разделения области на ячейки была сначала построена регулярная сетка 100 на 100 м, затем в ней проведено ориентирование ячеек вдоль берегов и границ локальных водосборов (рис. 2 в). Приток речной воды по основному руслу в районе станицы Раздорская (рис. 2, район № 105) и динамика уровня в Таганрогском заливе (рис. 2, район № 103) при ветровом нагоне задаются в качестве граничных условий. Затем рассчитываются потоки воды между ячейками и объём воды в них. Расчетный шаг модели – 10 минут. Эти значения записываются в базу данных и используются моделью водного баланса для компартиментов принятого гидрологического районирования с одновременным расчетом баланса растворенных и взвешенных веществ. Данные о растительности в дельте Дона используются в качестве факторов, определяющих шероховатость поверхности, по которой течет вода.

Балансовая модель переноса растворенных и взвешенных веществ

Рассматриваемая модель DeltaRiverBalanceModel включает следующие блоки (модули):

- водного баланса;
- переноса и седиментации взвешенного вещества;
- переноса растворенных соединений;
- переноса и трансформации соединений тяжелых металлов (ТМ) в двух формах – взвешенной и растворенной.

Для каждого из выделенных гидрологический районов (компарментов) устьевой области справедливо следующее уравнение водного баланса (1):

$$V_i(t+dt) = V_i(t) + \sum_j Q_{i,j}(t,t+dt) - Q_{i,i}(t,t+dt) + Q_{in,i}(t,t+dt), \quad (1)$$

где $V_i(t+dt)$, $V_i(t)$ — объем воды в i -м районе в моменты времени t и $t+dt$ соответственно, тыс. м³; $Q_{i,j}(t,t+dt)$ — объем воды, поступивший в i -й район из j -того района в период времени $(t, t+dt)$, тыс. м³ (суммирование идет по всем j -м районам, которые имеют с i -м районом общую границу и для которых поток воды направлен в i -й район); $Q_{i,i}(t,t+dt)$ — объем воды, который вытек из i -го района в период времени $(t, t+dt)$, тыс. м³; $Q_{in,i}(t,t+dt)$ — объем воды, поступивший в i -й район из внешних источников в период времени $(t, t+dt)$, тыс. м³.

В рассматриваемом случае это приток речной воды по основному руслу и поступление водных масс из Таганрогского залива через границу районов дельты с предустьевым взморьем при ветровом нагоне. Не рассматриваются другие внешние источники (сбросы сточных вод, приток подземных вод и осадки). Также не принимаются во внимание испарение и потери на инфильтрацию воды в почву.

Величины $Q_{in,i}(t,t+dt)$ задаются в качестве внешних факторов в гидрологической модели НЕС-RAS, а величины $Q_{i,j}(t,t+dt)$, $Q_{i,i}(t,t+dt)$ рассчитываются в этой модели как потоки воды через границы между районами.

Модуль водного обмена необходим для согласования гидрологической модели НЕС RAS, в которой расчеты ведутся по ячейкам средним размером от 100 до 50 м, с гидрологическим районированием, где объединяются все ячейки, входящие в тот или иной район, обобщается информация по уровню воды, объему воды, площади затопления, потокам и скоростям движения воды через границы между ячейками и районами.

Для расчета динамики взвешенных веществ рассматривается следующее балансовое уравнение (2):

$$V_i(t+dt) b_i(t+dt) = V_i(t) b_i(t) + \sum_j Q_{i,j}(t,t+dt) b_j(t) - Q_{i,i}(t,t+dt) b_i(t+dt) + Q_{in,i}(t,t+dt) b_{in,i}(t) + \omega S_i(t,t+dt) [\alpha^0 b_i^* (t,t+dt) - b_i(t+dt)] dt, \quad (2)$$

где $b_i(t+dt)$, $b_i(t)$ — средняя по объему концентрация взвешенного вещества в i -м районе в моменты времени t и $t+dt$ соответственно, мг/дм³; $b_{in,i}(t)$ — концентрация взвешенного вещества в водных массах, поступающих извне, мг/дм³; ω — скорость осаждения (гидравлическая крупность) взвешенного вещества, м/с; $S_i(t,t+dt)$ — площадь района под водой, средняя в интервале времени $(t,t+dt)$, тыс. м²; $b_i^* (t,t+dt)$ — концентрация взвеси, обусловленная взвесенесущей способностью потока, средняя в интервале $(t,t+dt)$, мг/дм³.

Величина b^* , следуя (Zhang al., 2014), оценивается по следующей формуле (3):

$$b^* = K[(u^3/(gR\omega))^m], \quad (3)$$

где: $g=9.81$ м/с²; u - средняя (по вертикали) скорость течения, м/с; R - гидравлический радиус, м; K, m – эмпирические параметры; $K=5.0$ г/м³; $m=0.92$. Гидравлический радиус для р. Дон в нижнем течении и рукавов дельты можно считать пропорциональным средней глубине, $R \approx h$. Нижние индексы принадлежности к определенному району опущены.

Таким образом изменение концентрации взвеси в компартаментах кроме процессов поступления и выноса взвеси через боковые границы определяется процессами седиментации взвеси и ее взмучиванием из донных отложений. Интенсивность взмучивания корректируется параметром α^0 .

Скорость осаждения частиц (гидравлическая крупность) зависит от их размера k (м) и рассчитывается, следуя (Барышников, Попов, 1988), по формуле (4):

$$\omega = [(2g(\rho_1 - \rho)k/1,75)^{1/2}]/\phi, \quad (4)$$

где ω — гидравлическая крупность (м/с); $\rho_1 = 2650$ мг/дм³ — плотность частиц; $\rho = 1000$ мг/дм³ — плотность воды; ϕ_i — параметр турбулентного поведения наносов в потоке, который отражает особенности осаждения частиц в реальных условиях водоема.

Взвесь разделена на три группы по размерам: пелитовая фракция (глина, clay), частицы размером меньше 0,01 мм, алевритовая фракция (ил, silt), частицы размером 0,1-0,01 мм и песчаная фракция (песок, sand), частицы размером более 0,1 мм. В разделе «Дополнительные материалы» в таблице ДМ2 приведена оценка гидравлической крупности рассматриваемых частиц взвеси в соответствии с формулой (3).

Так как в данной статье не рассматривается динамика растворенных в воде соединений, а также перенос и биогеохимическая трансформация соединений тяжелых металлов, мигрирующих в растворенной и взвешенной формах, уравнения для описания их динамики здесь не приводятся.

2 Результаты моделирования влияния нагонов на перенос и седиментацию взвешенного материала в устьевой области Дона

2.1 Верификация гидрологической модели HEC RAS

Проверка гидрологического блока модели проводилась путём сравнения результатов расчётов с измерениями расходов воды на поперечных профилях в судоходном русле Дона, в рукавах Каланча и Кутерьма и в гирлах юго-западной части дельты, выполненными 13–15 сентября 2016 г. для подгонки параметров модели и 22–23 сентября 2014 г. для контрольной проверки (рис. 3).

