

1
2 Совместное применение программного комплекса HEC
3 RAS и балансового подхода для моделирования переноса и
4 накопления взвешенных веществ в речной дельте в
5 условиях маловодья и нагонных явлений: тематическое
6 исследование устьевой области р. Дон
7

8 С.В. Бердников¹ (<https://orcid.org/0000-0002-3095-5532>), И.В. Шевердяев¹
9 (<https://orcid.org/0000-0001-9212-8471>), А.В. Клещенков¹
10 (<https://orcid.org/0000-0002-7976-6951>), В.В. Кулыгин¹ (<https://orcid.org/0000-0001-9748-6497>), Н.В. Лихтанская*¹ (<https://orcid.org/0000-0001-8612-6808>)
11

12 ¹Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

13 * **Контакт:** Лихтанская Наталия Викторовна, natalikht@gmail.com

14 **Аннотация:** Предложен подход к совместному применению модели, реализованной в
15 программном комплексе HEC-RAS, и балансовой модели для описания переноса и
16 трансформации взвешенных веществ в речной дельте. В устьевой области реки
17 выделяются гидрологические районы: русловые районы, пойменные районы,
18 затапливаемые при высоких паводках и штормовых нагонах со стороны моря, и
19 районы авандельты. Для гидрологических районов строится динамическая модель
20 баланса воды и веществ, переносимых водным потоком. Вводится параметризация
21 процессов осаждения взвешенных веществ и их взмучивания в зависимости от
22 скорости движения воды и размера частиц. Рассматривается три градации взвеси по
23 размерам: пелитовая фракция (глина), алевритовая фракция (ил) и мелкий песок.
24 Акцент делается на оценке влияния морских штормовых нагонов на перенос
25 взвешенных веществ в речную дельту и их осаждение. Для описания потоков воды
26 между районами, скоростей ее движения, динамики ее уровня и процессов
27 затопления поймы применяется детальная модель на базе программного комплекса
28 HEC-RAS, адаптированная к условиям устьевой области р. Дон. Выполнены расчеты
29 переноса и накопления взвешенных веществ в устьевой области Дона для двух
30 вариантов гидрологических условий — с нагоном воды со стороны моря и без него.
31 Рассмотрена пространственно-временная изменчивость концентрации и
32 гранулометрического состава взвешенных наносов в зависимости от
33 гидрологических условий. Показано, что в отсутствие нагонных явлений при
34 небольших расходах воды взвешенные вещества в основном осаждаются в
35 авандельте за пределами морского края дельты, а в период нагона насыщают воду и
36 на этапе подъема ее уровня поступают в дельту, частично осаждаются в рукавах и в
37 пойменных районах. При этом на этапе спада уровня воды из русловых районов они
38 выносятся за морской край дельты, а в пойменных в основном остаются. Для условий
39 маловодья при наблюдаемой частоте нагонных явлений и при отсутствии паводков
40 устьевая область Дона задерживает в среднем 20 % взвешенных веществ,
41 поступающих со стоком р. Дон.

42 **Ключевые слова:** балансовая модель, взвешенное вещество, программный комплекс
HEC-RAS, штормовой нагон, дельта Дона

43



45
46 Combined application of the HEC RAS modeling system
47 and the balance approach for modeling the transport and

48 deposition of suspended solids in a river delta under conditions
49 of low water and surge phenomena: A case study of the Don River
50 estuary area
51

52 S.V. Berdnikov¹ (<https://orcid.org/0000-0002-3095-5532>), I.V. Sheverdyayev¹
53 (<https://orcid.org/0000-0001-9212-8471>), A.V. Kleshchenkov¹
54 (<https://orcid.org/0000-0002-7976-6951>), V.V. Kulygin¹ (<https://orcid.org/0000-0001-9748-6497>), N. V. Likhtanskaya^{*1} (<https://orcid.org/0000-0001-8612-6808>)
55

56 ¹Southern Scientific Center RAS, Rostov-on-Don, Russia

57 * Correspondence to: Nataliya V. Likhtanskaya, natalikht@gmail.com

58
59 Received: DATE 2024.
60 Accepted
61 Published:
62 © 2024. The Authors.

58 **Abstract:** An approach is proposed for the joint use of the model implemented in the HEC-
59 RAS software and a balance model to describe the transport and transformation of
60 suspended solids in a river delta. In the river estuary region, hydrological areas are
61 distinguished: channel areas, floodplain areas, flooded during high floods and storm surges
62 from the sea, and the delta front areas. For the hydrological areas, a dynamic model of the
63 balance of water and substances transported by water flow is built. Parameterization of the
64 suspended solids sedimentation processes and their resuspension is introduced depending
65 on the speed of water movement and particle size. Three gradations of suspended solids in
66 size are considered: pelitic fraction (clay), aleuvrit fraction (silt) and fine sand. The emphasis
67 is on assessing the impact of marine storm surges on the transport of suspended solids into
68 the river delta and their deposition. To describe water flows between areas, movement
69 speeds, level dynamics and floodplain flooding processes, a detailed model based on the
70 HEC-RAS software adapted to the conditions of the Don River estuary area is used.
71 Calculations of the transport and accumulation of suspended solids in the Don River estuary
72 area were carried out for two variants of hydrological conditions — with the water surge
73 from the sea and without it. The spatiotemporal variability of the concentration and
74 granulometric composition of suspended sediment depending on hydrological conditions is
75 considered. It is shown that in the absence of surge phenomena and low water flow rates,
76 suspended solids are mainly deposited in the avandelta outside the sea edge of the delta, and
77 during the surge period they saturate the water and, at the stage of rising its level, enter the
78 delta, partially settling in the branches and in the floodplain areas. At the same time, at the
79 stage of the water level decline, they are carried out of the channel segments beyond the sea
80 edge of the delta, and mostly remain in the floodplain areas. For low-water conditions with
81 the observed frequency of surge events and in the absence of floods, the Don estuary area
82 retains on average 20 % of suspended solids entering with the Don River runoff.

83 **Keywords:** balance model, suspended matter, modeling system HEC-RAS, storm surge, the
84 Don River delta



Введение

Дельты рек мира являются важными географическими районами, включающими в себя всего около 0,5 % площади суши, но населенными почти 5 % населения мира [1]. Еще 140 миллионов человек проживают в пределах 25 км от дельт, а 3,5 миллиарда — в дельтовых водосборных бассейнах [2]. 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. Вместе с тем дельты сталкиваются с различными угрозами [3, 4, 5, 6], которые снижают ценность этих услуг. Глобальное эвстатическое повышение уровня моря, превышающее 3–4 мм/год [7], рассматривается как реальная угроза для дельт мира [4, 6]. 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 [8].

За последние 60 лет морской край дельты Дона перестал выдвигаться в море после введения в эксплуатацию Цимлянского водохранилища в 1952 г. и низконапорных плотин ниже по течению [9, 10]. 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 период времени произошли изменения в региональной атмосферной циркуляции. Преобладающими стали западные и юго-западные ветры, формирующие значительные штормовые нагоны морской воды в дельту и способные приносить большое количество взвеси. В последние годы положение фронта дельты стабилизировалось.