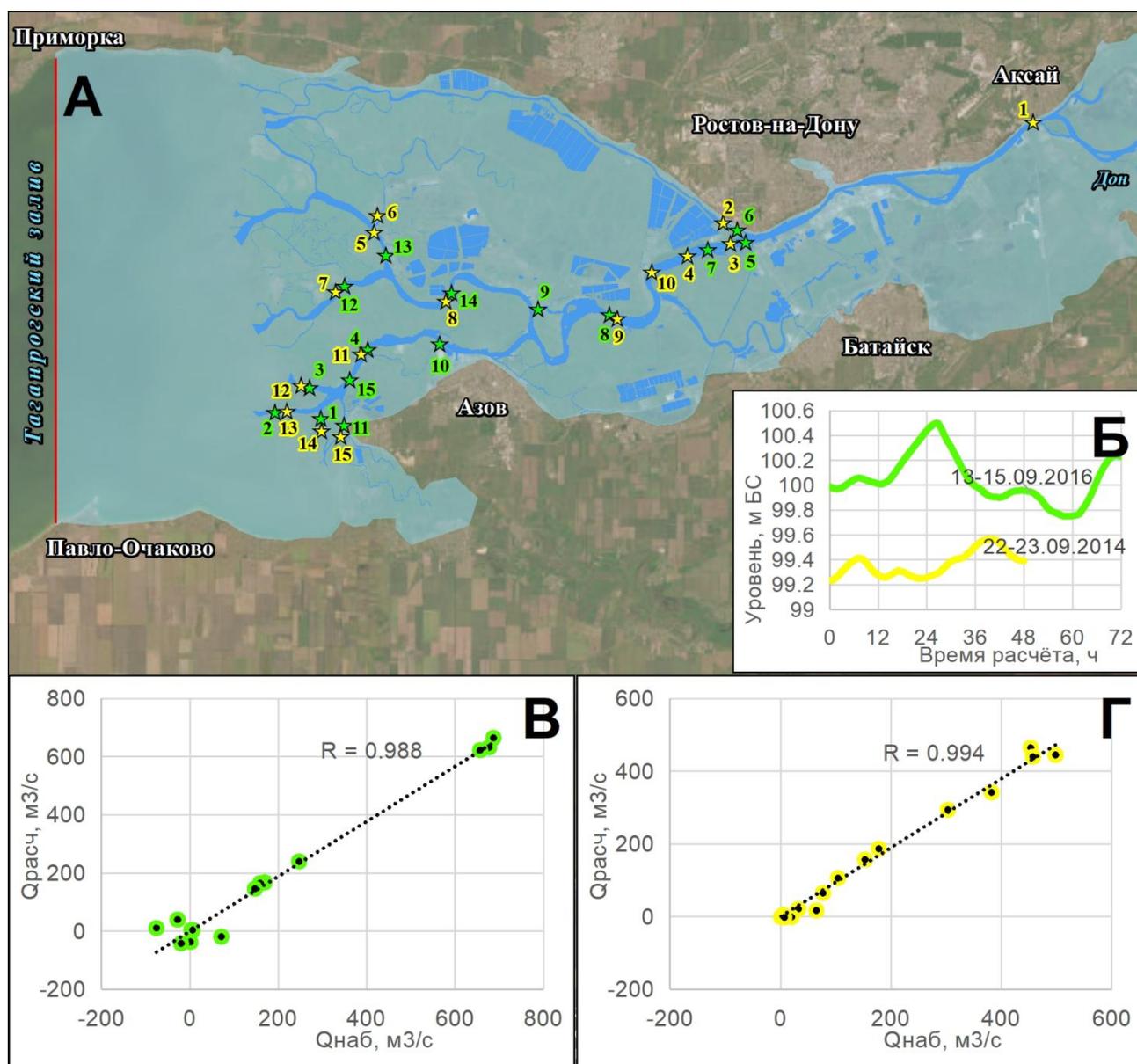


Рисунок 3. Распределение точек измерений в дельте Дона 13–15 сентября 2016 г. и 22–23 сентября 2014 г. (А); ход уровня на уровнемере в х. Донской 13–15 сентября 2016 г. и 22–23 сентября 2014 г. (Б); сопоставление результатов расчета расходов воды с данными наблюдений при калибровке параметров гидрологической модели устьевой области НЕС RAS (В) и при верификации модели (Г). Отрицательные значения расходов воды соответствуют условиям, когда вода движется от морского края в направлении вершины дельты.

В период 13–15 сентября 2016 г. расход воды в ст. Раздорской в среднем был равен $390 \text{ м}^3/\text{с}$, в период 22–23 сентября 2014 г. — $430 \text{ м}^3/\text{с}$. На участке от ст. Раздорская до вершины дельты имеется боковая приточность из рек Маныч, Тузлов, Аксай и Темерник. Так как систематические наблюдения здесь отсутствуют, то рассматривались разные сценарии поступления вод с малыми реками в интервале от 50 до $150 \text{ м}^3/\text{с}$, что вносило неопределенность в получаемые результаты. Уровень воды на морской границе устьевой

области задавался по данным уровнемера, установленного на причале «Донской» Южного научного центра РАН (см. рис. 2), примерно в 20 км от границы расчетной области в Таганрогском заливе со сдвигом по времени на 20 минут назад.

В качестве калибровочных параметров рассматривалась цифровая модель местности (ЦММ) и коэффициенты шероховатости русел. Из-за практически равнинного ландшафта дельты, отсутствия детальных промеров профиля русел особенно на несудоходных участках ЦММ имеет много неопределенностей и требует уточнения. Для коэффициентов шероховатости русел в результате серии вычислительных экспериментов, направленных на приближение расчетных расходов воды данным наблюдений в точках измерений (рис. 3 В), приняты везде одинаковые значения 0,0125.

Без изменения значений ЦММ и коэффициента шероховатости расчетные расходы сравнивались с данными измерений, выполненными 22–23 сентября 2014 г. (рис. 3Г).

Результаты проверочных расчетов показывают, что гидрологическая модель дельты Дона воспроизводит особенности распределения вод по основным рукавам, хотя имеются и различия как в судоходном канале, так и в несудоходных гирлах Мериново и Каменное, главным образом вблизи морского края дельты. Отмечается повышенное распределение стока в судоходную часть Дона по сравнению с рукавами Каланча и Большая Кутерьма (рис. 3А, точки 11, 12, 13). Требуется дальнейшая корректировка ЦММ. Результаты калибровочных расчетов представлены в разделе «Дополнительные материалы, табл. ДМ3 и ДМ4».

2.2 Моделирование динамики взвешенного вещества

Имеются предварительные расчеты по оценке влияния нагонных явления на перенос и накопление взвешенных веществ в дельте Дона при двух вариантах расхода воды в вершине дельты ($500 \text{ м}^3/\text{с}$, соответствует среднемноголетнему расходу р. Дона, $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ — сток Дона в половодье) и нагонных явлений с максимальным подъёмом уровня на 1,5, 2,5 и 3,7 м относительно среднего положения (Шевердяев и Клещенков, 2020). Представленная в этой работе версия балансовой модели не учитывала процессы ресуспензии донных отложений. Взвешенное вещество не делилось на фракции по размерам частиц. Для всех русловых ячеек скорость седиментации принималась равной нулю. Если же в ячейках имелась растительность (оценивалась по индексу NDVI от 0,2 до 1, рассчитанному по спутниковому снимку), то скорость осаждения увеличивалась от некоторого базового значения в 10 раз, когда NDVI был равен 1. Таким образом для всех русловых районов, степень зарастания которых растительностью была не очень значительной, в основном вблизи берегов, концентрация взвеси от вершины дельты к морскому краю при отсутствии нагонов воды с моря не сильно изменялась. В случае поступления из Таганрогского залива насыщенной взвесью (до 60 мг/л)

воды и ее выхода на пойменные сегменты с наличием растительности, взвешенные вещества осаждались, поэтому на этапе падения уровня вода осветлялась и при ее поступлении в основное русло концентрация взвеси в этих районах уменьшалась (эффект разбавления). Ниже представлены результаты расчета с применением нового подхода для двух типов гидрологических режима (рис. 4):

- 1) гидрологический режим без нагона, расход воды 460 м³/с (рис. 4, левая ось, 1);
- 2) гидрологический режим с нагоном, расход воды от 460 до 630 м³/с (рис. 4, левая ось, 2) и изменение уровня во время нагона (рис. 4, правая ось, 3). Продолжительность 96 часов. 18-22 марта 2018 г.