Кроме стабилизации морского края дельты с середины 1980-х годов начала уменьшаться ширина речных каналов. Максимальное изменение проявляется на расстоянии 15–20 км от морского края. Здесь к 2020 г. суммарная 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 влияние беспрецедентного сочетания негативных факторов, включающих в себя повышение солёности и температуры вод [11], трансформацию водного сообщества, вызванную вытеснением аборигенных видов инвазионными таксонами, предположительно в связи с изменением климата в регионе [12].

Большие нагоны приносят солёную 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 [13]. Последняя все чаще смещается вглубь дельты.

Целью настоящей работы является описание подхода к моделированию влияния штормовых нагонов на перенос и накопление взвешенных веществ

дельте Дона в условиях недостаточной водности речного стока (период маловодья).

1 Материалы и методы исследования

1.1 Регион исследования

Регионом исследования является часть устьевой области р. Дон, которая начинается от станицы Раздорской (здесь находится гидрологический стокосый пост) и включает в себя участок реки до г. Ростова-на-Дону (здесь имеется ряд боковых притоков — реки Аксай, Тузлов, Маныч и Темерник), донскую дельту и авандельту — прилегающий участок Таганрогского залива за пределами морского края дельты (рис. 1А). Вся устьевая область Дона простирается от ст. Раздорской на востоке до Должанской косы на западе [14], но в данной статье под устьевой областью будет подразумеваться регион исследования.

Дельта Дона имеет классическую треугольную форму с вершиной на востоке в г. 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 .

В ландшафте дельты Дона, близком к уровню моря, преобладают водно-болотные угодья и множество водотоков (от первичных и вторичных до небольших каналов, соединяющих внутренние водоемы дельты). Основными рукавами в дельте являются Старый Дон, Большая Каланча, Мокрая Каланча, Большая и Средняя Кутерьма, Мертвый Донец. Ниже г. Азова Старый Дон превращен в Азово-Донской судоходный канал (более подробно см. [15]).

1.2 Подход к моделированию водного и вещественного баланса устьевой области Дона

Для моделирования динамики воды и вещества 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, годовой временной интервал можно разбить на подинтервалы с разными гидрологическими условиями: относительно короткие по времени, когда дельта подвержена затоплению в результате поступления воды со стороны моря при штормовом нагоне, и более длительные, когда пойменные и русловые районы гидрологически не связаны. Вода и находящиеся в ней взвешенные вещества перемещаются по русловым районам в сторону моря, а в районах суши, расположенных в пойме дельты, протекают независимые от гидрологии реки процессы.

В пространственном аспекте выделены следующие типы районов устьевой области. Во-первых, это русловые районы, которые постоянно находятся под водой и по которым вода и содержащиеся в ней взвешенные вещества перемещаются в сторону моря, а при нагонах воды с моря могут перемещаться и в обратном направлении. Во-вторых, это районы поймы

176
177
178
179
180
181
182
183

дельты, которые в основном в течение года представляют собой сушу, но иногда, в период нагонов или речных паводков затапливаются. В-третьих, это район Таганрогского залива — авандельта (подводная наклонная часть дельты).

Разделив русловые сегменты на отдельные районы с учетом ветвления основного русла на рукава и протяженности каждого сегмента, получаем гидрологическое районирование устьевой области Дона (рис. 1Б).

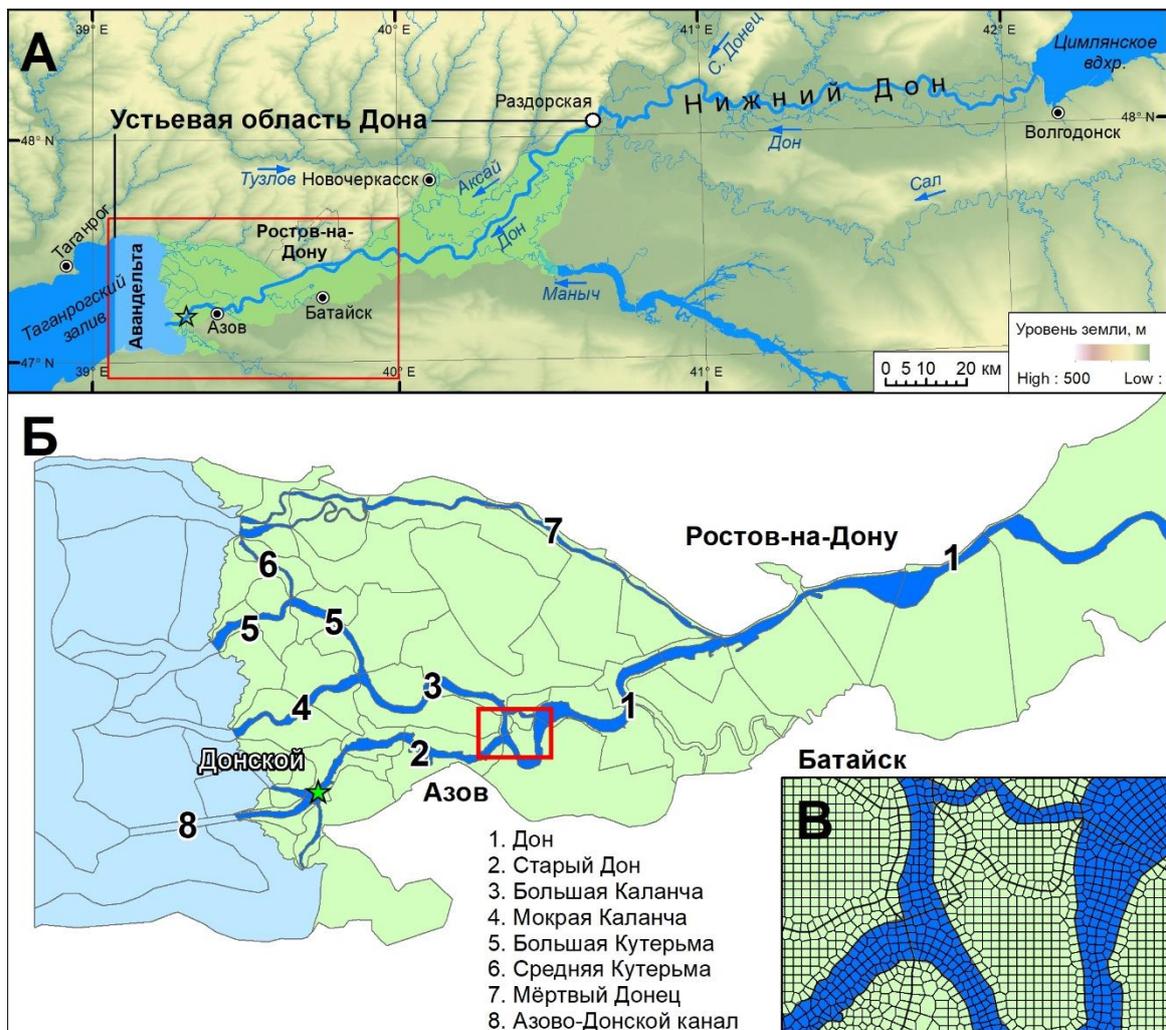


Рисунок 1. Регион исследования: гидрографическая сеть (А) (звездочкой отмечен пункт наблюдения за уровнем воды), гидрологическое районирование устьевой области Дона (Б) и пример сеточного разбиения для моделирования гидрологических условий с применением программного комплекса HEC-RAS (В)

184
185
186
187
188
189
190
191
192
193

Для моделирования переноса и осаждения взвешенных веществ в устьевой области используются две модели: модель устьевой области Дона на базе программного комплекса HEC-RAS — DeltaDonHECRAS и балансовая модель DeltaRiverBalanceModel.

Информационной основой для исследования служат: база данных автоматизированных наблюдений за уровнем воды на гидрологических постах ЮНЦ РАН в дельте Дона и база данных гидрохимических показателей, полученных в ходе экспедиционных работ ЮНЦ РАН в устьевой области Дона в 2007–2021 гг. [16].

1.3 Модель устьевой области Дона на базе программного комплекса HEC-RAS — DeltaDonHECRAS

Программный комплекс HEC-RAS, предназначенный для моделирования течения воды по системам открытых каналов, применяется, в частности, в исследованиях по управлению поймами для оценки последствий затопления [17, 18]. Исследование с его помощью течения воды в дельтах в условиях сгонно-нагонных и приливных колебаний уровня моря в последнее время также получает распространение [19, 20]. Здесь мы опираемся на опыт оценки затопления дельты Дона в период экстремального нагона в сентябре 2014 г. [21].

Расчетная область делится на 101095 ячеек средним размером 100 на 100 м (рис. 1 В). Приток речной воды по основному руслу в районе станицы Раздорской и динамика уровня воды в Таганрогском заливе при ветровом нагоне задаются в качестве граничных условий. Затем рассчитываются потоки воды между ячейками и объем воды в них. Расчетный шаг модели — 10 минут. Эти значения записываются в базу данных и используются моделью DeltaRiverBalanceModel.

1.4 Балансовая модель переноса растворенных и взвешенных веществ

Модель DeltaRiverBalanceModel включает в себя следующие блоки (модули): водного баланса и переноса и осаждения взвешенного вещества.

Для каждого из выделенных гидрологических районов 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 $t + dt$ и t 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 внешние источники — это приток речной воды по основному руслу и поступление морской воды из Таганрогского залива при ветровом нагоне. Другие внешние источники (сбросы сточных вод, приток подземных вод и осадки) не рассматриваются. 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 модели DeltaDonHEC-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 модели DeltaDonHEC-RAS с гидрологическим районированием, где объединяются все ячейки, входящие в тот или иной район, обобщается информация по уровню

235 воды, объему воды, площади затопления, потокам и скоростям движения воды
236 через границы между ячейками и районами.

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

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

239 где $b_i(t + dt)$, $b_i(t)$ — средняя по объему концентрация взвешенного вещества
240 в i -м районе в моменты времени $t + dt$ и t соответственно, мг/дм³; $b_{in,i}(t)$ —
241 концентрация взвешенного вещества в водных потоках, поступающих извне,
242 мг/дм³; ω — скорость осаждения (гидравлическая крупность) взвешенного
243 вещества, м/с; $S_i(t, t + dt)$ — площадь района под водой, средняя в интервале
244 времени $(t, t + dt)$, тыс. м²; α^0 — параметр, отвечающий за интенсивность
245 взмучивания; $b_i^*(t, t + dt)$ — концентрация взвешенного вещества,
246 обусловленная транспортирующей способностью потока, средняя в интервале
247 $(t, t + dt)$, мг/дм³.

248 Величина b^* , следуя [22], оценивается по следующей формуле (3):

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

249 где K , m — эмпирические параметры, $K = 5,0$ г/м³, $m = 0,92$; u — средняя (по
250 вертикали) скорость течения, м/с; g — ускорение свободного падения, $g =$
251 $9,81$ м/с²; R — гидравлический радиус, м. Нижние индексы принадлежности к
252 определенному району опущены.

253 Гидравлический радиус для р. Дон в нижнем течении и рукавов дельты
254 можно считать пропорциональным средней глубине.

255 Таким образом, изменение концентрации взвешенного вещества в
256 гидрологических районах кроме процессов его поступления и выноса через
257 боковые границы определяется процессами его осаждения и взмучивания из
258 донных отложений. Интенсивность взмучивания корректируется параметром
259 α^0 .

260 Скорость осаждения частиц зависит от их размера k (м) и рассчитывается,
261 следуя [23], по формуле (4):

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

262 где ρ_1 — плотность частиц, $\rho_1 = 2650$ кг/м³; ρ — плотность воды, $\rho = 1000$ кг/м³;
263 φ — параметр турбулентного поведения наносов в потоке, который отражает
264 особенности осаждения частиц в реальных условиях водоема.

265 Взвесь делится на три группы по размерам: пелитовая фракция (глина,
266 clay), частицы размером меньше 0,01 мм; алевритовая фракция (ил, silt),
267 частицы размером 0,1–0,01 мм и песчаная фракция (песок, sand), частицы
268 размером более 0,1 мм.

269 2 Результаты исследования и их обсуждение

270 2.1 Калибровка параметров и верификация модели DonDeltaHECRAS

271 Проверка гидрологического блока модели проводилась путем сравнения
272 результатов расчетов с измерениями расходов воды на поперечных профилях

273
274
275
276
277

в судоходном русле Дона, в рукавах Каланча и Кутерьма и в гирлах юго-западной части дельты, выполненными 13–15 сентября 2016 г. для калибровки параметров модели и 22–23 сентября 2014 г. для контрольной проверки (распределение точек измерений в дельте Дона представлено на рисунке 2А).