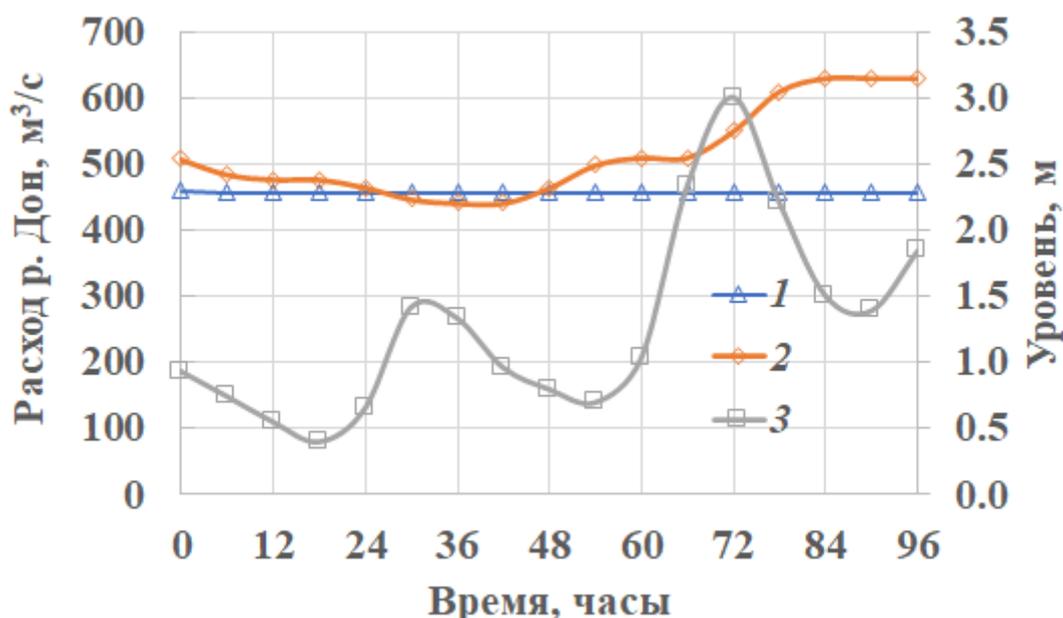


Рисунок 4. Гидрологический режим без нагона (расход воды в ст. Раздорская, левая ось, 1) и с нагоном (расход воды в ст. Раздорская, левая ось, 2, динамика уровня в заливе, правая ось, 3).

Из-за постепенного увеличения общей ширины каналов стока в дельте Дона по мере продвижения к морскому краю средняя скорость течения уменьшается примерно в три раза от вершины дельты к морскому краю, если нет сильного изменения уровня воды в заливе. При расходе воды в вершине дельты 460 м³/с средняя скорость течения в вершине дельты примерно 15 см/с и падает до значений 5 см/с в гирлах Мокрая Каланча, Большая Кутерьма на морской границе дельты. В рукаве Мертвый Донец скорость течения еще меньше (до 3 см/с).

В случае гидрологического режима с нагоном ситуация существенно другая (рис. 5). Выделено 4 района вдоль основного канала стока Дон – Старый Дон- Азово-Донской судоходный канал, расположенные на разном удалении от фронта дельты №8→№21→№35→№50 (см. также рис. 2), для которых представлена в динамике средняя скорость течения на разных этапах развития нагона. Видно, что скорость течений может увеличиваться в несколько раз по сравнению с режимом без нагона, а также уменьшаться

практически до нулевых значений. Если посмотреть на связь средней скорости течения и уровня воды на подъеме и спаде нагона (рис. 5Д, Е), то скорость течения начинает быстро падать при достижении максимального подъема уровня, потом расти.

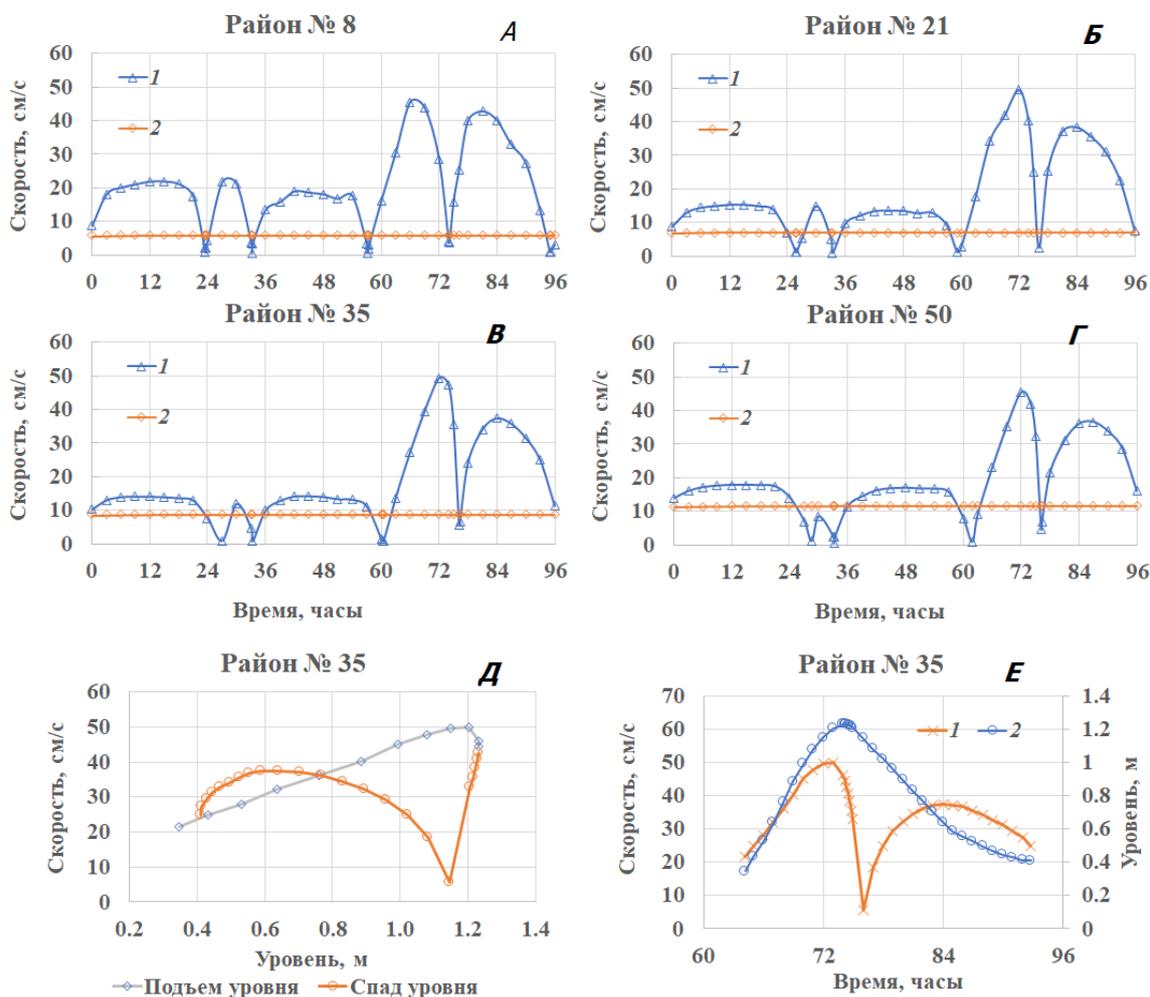


Рисунок 5. Изменение средней по району скорости течения по мере продвижения от морского края дельты к ее вершине (А-Г) при нагоне (1) в сопоставлении со средней скоростью течения при отсутствии нагона (2). Изменение средней скорости течений в районе № 35 (середина дельты, основное русло) на подъеме и спаде уровня воды (Д, Е).