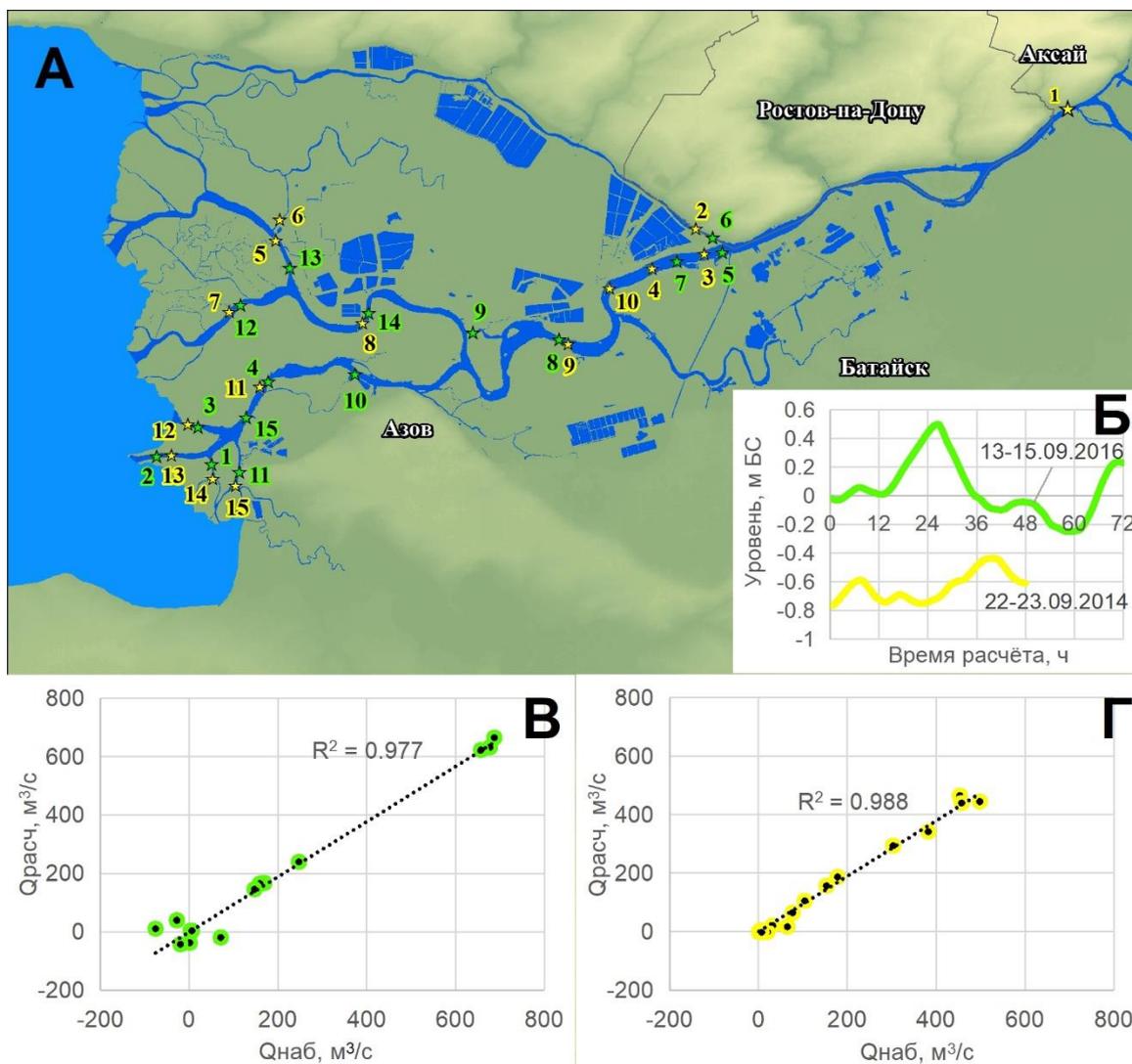


Рисунок 2. Результаты верификации модели устьевой области Дона по данным 13–15 сентября 2016 г. (зеленый цвет) и 22–23 сентября 2014 г. (желтый цвет): распределение точек измерений в дельте Дона (А); ход уровня воды на уровнемере на причале «Донской» (Б); сопоставление результатов расчета расходов воды с данными наблюдений при калибровке параметров модели (В); сопоставление результатов расчета расходов воды с данными наблюдений при верификации модели (Г) (отрицательные значения расходов воды соответствуют условиям, когда вода движется от морского края в направлении вершины дельты)

278
279
280
281
282
283
284
285

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. Раздорской до вершины дельты имеется боковая приточность из рек Маныч, Тузлов, Аксай и Темерник. Так как систематические наблюдения здесь отсутствуют, то рассматривались разные сценарии поступления воды 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

286 задавался по данным уровнемера, установленного на причале «Донской»
287 Южного научного центра РАН, который расположен примерно в 20 км от
288 границы расчетной области в Таганрогском заливе со сдвигом по времени 20
289 минут назад и отмечен звездочкой на рисунке 1А (ход уровня воды на
290 уровнемере представлен на рисунке 2Б).

291 В качестве калибровочных параметров рассматривались цифровая
292 модель местности (ЦММ) и коэффициенты шероховатости русел. Из-за
293 практически равнинного ландшафта дельты и отсутствия детальных промеров
294 профиля русел, особенно на несудоходных участках, ЦММ имеет много
295 неопределенностей и требует уточнения. В результате серии вычислительных
296 экспериментов, направленных на приближение расчетных расходов воды
297 данными наблюдений в точках измерений, для коэффициентов шероховатости
298 русел везде были приняты одинаковые значения — 0,0125. Сопоставление
299 результатов расчета расходов воды с данными наблюдений представлено на
300 рисунке 2В. Для авандельты было использовано то же значение коэффициента
301 шероховатости, что и для русел, а для поймы — 0,08 (рекомендованное
302 значение для заросших пойм по М.Ф. Срибному).

303 Проверочные расчеты проводились без изменения значений ЦММ и
304 коэффициента шероховатости. Расчетные расходы воды сравнивались с
305 данными измерений, выполненными 22–23 сентября 2014 г. (рис. 2Г).

306 Результаты проверки (см. табл. ДМ3 и ДМ4 [24]) показывают, что модель
307 дельты Дона воспроизводит особенности распределения воды по основным
308 рукавам, несмотря на некоторые различия, как в судоходном канале, так и в
309 несудоходных гирлах Мериново и Каменное (главным образом, вблизи
310 морского края дельты). Отмечается повышенное распределение стока в
311 судоходную часть Дона по сравнению с рукавами Каланча и Большая Кутерьма.

312 **2.2 Математическое моделирование гидрологических условий устьевой** 313 **области Дона при различных расходах воды и нагонных колебаниях ее** 314 **уровня в Таганрогском заливе**

315 В период 2015–2020 гг. в дельте Дона наблюдалось 50 нагонов с
316 максимальным подъемом уровня воды от 1,0 до 1,77 м относительно
317 среднемноголетнего положения [25]. Из этого перечня выбрано 5 нагонов,
318 имеющих разную обеспеченность и разный расход воды в ст. Раздорская (табл.
319 1), и один экстремальный нагон 23–25 сентября 2014 г. с максимальным
320 превышением уровня воды 3,7 м. Кроме этого рассмотрены: характерные для
321 устьевой области гидрологические условия, когда явный нагон отсутствует, но
322 на морском крае дельты наблюдается периодическое изменение уровня воды
323 до минус 0,5 м относительно среднемноголетнего значения с периодом 12
324 часов (сценарий БН-2), а также гидрологические условия постоянного расхода
325 воды при полном отсутствии изменения уровня воды на левой границе
326 расчетной области — в Таганрогском заливе (сценарий БН-1). Для каждого
327 нагона выбраны дата и время максимального подъема уровня воды. Расчеты
328 по модели DeltaDonHEC-RAS проводились для четырех суток (двух суток до
329 наступления максимального уровня воды и двух — после). Краткие
330 характеристики рассмотренных нагонов воды со стороны Таганрогского
331 залива приведены ниже.