Для расчета динамики взвешенного вещества приняты следующие граничные условия.

Суммарная концентрация взвешенного вещества в речном стоке ст. Раздорская принята равной 17 мг/л (Клещенков и др., 2023) при следующем распределении по фракциям: пелит (44,5 %), алеврит (51,3 %), песок (4,2 %). Это средний гранулометрический состав взвеси по данным наблюдений сети Росгидромета РФ в ст. Раздорская за период 2005-2020 гг.

Суммарная концентрация взвеси в период нагона в Таганрогском заливе принята равной 60 мг/л (Шевердяев, Клещенков, 2020) при следующем распределении по фракциям в процентах пелит (64,5 %), алеврит (35,5 %) (Лихтанская и др., 2023, в печати). Частиц песчаной фракции менее 0,1%.

Структура донных отложений задавалась следующим образом (См. раздел «Дополнительные материалы», табл. ДМ5). Для русловых участков предполагалось, что половину площади района занимают пески, а на остальной площади соотношение частиц такое: пелит (20 %), алеврит (50 %), песок (30 %). Такое же соотношение задавалось и на устьевом взморье залива (район №103). Для пойменных районов принят гранулометрический состав, характерный для луговых аллювиальных почв (Исаев и др., 2022): пелит (50,5 %), алеврит (45,5 %), песок (4 %).

В качестве начальных значений для всех районов задавалась концентрация частиц соответствующей размера, определяемая взвесенесущей способностью потока, рассчитанной по средней скорости, характерной для района в случае отсутствия нагона.

Динамика взвешенного вещества при отсутствии нагона

В данном расчете рассматривалась ситуация, когда на границе Таганрогского залива уровень моря не изменялся относительно среднего значения. Оседание взвешенного вещества происходило везде, а ресуспензия только в заливе (район №103) и в русловых районах. В районах, расположенных на пойме дельты, взмучивание донных отложений не задавалось.

При выполнении расчетов проводились эксперименты с параметром α^0 для корректировки скорости взмучивания частиц соответствующего размера. Задача заключалась в том, чтобы «уравновесить» процессы седиментации и взмучивания для русловых районов. Подобранные значения α^0 для частиц пелитовой, алевритовой и песчаной размерности 0.35; 3,0 и 5,0 соответственно. Увеличение параметра α^0 по мере укрупнения частиц может быть объяснено тем, что мелкие частицы слипаются и их труднее оторвать от дна.

В условиях гидрологического режима 1 типа в конце расчетного периода устанавливается стационарное по пространству распределение концентрации взвешенных частиц, определяемое поступлением взвеси с донской водой и процессами седиментации и взмучивания. В качестве примера рассмотрим районы основного русла «Дон-Старый Дон-Азово-Донской судоходный канал» в направлении движения воды от ст. Раздорская к морскому краю дельты: №105→№70→№50→№47→№35→№26→№21→№20→№15→№8 (рис. 6).

Общая концентрация взвеси уменьшается к морскому краю дельты с 17 мг/л до 10 мг/л, на отдельных участках увеличиваясь до 25 мг/л как за счет сужения русла, так и за счет взмучивания частиц. При этом существенно изменяется гранулометрический состав в результате обмена с дном, т.к. частицы пелитовой размерности практически не оседают, а ресуспензия частиц алевритовой размерности из-за снижения средней скорости потока не компенсирует потери на осаждение (табл. 1).

Таблица 1. Баланс взвешенного вещества в устьевой области Дона для гидрологического режима I типа

Показатель	Единица измерения	Всего	Дон	Из Таганрогского залива	
Приход	тыс тонн	1.35	1.35	0	
Потоки взвешенного материала в устьевой области					
Показатель	Единица измерения	Всего	Авандельта	Каналы	Пойма
Взмучивание	тыс тонн	29.0	0.1	28.9	0.0
	г/м ²	31.0	0.2	266	0.0
	мм	0.025	0.00015	0.20	0.0
Оседание	тыс тонн	31.6	2.2	29.3	<0.1
	г/м ²	34.8	10.6	269	0.1
	мм	0.027	0.01	0.21	<0.01
Оседание-Взмучивание	тыс тонн	2.6	2.1	0.4	<0.1
Вынос в ТЗ	тыс тонн	0.54	0.54		
Накопление в водной среде	тыс тонн	-1.8	-1.9	0.1	0.0
Баланс	тыс тонн	0.0			
Площадь	км ²	907	204	109	594
Баланс между оседанием и взмучиванием для русловых районов					
Показатель	Единица измерения	Всего	Пелит	Алеврит	Песок
Оседание	тыс тонн	29.3	0.15	4.12	25.06
Взмучивание	тыс тонн	28.9	0.14	3.80	24.99
Оседание-Взмучивание	тыс тонн	0.4	0.01	0.32	0.07

Примечание. Сделана оценка удельных потоков седиментации и взмучивания взвешенного вещества за расчетный период и оценка толщины слоя осадка, который подвержен этим процессам (образуется при оседании и взмучивается при ресуспензии осадка) при плотности верхнего слоя донных отложений 1300 кг/м³. Эти величины приведены отдельно для авандельты (район №103), русловых районов (каналов) и пойменных районов.

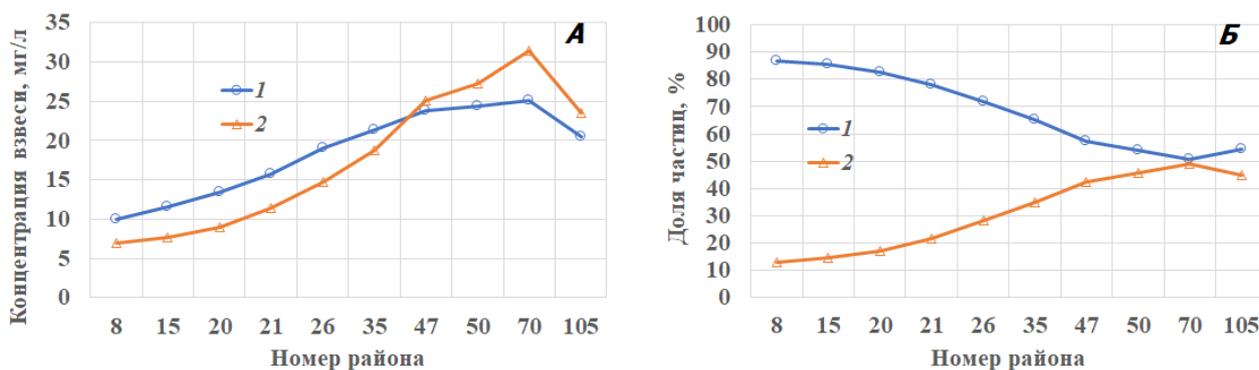


Рисунок 6. Расчетная концентрация общей взвеси (1) в сопоставлении с предельной, определяемой скоростью движения воды (2), для основного русла дельты (А) и изменение гранулометрического состава (Б, 1 – пелитовая фракция, 2- алевритовая фракция) по мере приближения к морскому краю дельты, от района № 105 к району №8.

С рекой Дон в устьевую область поступило 1,35 тыс тонн взвешенного материала, из которого 0,4 тыс тонн осело о в каналах, на увеличение запаса вещества в русловых районах

ушло еще 0,1 тыс. тонн. Остальные процессы происходили в авандельте: оседание, взмучивание и уменьшение запаса вещества в водной толще относительно начального значения, заданного в модели. В результате в Таганрогский залив за пределы области моделирования было вынесено 0,54 тыс тонн взвешенного материала.

Динамика взвешенного вещества при нагоне

Расчет динамики взвешенного вещества выполнен для случая реального нагона, который продолжался 96 часов, включал два пика подъема уровня, три спада с общим изменением уровня на 2,5 м (рис. 4). Граничные и начальные условия были взяты такими же, как и при отсутствии нагона.

В условиях штормового нагона в авандельте происходит волновое взмучивание донных отложений и в дельту поступают водные массы, насыщенные взвешенным материалом. Концентрация взвеси в воде существенно меняется во времени из-за изменения средних скоростей движений в широком диапазоне от практически нулевых значений до 50 см/с (рис. 5).

Рассматривая в качестве примера основное русло «Дон-Старый Дон-Азово-Донской судоходный канал» можно видеть динамику изменения суммарной концентрации взвеси и ее гранулометрический состав. Из-за процессов седиментации и взмучивания происходит как увеличение концентрации взвеси, так и увеличение доли алевритовой фракции (рис. 7 А, Б, В).

Для районов, расположенных в пойме дельты, в качестве примера представлена динамика взвеси в районах, расположенных между Азово-Донским судоходным каналом и гирлом Мокрая Каланча: №19, №32, №16 и №40 в сравнении с русловыми районами №15 и №34 (рис. 7 Г, Д, Е). Концентрация взвеси в пойменных районах увеличивается, как только они затапливаются нагонными водами, но при этом в основном взвесь представлена частицами пелитовой размерности, т.к. в этих районах отсутствует (в модели) ресуспензия почвенных частиц, а алевритовая фракция осаждается на почву.

Для сравнения с гидрологическим режимом без нагона концентрация взвеси в каждом районе была усреднена за весь период расчета.

На примере пространственного распределения взвеси вдоль основного русла (рис. 8) видно, что в период нагона существенно изменяется и концентрация взвеси, и происходит трансформация гранулометрического состава. Происходит увеличение доли алевритовой фракции.

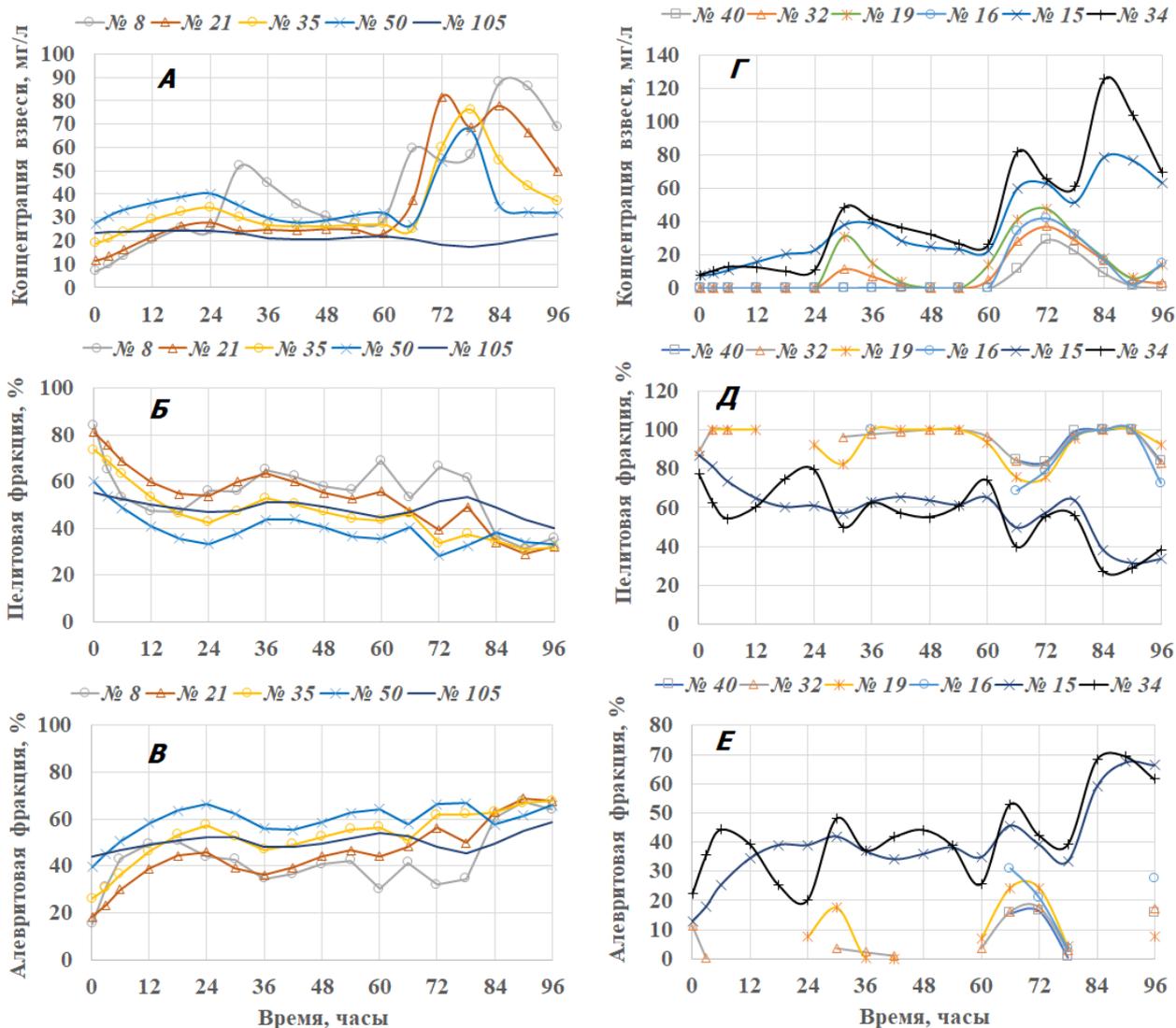


Рисунок 7. Динамика взвешенного вещества (А) и гранулометрический состав взвеси (Б, В) в основном русле р. Дон и в пойменных районах между рукавами Старый Дон и Малая Каланча (Г, Д, Е)

Таким образом, при отсутствии нагона по мере продвижения воды к морской границе дельты на фоне уменьшения абсолютной концентрации увеличивается доля пелитовой фракции. В период нагона возрастает доля алевритовой фракции.

Итоговый баланс вещества представлен в таблице 2.

При нагонах русловые районы дельты являются источником алевритового материала в результате ресуспензии, а в периоды без нагонов этот материал может здесь накапливаться.

Вместе с тем в пойменных районах дельты за расчетный период оседает 17 тыс тонн взвеси. Это 21 % поступившего в дельту материала, из которых часть в результате ресуспензии донных отложений русловой части дельты, а часть – из Таганрогского залива (примерно в пропорции 30:70).