Таблица 1. Характеристики расчетных сценариев нагонов в дельте Дона

№ п п	Условное обозначение сценария	Максимальный подъем уровня воды от среднемноголетнего значения, м	Дата начала нагона	Дата окончания нагона	Средний расход воды в ст.	Обеспеченность нагона, %	Концентрация взвешенного вещества в воде, поступающей в устьевую область из Таганрогского залива, мг/л
1	Н-1	1,77	18/03/2018	22/03/2018	507	27	120
2	Н-2	1,75	14/04/2020	18/04/2020	300	29	120
3	Н-13	1,4	30/03/2016	3/4/2016	407	54	100
4	Н-16	1,36	19/04/2018	23/04/2018	1462	59	70
5	Н-40	1,06	22/02/2019	26/02/2019	525	85	50
6	НЭ-3,7	3,7	23/09/2014	25/09/2014	541	0,8	160

334

335

336

337

338

339

340

341

Примечание 1. Концентрация взвешенного вещества в воде, поступающей в устьевую область из Таганрогского залива, оценивалась по материалам исследований в дельте Дона и Таганрогском заливе для нагонов-аналогов, а также по описанным в [26] зависимостям взмучивания донных отложений в Таганрогском заливе от силы ветра и волнения моря. В нумерации сценариев нагонов используется их порядковый номер в таблице нагонов, зафиксированных в период с января 2015 г по май 2020 г. на гидрометеопосту ЮНЦ РАН в хуторе Донском [25].

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

Сценарий Н-1. Расчёт проводился для периода между 16:40 19 марта и 16:40 23 марта 2018 г. с максимальным подъемом уровня воды на 1,77 м в 16:30 21 марта (рис. П.2). Расход воды в Дону в эти даты сначала снижался с 514 м³/с (19 марта) до 432 м³/с (21 марта), а затем возрастал до 631 м³/с 23 марта. Рост уровня воды начался с отметки минус 0,7 м относительно его среднемноголетнего положения. Наблюдаются 3 волны роста уровня воды, сменяющиеся падениями: первая — в ночь на 20 марта примерно на 1 м, вторая — в течение 21 марта до максимального нагонного уровня воды (1,77 м), третья — во второй половине 22 марта примерно на 0,5 м.

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

Сценарий Н-2. Расчёт проводился для периода между 10:00 15 апреля и 10:00 19 апреля 2020 г. с максимальным подъемом уровня воды на 1,75 м в 9:50 17 апреля (рис. П.3). Расход воды в Дону в эти даты был стабильно очень низким — около 300 м³/с. Рост уровня воды начался с отметки 0,43 м относительно его среднемноголетнего положения. Выделяется сначала небольшое падение уровня воды на 0,5 м, затем примерно 1,5 суток плавного нагонного роста до максимума и небольшой всплеск уровня воды в конце 18 апреля на 0,3 м. В сравнении со сценарием Н-1 этот сценарий интересен тем, что при том же максимальном нагонном уровне воды ее расход в Дону примерно в 2 раза меньше, хотя продолжительность нагона примерно в 2 раза больше.

362

363

364

365

Сценарий Н-13. Расчёт проводился для периода между 10:30 31 марта и 10:30 5 апреля 2016 г. с максимальным подъемом уровня воды на 1,4 м в 10:30 2 апреля (рис. П.4). Расход воды в ст. Раздорской в целом пониженный (около 400 м³/с), но с устойчивым ростом от 383 до 440 м³/с. На протяжении всего

366 сценария уровень воды был выше его среднемноголетнего положения,
367 максимальный нагонный уровень воды 1,4 м был достигнут примерно за 10
368 часов ростом на 0,7 м, затем примерно за то же время уровень воды упал до 0,7
369 м и постепенно падал до 0,2 м, сменившись в конце сценария скачком уровня
370 воды на 0,4 м. В целом можно отметить, что в этом сценарии имитируется
371 ветровой всплеск уровня воды на 0,7 м на фоне повышенного уровня воды и
372 меженного расхода воды в Дону.

373 Сценарий Н-16. Расчёт проводился для периода между 10:00 20 апреля и
374 10:00 25 апреля 2018 г. с максимальным подъемом уровня воды на 1,36 м в
375 10:00 22 апреля (рис. П.5). Это сценарий небольшого ветрового нагона на фоне
376 половодного расхода воды в Дону — рост от 1330 до 1550 м³/с. Подъем уровня
377 воды начался с отметки 0,4 м относительно его среднемноголетнего оложения.
378 После небольшого снижения на 0,2 м в течение суток наблюдался нагонный
379 рост уровня воды примерно на 1,2 м.

380 Сценарий Н-40. Расчёт проводился для периода между 0:00 24 февраля и
381 0:00 1 марта 2019 г. с максимальным подъемом уровня воды на 1,06 м в 0:00 26
382 февраля (рис. П.6). Это самый слабый нагон из рассмотренных, развивавшийся
383 на фоне среднего расхода воды в Дону — от 491 до 565 м³/с. По форме нагон
384 близок к сценарию Н-13. Такие нагоны на фоне среднего расхода воды в Дону
385 наиболее часты.

386 Сценарий НЭ-3,7. Это наиболее экстремальный нагон за последние 100
387 лет наблюдений. Расчёт проводился для периода между 17:20 22 сентября и
388 17:20 27 сентября 2014 г. с максимальным подъемом уровня воды на 3,70 м в
389 17:20 24 сентября (рис. П.7). Рост уровня воды составил порядка 3,5 м за 12
390 часов на фоне стабильного меженного расхода воды в Дону — 430 м³/с. За
391 пиком подъема уровня воды наблюдалось его падение в течение полутора
392 дней.

393 Для оценки полученных результатов моделирования гидрологических
394 условий при нагонах разной обеспеченности выделено три русловых
395 гидрологических района (№16, 23 и 42), расположенных на разном расстоянии
396 от фронта дельты, и один (№ 4), являющийся продолжением Азово-Донского
397 судоходного канала в авандельте.

398 Для русловых районов в период действия нагонов с превышением уровня
399 воды в диапазоне от 1,0 до 3,7 м (рис. П.2–П.7) наблюдается сначала замедление
400 скоростей потоков, направленных в сторону залива, а затем потоки
401 разворачиваются в обратную сторону и их скорость растет вплоть до
402 достижения пика уровня воды, который наступает раньше пика скорости
403 потока. Затем скорости потоков быстро падают до нуля, потоки
404 разворачиваются в направлении от реки к морю, и восстанавливаются
405 обычные значения их скоростей. Амплитуды скоростей обратных потоков при
406 удалении от морского края дельты уменьшаются. Потоки в русловых районах
407 вдали от моря под воздействием нагонов только замедляются (без изменения
408 направления). Чем интенсивней нагон (выше максимальный уровень) и ниже
409 речной расход, тем дальше от морского края дельты формируются обратные
410 течения [27].