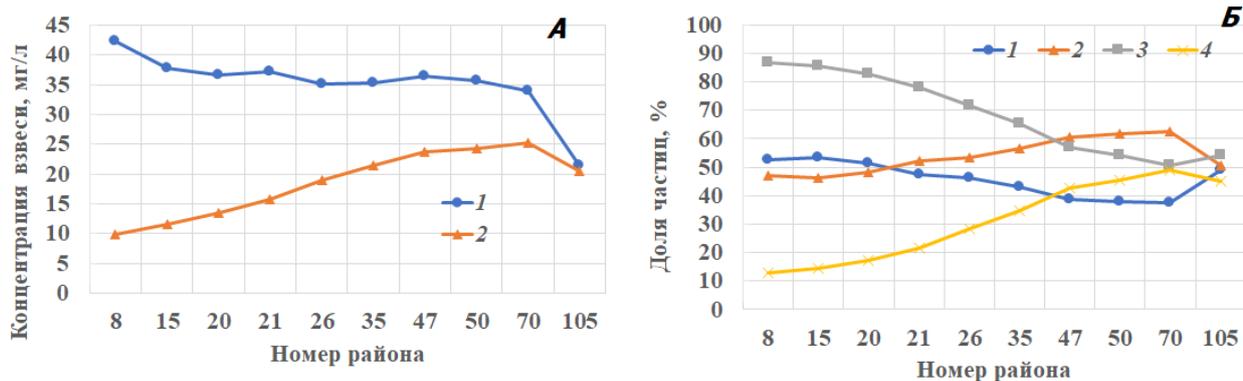


Рисунок 8. Осредненная за период нагона концентрация взвеси (А, 1- нагон, 2 – без нагона) и ее гранулометрический состав (Б, 1, 3 - пелитовая фракция, 2, 4 – алевритовая фракция, 1,2 – нагон, 3,4 – без нагона) в сопоставлении с ситуацией без нагона. Районы основного русла «Дон-Старый Дон-Азово-Донской судоходный канал».

Таблица 2. Баланс взвешенного вещества в устьевой области Дона для гидрологического режима 2 типа (нагон воды со стороны Таганрогского залива)

Показатель	Единица измерения	Всего	Дон	Из Таганрогского залива	
Приход	тыс тонн	80.3	3.0	77.3	
Потоки взвешенного материала в устьевой области					
Показатель	Единица измерения	Всего	Авандельта	Каналы	Пойма
Взмучивание	тыс тонн	349.52	52.69	296.83	0
	г/м ²	385.52	258.81	2724.91	0.00
	мм	0.297	0.199	2.096	0.000
Оседание	тыс тонн	367.07	77.20	272.68	17.181
	г/м ²	404.88	379.18	2503.29	28.92
	мм	0.311	0.292	1.926	0.022
Оседание-Взмучивание	тыс тонн	17.55	24.51	-24.15	17.181
Вынос в ТЗ	тыс тонн	42.2	42.2		
Накопление в водной среде	тыс тонн	20.64	13.0	6.36	1.31
Баланс	тыс тонн	0.0			
Площадь	км ²	907	204	109	594
Баланс между оседанием и взмучиванием для русловых районов					
Показатель	Единица измерения	Всего	Пелит	Алеврит	Песок
Русловые районы					
Оседание	тыс тонн	272.69	0.37	17.68	254.64
Взмучивание	тыс тонн	296.83	1.45	39.02	256.36
Оседание-Взмучивание	тыс тонн	-24.14	-1.08	- 21.34	- 1.72
Оседает в пойме дельты, тыс тонн	тыс тонн	17.19	3.56	12.68	0.95

Примечание. Сделана оценка удельных потоков седиментации и взмучивания взвешенного вещества за расчетный период и оценка толщины слоя осадка, который подвержен этим процессам (образуется при оседании и взмучивается при ресуспензии осадка) при плотности верхнего слоя донных отложений 1300 кг/м³. Эти величины приведены отдельно для авандельты (район №103), русловых районов (каналов) и пойменных районов.

Заключение

1. Представленный в статье подход к оценке влияния морских штормовых нагонов на возможный перенос взвешенного материала в речную дельту со стороны моря основан на объединении мультикомпартментальной динамической модели баланса воды и вещества, переносимого водными массами, и детальной гидрологической модели HEC RAS, адаптированной для расчета гидрологического режима в устьевой области, находящейся под влиянием речного стока и морской нагонной волны. Гидрологическая модель HEC RAS обеспечивает балансовую модель необходимой информацией о динамике уровня и водных потоках, а последняя формирует для укрупненных гидрологических районов динамический баланс взвешенного вещества: поступление, вынос, седиментация, взмучивание (ресуспензия), накопление в водной среде и донных отложениях как в русловых сегментах, так и на пойменных участках дельты и в авандельте.

2. Программный комплекс гидрологического моделирования HEC RAS наряду с расчетом расходов воды и динамики уровня предусматривает также и расчет переноса взвешенного материала для оценки его накопления в каналах и эрозии донных отложений. Но необходимый для моделирования значительный объем дополнительной информации не дает возможность в настоящее время применить этот инструмент для моделирования переноса взвешенного материала с той же детальностью, что и гидрологическое моделирование для устьевой области Дона. С другой стороны, в рамках модуля HEC RAS, предназначенного для моделирования переноса взвешенных наносов, отсутствует, например, параметризация процессов флокуляции (коагуляции) взвешенных частиц в зоне контакта речных и морских вод, что характерно для устьевой области. В рамках балансовой модели больше возможностей предварительно рассмотреть различные варианты для параметризации этих сложных процессов.

3. Объединения двух подходов, с разной пространственной детализацией, направлено на получение предварительных оценок для понимания важности морских факторов в формировании гидрохимического режима устьевых областей при проникновении морских вод в устьевую область, особенностях гидрологического режима этого сложного объекта в зависимости от расхода воды в вершину дельты и величины подъема уровня при штормовом нагоне. Представленный в статье пример для устьевой области Дона показывает насколько сложный гидрологический режим характерен при нагоне воды с моря.

4. Результаты расчета концентраций взвешенного вещества, гранулометрического состава взвеси в русловых и пойменных районах устьевой области Дона находятся в диапазоне наблюдаемых в экспедиционных наблюдениях значений (Клещенков и др., 2023), но нуждаются в дополнительной проверке на основе данных полевых наблюдений.

5. Предлагаемый подход позволяет рассмотреть все документированные в период 2015-20220 гг. случаи штормовых нагонов (Лихтанская и др., 2023), часть из которых сопровождалась данными полевых наблюдений для уточнения параметров модели, связанных с процессами седиментации и ресуспензии взвешенных веществ, и полученных ранее оценок влияния нагонов на их перенос в дельту Дона.

Ссылка на источник финансирования

Работа выполнена в рамках ГЗ ЮНЦ РАН: № госрегистрации 122013100131-9, № госрегистрации 122011900153-9, № госрегистрации 122103100027-3

Список литературы

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 455 с.

Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В. Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 65-70. DOI: 10.31857/S2686739722030057

Герасюк В. С., Бердников С. В. Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе // Океанология. 2021. Том 61, № 5. С. 780–790.

Исаев А. В., Демаков Ю. П., Шарафутдинов Р. Н. Закономерности изменения гранулометрического состава аллювиальных почв в процессе развития пойм рек // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 2 (54). С. 80-93. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2022.2.80>

Клещенков А.В., Герасюк В.С., Кулыгин В.В., Бердников С.В. Взвешенное вещество вод от Цимлянского водохранилища до Таганрогского залива в период длительного маловодья 2006-2020 гг. // Наука Юга России. 2023. Т. 19. № 1. С. 29-39. DOI: 10.7868/25000640230104

Клещенков А.В., Шевердяев И.В. Изменение гидрографической сети дельты Дона при сгонах // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова. — Санкт-Петербург: ООО «Издательство ВВМ», 2020. — С. 675–680.

Лихтанская, Н. В., С. В. Бердников, и А. В. Клещенков, (2023), Твердый сток реки Дон и поступление взвеси в дельту при нагонах: статистическое моделирование и сопоставление в период маловодья, *Russian Journal of Earth Sciences*, т. 23, DOI: 10.2205/2023ES000856

Матишов Г.Г. Случаи экстремальной адвекции соленых вод в дельту Дона и льда в Керченский пролив // Доклады Академии наук. — 2015. — Т. 465, № 1. — С. 99. — DOI 10.7868/S0869565215310229

Матишов Г.Г., Московец А.Ю., Инжебейкин Ю.И., Ильичев В.Г., Кириллова Е.Э. Этапы сооружения плотин, пересыпей, каналов и трансформация речного стока в авандельте Дона (XVIII-XXI века) // Наука Юга России. 2019. Т. 15. № 4. С. 46-54. DOI: 10.7868/S25001640190406

Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие // Доклады Академии наук. — 2014. — Т. 455, № 3. — С. 342–345. — DOI: 10.7868/S0869565214090229.

Шевердяев И.В., Бердников С.В., Клещенков А.В. Применение программного комплекса HEC-RAS для моделирования гидрологического режима дельты Дона // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. — 2017. — Т. 1., № 2. — С. 113–122.

Шевердяев И.В., Клещенков А.В. Выявление вклада нагонных явлений в поступление тяжелых металлов в дельту Дона // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. No 5 (215). С. 582–594. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-5-582-594.

Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Kleshchenkov A.V., Tyutyunov Yu.V., Kulygin V.V., Kovaleva G.V., Bulysheva N.I. Marine indicators of climate change in the Azov Sea ecosystem // Journal of Sea Research. Volume 193, June 2023, 102373. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102373>

Day JW, Agboola J, Chen Z, D'Eliaa, D., Forbes, D. L., Giosane L, et al. Approaches to defining deltaic sustainability in the 21st century. Estuarine, Coastal and Shelf Science 2016.

Day JW, Rybczyk JM. Global Change Impacts on the Future of Coastal Systems: Perverse Interactions Among Climate Change, Ecosystem Degradation, Energy Scarcity, and Population. Coasts and Estuaries 2019.

Dieng HB, Cazenave A, Meyssignac B, Ablain M. New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach. Geophysical Research Letters 2017.

Dunn FE, Darby, S.E., Nicholls R, Cohen S, Zarfl C, Fekete BM. Projections of declining fluvial sediment delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress. Environmental Research Letters 2019; 14.

Gusarov AV. Land-Use/-Cover Changes and Their Effect on Soil Erosion and River Suspended Sediment Load in Different Landscape Zones of European Russia during 1970–2017. Water 2021; 13: 1631.

Hicks, F., Peacock, T. Suitability of HEC-RAS for flood forecasting // Canadian Water Resources Journal. — 2005. — Vol. 30, No. 2. — 30(2), P .159-174. — DOI: 10.4296/cwrj3002159.

Pandey, S., Rao, A. D., & Haldar, R. (2021). Modeling of Coastal inundation in response to a tropical cyclone using a coupled hydraulic HEC-RAS and ADCIRC model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016810. <https://doi.org/10.1029/2020JC016810>

Rasghlegh B, Lagutov, V., Salthe, T. Ecosystem Services of Rivers: The Don River (Russian Federation) and the Roanoke River (USA) In: Lagutov V, editor. Environmental security in watersheds: the Sea of Azov, Rostov-on-Don, 2010.

Syvitski JPM, Milliman JD. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *The Journal of Geology* 2007; 115: 1-19.

Tessler ZD, Vörösmarty CJ, Grossberg M, Gladkova I, Aizenman H, Syvitski JPM, et al. Profiling risk and Science 2015; 349

The LPJmL (Lund-Potsdam-Jena managed Land) model [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/activities/biosphere-water-modelling/lpjml> (дата обращения 15.07.2021).

The place for HEC-RAS modelers [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/hec-ras-6-0-beta-is-now-available/> (дата обращения 17.11.2020).

Venevsky S., Berdnikov S., Day John W., Sorokina V., Gong P., Kleshchenkov A., Kulygin V., Li W., Misirov S., Sheverdyayev I, Yuan C., Giosan L. Don River Delta Hydrological and Geomorphological Transformation Under Anthropogenic and Natural Factors: Century and Decadal Perspectives. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4474057> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4474057>

Venevsky S., Berdnikov S., Sorokina V., Kulygin V., Kleshchenkov A., Sheverdyayev I., Arkhipova O., Dashkevich L., Gerasyuk V., Mesropyan K., Ukrainsky P., Yaitskaya N. (2022). Coastal Deltas of Big Rivers as Synergetic Transformation Elements of the Earth System—(An Example of the Don River Delta). In: Chenchouni, H., et al. *New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences. CAJG 2019. Advances in Science, Technology & Innovation.* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72543-3_18

Venevsky, S., Maksyutov, S. SEVER: a modification of the LPJ global dynamic vegetation model for daily time step and parallel computation // *Environmental Modelling and Software*. — 2006. — Vol. 22, No. 1 — P. 104-109. — DOI: 0.1016/j.envsoft.2006.02.002.

Wang M., Venevsky S., Wu Ch., Berdnikov S., Sorokina V., Kulygin V. Description of local carbon flux from large scale gridded climate data by a dynamic global vegetation model at variable

time steps: Example of Euroflux sites // *Science of The Total Environment*. — 2021. — Vol. 756. — 143492. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143492.

Wang, X., Guo, Y. & Ren, J. The Coupling Effect of Flood Discharge and Storm Surge on Extreme Flood Stages: A Case Study in the Pearl River Delta, South China. *Int J Disaster Risk Sci* 12, 1–15 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00355-5>

Wei Zhang, Qiong Jia, and Xiaowen Chen Numerical Simulation of Flow and Suspended Sediment Transport in the Distributary Channel Networks//*Journal of Applied Mathematics*. Volume 2014, Article ID 948731, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/948731>

Wolters ML, Kuenzer, C. Vulnerability assessments of coastal river deltas - categorization and review. *Journal of Coastal Conservation* 2015; 19: 345-368.

Дополнительные материалы (ДМ)