411 Важно отметить, что при падении уровня воды после достижения
412 максимума нагона в русловых районах дельты, скорости потоков,

направленных в сторону залива, превышают значения, которые были в период роста уровня воды. Для районов, расположенных в авандельте, это не так. В период падения уровня воды скорости потоков ниже, чем в период его роста. Особенно это заметно для экстремального нагона (рис. П.7). Однако, при расходе воды в Дону близком к значениям, характерным для половодья (рис. П.5), и не очень высоком уровне нагона, эта особенность нарушается — практически всегда скорость потока при уменьшении уровня воды выше (сравните рис. П.5–П.6 для района №4).

Для пойменных районов дельты по мере их затопления скорости потоков уменьшаются при удалении от граничных русловых районов к периферии, при падении уровня воды на отдельных участках рельефа (ерики, каналы стока) скорости потоков могут возрастать из-за более быстрого уменьшения площади района, подверженного затоплению, чем в период подъема уровня воды.

Таким образом в периоды нагонов скорости потоков в авандельте и русловых районах могут достигать достаточно высоких значений (до 0,4–0,5 м/с и более), что создает сначала условия для взмучивания донных отложений в районах авандельты, а затем на этапе падения уровня воды и в русловых районах.

При осреднении скоростей потоков по выделенным гидрологическим районам (за период расчета) получаем их распределение вдоль основных русел (рис. 3). При этом рассмотрим отдельно:

1) основное судоходное русло «Дон — Старый Дон — АДСК», представлено последовательностью гидрологических районов №78→№64→№57→№42→№30→№23→№22→№16→№9 от вершины дельты к морскому краю (рис. 3А);

2) рукав «Дон — Большая Каланча — Мокрая Каланча», представлен последовательностью районов №78→№64→№57→№42→№30→№33→№50→№52→№51→№41 (рис. 3Б);

3) рукав «Дон — Большая Каланча — Большая Кутерьма — Кутерьма», представлен районами №78→№64→№57→№42→№30→№33→№50→№52→№68→№76→№75→№70 (рис. 3В);

4) рукав «Дон — Большая Каланча — Большая Кутерьма — Средняя Кутерьма», представлен районами №78→№64→№57→№42→№30→№33→№50→№52→№68→№76→№89→№96→№100 (рис. 3Г);

5) рукав «Дон — Мертвый Донец», представлен районами №78→№83→№107→№111→№115→№114 (рис. 3Д).

Для сценария БН-1 при отсутствии изменения уровня воды в заливе в вершине дельты средняя скорость потока составляет примерно 15 см/с и падает до 10–5 см/с в гирлах Мокрая Каланча, Большая Кутерьма на морской границе дельты. В рукаве Мертвый Донец скорость потока еще меньше — до 3 см/с. Это связано с последовательным ветвлением русла Дона на протоки и расширением суммарной ширины русел по мере приближения к морскому краю. На отдельных участках рукавов средние скорости потоков из-за особенностей морфометрии русел локально возрастают (см., например, рис. 3 районы №68, 57, 50 и 52).

457
458
459
460

Для сценария БН-2 в районах, близких к морскому краю дельты, из-за колебаний уровня воды с амплитудой 0,5 м в течение суток, скорости потоков опять возрастают до 15–20 см/с.