Таблица ДМ1. Характеристика гидрологический районов устьевой области Дона

Номер района	Площадь, км ²	Средняя глубина, м	Тип района: 0-пойма, 1 – русло, 2-авандельта	Название района, рукава
0	4.65	-	0	Пойма
1	0.74	-	0	Пойма
2	0.52	0.41	1	Гирло Свиное
3	3.11	-	0	Пойма
4	2.51	-	0	Пойма
5	2.16	-	0	Пойма
6	0.31	0.78	1	Гирло Свиное
7	1.00	-	0	Пойма
8	1.84	2.01	1	Азово-Донской судоходный канал
9	1.41	-	0	Пойма
10	0.96	-	0	Пойма
11	0.70	1.21	1	Гирло Мериново
12	1.32	-	0	Пойма
13	10.86	-	0	Пойма
14	3.48	-	0	Пойма
15	1.80	2.80	1	Азово-Донской судоходный канал
16	3.13	-	0	Пойма
17	2.70	-	0	Пойма
18	36.50	-	0	Пойма
19	5.88	-	0	Пойма
20	1.97	2.56	1	Азово-Донской судоходный канал
21	3.27	2.08	1	Азово-Донской судоходный канал
22	6.09	-	0	Пойма
23	1.66	-	0	Пойма
24	11.80	-	0	Пойма
25	2.15	-	0	Пойма
26	2.95	3.92	1	Дон
27	0.75	-	0	Пойма
28	0.36	-	0	Пойма
29	0.82	-	0	Пойма
30	0.50	4.08	1	Рукав Каланча
31	0.36	3.15	1	Казачий ерик
32	14.67	-	0	Пойма
33	17.92	-	0	Пойма
34	2.06	1.40	1	Гирло Мокрая Каланча
35	4.63	3.62	1	Дон
36	2.57	-	0	Пойма
37	1.44	-	0	Пойма
38	7.44	-	0	Пойма
39	1.84	-	0	Пойма
40	17.08	-	0	Пойма
41	6.15	-	0	Пойма
42	2.21	4.29	1	Рукав Каланча
43	1.66	1.38	1	Гирло Мокрая Каланча
44	2.59	4.93	1	Рукав Каланча
45	2.93	-	0	Пойма
46	6.61	-	0	Пойма
47	2.53	3.24	1	Дон
48	2.16	-	0	Пойма
49	5.58	-	0	Пойма
50	2.50	2.63	1	Дон

Номер района	Площадь, км ²	Средняя глубина, м	Тип района: 0-пойма, 1 – русло, 2-авандельта	Название района, рукава
51	0.54	-	0	Пойма
52	9.74	-	0	Пойма
53	0.70	-	0	Пойма
54	14.41	-	0	Пойма
55	1.04	3.89	1	Рукав Большая Кутерьма
56	1.22	-	0	Пойма
57	1.73	2.37	1	Рукав Большая Кутерьма
58	3.15	-	0	Пойма
59	3.36	-	0	Пойма
60	1.56	-	0	Пойма
61	68.36	-	0	Пойма
62	0.85	4.26	1	Рукав Большая Кутерьма
63	1.76	3.26	1	Рукав Большая Кутерьма
64	5.04	-	0	Пойма
65	27.65	-	0	Пойма
66	15.02	-	0	Пойма
67	1.68	-	0	Пойма
68	2.16	2.01	1	Дон
69	1.31	0.70	1	Мертвый Донец
70	5.06	2.93	1	Дон
71	1.86	-	0	Пойма
72	1.88	-	0	Пойма
73	2.31	-	0	Пойма
74	5.17	-	0	Пойма
75	1.20	1.49	1	Дон
76	0.67	-	0	Пойма
77	1.23	-	0	Пойма
78	7.57	-	0	Пойма
79	0.48	1.06	1	Рукав Средняя Кутерьма
80	2.42	-	0	Пойма
81	7.78	-	0	Пойма
82	1.27	-	0	Пойма
83	0.51	0.95	1	Рукав Средняя Кутерьма
84	6.27	-	0	Пойма
85	0.52	-	0	Пойма
86	111.35	-	0	Пойма
87	1.79	-	0	Пойма
88	15.26	-	0	Пойма
89	7.98	-	0	Пойма
90	1.96	0.85	1	Мертвый Донец
91	0.90	0.81	1	Мертвый Донец
92	39.58	-	0	Пойма
93	2.44	-	0	Пойма
94	1.69	1.05	1	Мертвый Донец
95	1.88	-	0	Пойма
96	1.35	-	0	Пойма
97	0.80	1.11	1	Мертвый Донец
98	0.96	1.27	1	Мертвый Донец
99	5.38	-	0	Пойма
100	3.63	-	0	Пойма
101	3.67	-	0	Пойма
102	8.63	-	0	Пойма
103	203.61	1.24	2	Авандельта
104	9.36	-	0	Пойма
105	54.13	1.95	1	Дон

Таблица ДМ2. Оценка гидравлической крупности частиц

Тип частиц	Средний размер, мм	Диапазон, мм	Параметр ϕ	Гидравлическая крупность, м/с
Глина	0.005	<0.01	1100	0.000009
Ил	0.05	0.01-0.1	200	0.000152
Песок	0.2	>0.1	2.2	0.027648

Таблица ДМ3. Сопоставление измеренных и рассчитанных расходов в дельте Дона 13-15 сентября 2016 г.

№	Дата	Время	Уровень (х. Донской), м БС	$Q_{\text{наб}}$	Q_{50}	Q_{100}	Q_{150}
1	13.09.2016	15:50	-0,13	5.0	3.0	4.0	4.0
2	13.09.2016	16:40	-0,11	1.0	-62.0	-53.0	-42.0
3	13.09.2016	17:40	-0,05	71.0	-40.0	-37.0	-25.0
4	13.09.2016	18:10	-0,03	-20.00	-60.0	-1.0	-14.0
5	14.09.2016	13:10	-0,26	677.0	629.0	667.0	703.0
6	14.09.2016	13:50	-0,28	3.0	-11.0	-10.0	-9.0
7	14.09.2016	15:10	-0,30	657.0	622.0	659.0	697.0
8	14.09.2016	16:30	-0,31	687.0	644.0	685.0	725.0
9	14.09.2016	17:00	-0,31	169.0	149.0	157.0	169.0
10	14.09.2016	17:30	-0,31	247.0	228.0	252.0	268.0
11	15.09.2016	11:50	-0,48	6.0	2.0	2.0	2.0
12	15.09.2016	14:00	-0,41	-28.0	37.0	44.0	52.0
13	15.09.2016	14:50	-0,34	159.0	65.0	96.0	137.0
14	15.09.2016	15:40	-0,31	147.0	57.0	88.0	131.0
15	15.09.2016	16:30	-0,26	-76.0	-44.0	-23.0	-4.0

Примечание: $Q_{\text{наб}}$ - средний измеренный расход, м³/с, Q_{50} , Q_{100} , Q_{150} – рассчитанные значения расходов воды, соответствующие сценариям с суммарным расходом притоков Нижнего Дона 50, 100, 150 м³/с соответственно. Положительные значения соответствуют движению воды от вершины дельты к морскому краю, отрицательные значения соответствуют обратному направлению течения.

Таблица ДМ4. Сопоставление наблюдаемых и рассчитанных расходов в дельте Дона 22-23 сентября 2014 г.

№	Дата	Время	Уровень (х. Донской), м БС	$Q_{\text{наб}}$	$Q_{\text{расч}}$
1	22.09.2014	16:30	0,51	453	459
2	22.09.2014	18:50	0,49	5	7
3	22.09.2014	19:10	0,48	457	463
4	22.09.2014	19:30	0,47	498	474
5	23.09.2014	12:50	0,75	77	85
6	23.09.2014	13:30	0,73	1	-8
7	23.09.2014	13:50	0,77	32	21
8	23.09.2014	14:40	0,78	104	127
9	23.09.2014	16:10	0,80	303	301
10	23.09.2014	17:00	0,76	382	382
11	23.09.2014	18:10	0,73	153	195
12	23.09.2014	18:40	0,70	65	104
13	23.09.2014	19:20	0,66	178	203
14	23.09.2014	19:50	0,64	20	3
15	23.09.2014	20:20	0,65	7	11

Примечание: $Q_{\text{наб}}$ - средний измеренный расход, $Q_{\text{расч}}$ – рассчитанные значения расходов воды в рукавах дельты, соответствующие боковой приточности в рассматриваемый период 35 м³/с.

Таблица ДМ5. Гранулометрический состав поверхностного слоя донных отложений, %

Районы	глина	ил	песок
Русловые	10	25	65
Пойменные	50.5	45.5	4
Авандельта (район №103)	20	50	30