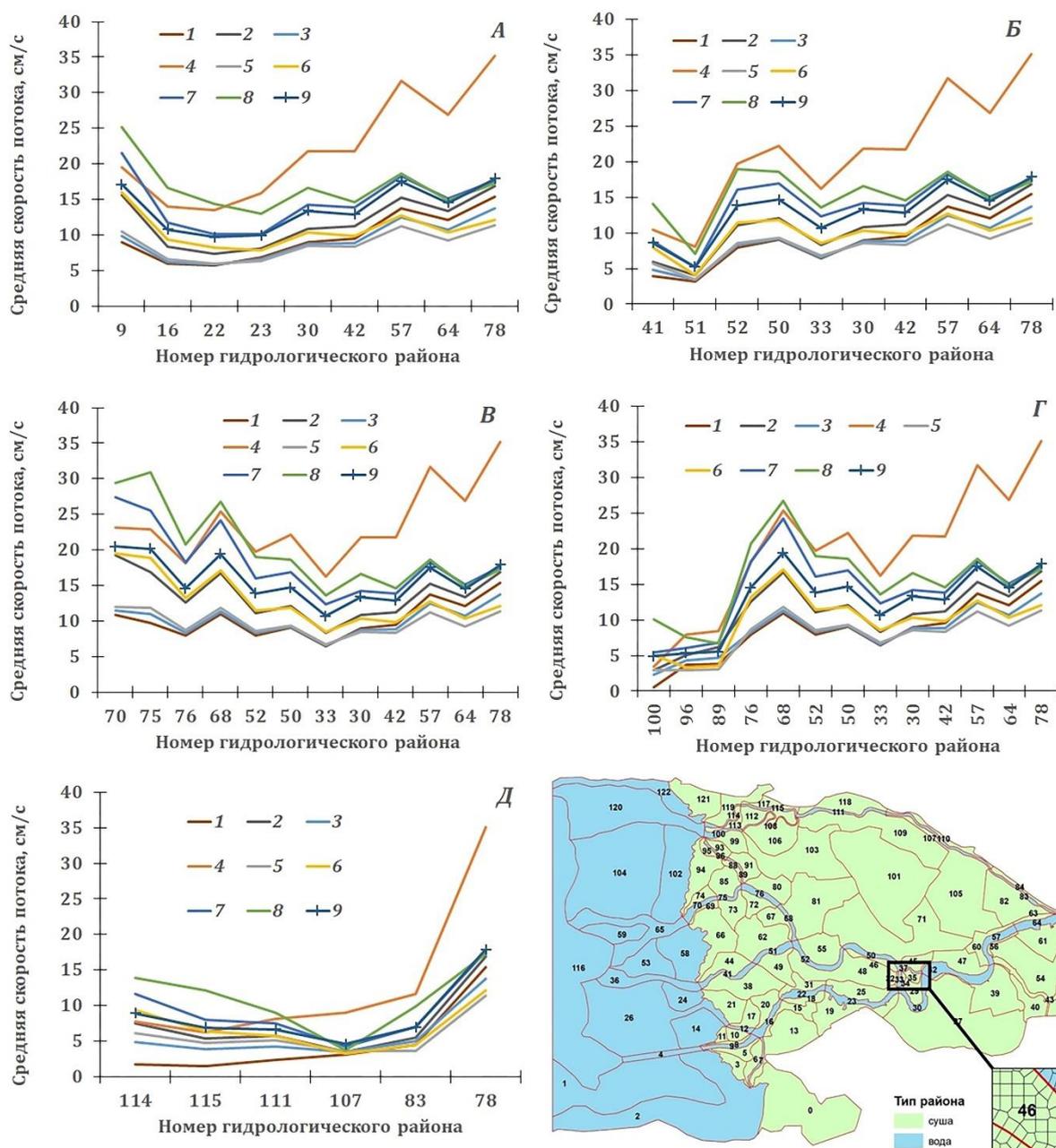


Рисунок 3. Распределение средних скоростей потоков по рукавам дельты: «Дон — Старый Дон — АДСК» (А), «Дон — Большая Каланча — Мокрая Каланча» (Б), «Дон — Большая Каланча — Большая Кутерьма — Кутерьма» (В), «Дон — Большая Каланча — Большая Кутерьма — Средняя Кутерьма» (Г), «Дон — Мертвый Донец» (Д)
1 — сценарий БН-1, 2 — сценарий БН-2, 3 — сценарий Н-40, 4 — сценарий Н-16, 5 — сценарий Н-13, 6 — сценарий Н-2, 7 — сценарий Н-1, 8 — сценарий НЭ-3,7, 9 — среднее по всем сценариям нагонов

461
462
463
464
465

Нагонные явления приводят к существенному (в 2–3 раза) увеличению средней скорости потоков в гидрологических районах практически до середины дельты со стороны моря. При этом амплитуда колебаний существенно выше (рис. П.2–П.7). Гидрологические условия сценария Н-16

отличаются большими расходами воды (до 1550 м³/с), поэтому здесь скорости потоков в вершине дельты существенно выше по сравнению с тем, когда расходы воды находятся на уровне 300–500 м³/с.

Все это в совокупности влияет на процессы переноса взвешенных частиц.

2.3 Моделирование динамики взвешенного вещества

Для расчета динамики взвешенного вещества приняты следующие граничные условия.

Суммарная концентрация взвешенного вещества в речном стоке в ст. Раздорской принята равной 17 мг/л [16] 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. Раздорской за период 2005–2020 гг.

Суммарная концентрация взвешенного вещества в период нагона в Таганрогском заливе принималась равной значению из табл. 1 при следующем распределении по фракциям: пелит (64,5 %), алеврит (35,5 %). Частиц песчаной фракции — менее 0,1 %.

Структура донных отложений задавалась следующим образом. Для русловых районов предполагалось, что соотношение частиц такое: пелит (10 %), алеврит (25 %), песок (65 %), а для авандельты — пелит (20 %), алеврит (50 %), песок (30 %). Для пойменных районов был принят гранулометрический состав, характерный для луговых аллювиальных почв [28]: пелит (50,5 %), алеврит (45,5 %), песок (4 %).

В качестве начальных значений для всех районов задавалась концентрация частиц соответствующего размера, определяемая транспортирующей способностью потока, рассчитанной по средней скорости, характерной для района в случае отсутствия нагона (сценарий БН-1).

Динамика взвешенного вещества при отсутствии нагона (сценарий БН-1).

В данном вычислительном эксперименте рассматривалась ситуация, когда на границе расчетной области в Таганрогском заливе уровень моря не изменяется относительно его среднемноголетнего значения, осаждение взвешенного вещества происходит везде, а взмучивание — только в заливе и в русловых районах. В районах, расположенных на пойме дельты, взмучивание донных отложений не задается.

При выполнении расчетов проводились эксперименты с параметром α^0 для корректировки скорости взмучивания частиц соответствующего размера. Задача заключалась в том, чтобы «уравновесить» процессы осаждения и взмучивания для русловых районов. Подобранные значения α^0 для частиц пелитовой, алевритовой и песчаной размерности: 0,35; 3,0 и 5,0 соответственно. Уменьшение параметра α^0 от песчаной к пелитовой фракции может быть объяснено тем, что мелкие частицы слипаются и их труднее оторвать от дна.

В данных гидрологических условиях в конце расчетного периода устанавливается стационарное по пространству распределение концентрации взвешенных веществ, определяемое их поступлением с донской водой и процессами осаждения и взмучивания.

Для остальных сценариев значение параметра α^0 не изменялось.

512
513
514
515

Результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 4 как распределение концентрации взвешенных частиц вдоль основных русел дельты (по аналогии с рис. 3).

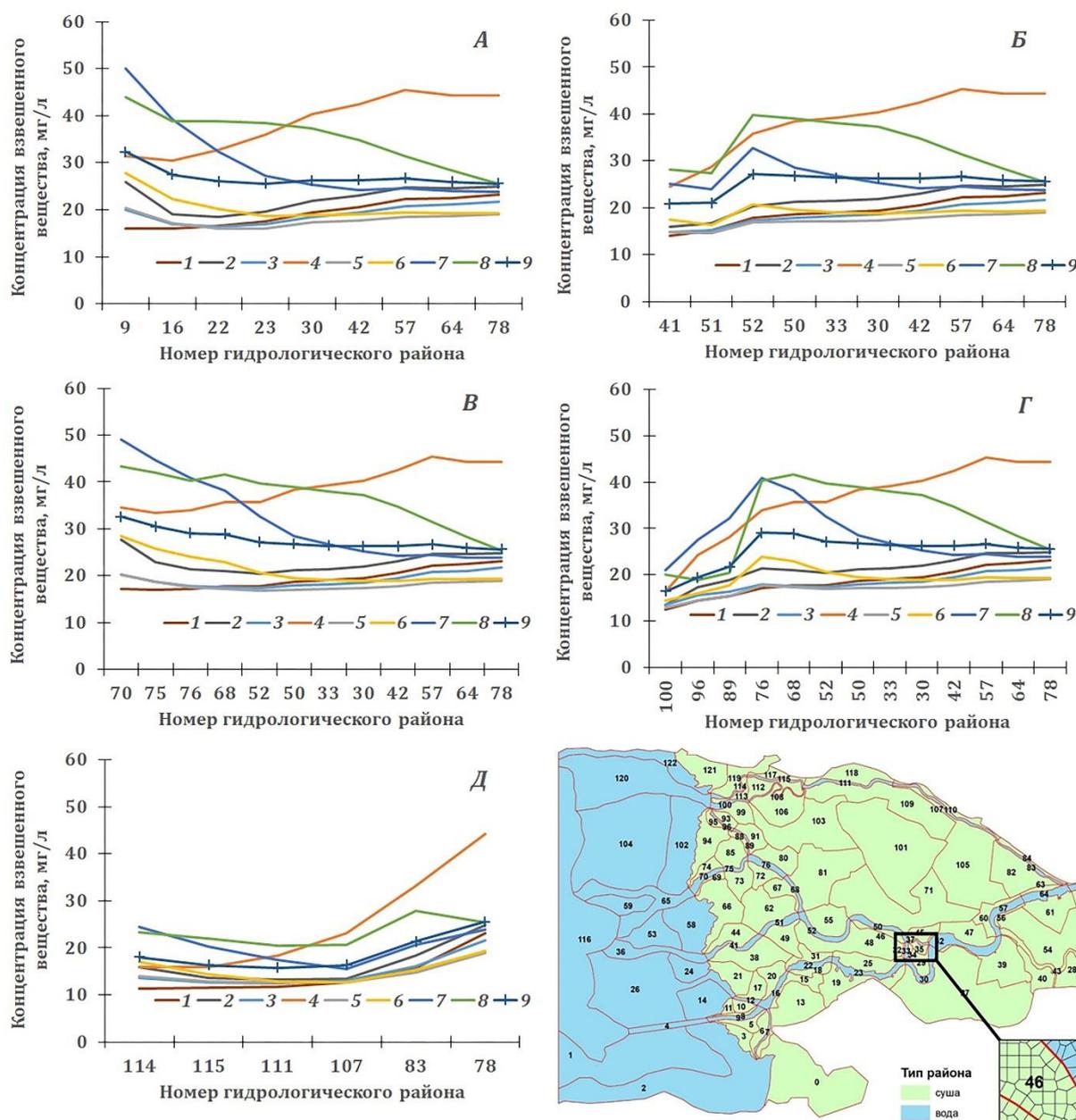


Рисунок 4. Распределение средней концентрации взвешенного вещества по рукавам дельты: «Дон — Старый Дон — АДСК» (А), «Дон — Большая Каланча — Мокрая Каланча» (Б), «Дон — Большая Каланча — Большая Кутерьма — Кутерьма» (В), «Дон — Большая Каланча — Большая Кутерьма — Средняя Кутерьма» (Г), «Дон — Мертвый Донец» (Д)
1 — сценарий БН-1, 2 — по сценарий БН-2, 3 — сценарий Н-40, 4 — сценарий Н-16, 5 — сценарий Н-13, 6 — сценарий Н-2, 7 — сценарий Н-1, 8 — сценарий НЭ-3,7, 9 — среднее по всем сценариям нагонов

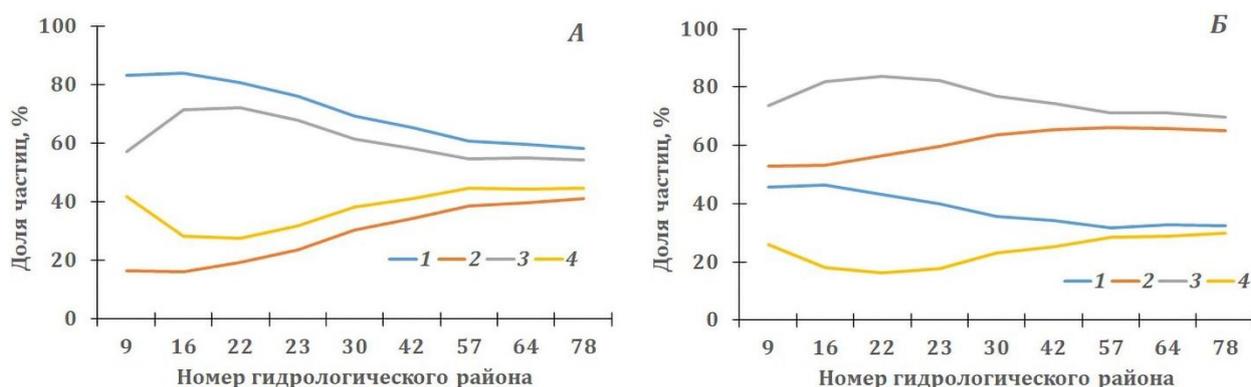
516
517
518
519

По мере продвижения воды от ст. Раздорской к вершине дельты концентрация взвешенного вещества увеличивается примерно до 20 мг/л (рис. 4). В дельте из-за снижения скоростей потоков их транспортирующая

520 способность ослабевает, и общая концентрация взвешенного вещества
521 уменьшается до 15-10 мг/л.

522 Похожая ситуация характерна и для второго сценария без явно
523 выраженного нагона (сценарий БН-2), но в отдельных районах дельты,
524 примыкающих к морскому краю, концентрация взвешенного вещества
525 возрастает до 30 мг/л (рис 4). Это связано с суточными колебательными
526 движениями уровня воды и увеличением скоростей потоков.

527 По мере продвижения воды от вершины дельты к морскому краю
528 существенно меняется гранулометрический состав взвешенного вещества
529 (рис. 5А) — доля частиц пелитовой размерности увеличивается до 80 %.



531 **Рисунок 5.** Гранулометрический состав взвешенного вещества в основном русле «Дон —
532 Старый Дон — АДСК»: А — сценарий БН-1 (1 — глина, 2 — ил) и сценарий БН-2 (3 — глина, 4—
533 ил), Б — сценарий Н-16 (1 — глина, 2 — ил) и сценарий Н-1 (3 — глина, 4 — ил)

534 Динамика взвешенного вещества при нагонах. В данных расчетах для
535 сравнения с гидрологическими условиями при отсутствии нагона
536 концентрация взвешенного вещества в каждом районе усреднялась за весь
537 период нагона.

538 В авандельте в условиях штормового нагона происходит волновое
539 взмучивание донных отложений, и в дельту поступают водные потоки,
540 насыщенные взвешенным материалом (табл. 1). Концентрация взвешенного
541 вещества в воде существенно меняется во времени из-за изменения средних
542 скоростей потоков в широком диапазоне от практически нулевых значений до
543 40–50 см/с (рис. П.2–П.7).

544 В период нагона (рис. 5Б) из-за процессов осаждения и взмучивания
545 происходит как увеличение концентрации взвешенного вещества, так и
546 изменение его гранулометрического состава (увеличение доли алевритовой
547 фракции). Концентрация взвешенного вещества в пойменных районах дельты
548 увеличивается, как только они затапливаются нагонными водами, при этом
549 взвесь в основном представлена частицами пелитовой размерности, т. к. в этих
550 районах отсутствует (в модели) взмучивание почвенных частиц, а алевритовая
551 фракция осаждается на почву.

552 2.4 Осаждение взвешенного вещества в дельте

553 В сентябре 2021 г. во время нагона, который по гидрологическим
554 условиям соответствует сценарию Н-40, были установлены седиментационные

553
554
555
556
557
558
559
560

ловушки, конструктивно схожие с МСЛ-110 [29], в приуезовой пойменной части рукавов Старый Дон, в гирле Свиное и в протоке острова Бирючий, кроме того, анализировались данные долговременных экспозиций русловых седиментационных ловушек в рукавах Старый Дон и Каланча (рис. 6В). После обработки взвеси, накопленной в седиментационных ловушках, получены оценки скоростей осаждения и сопоставлены с результатами расчета скоростей осаждения взвешенного материала для сценария Н-40 (рис. 6 А, Б).

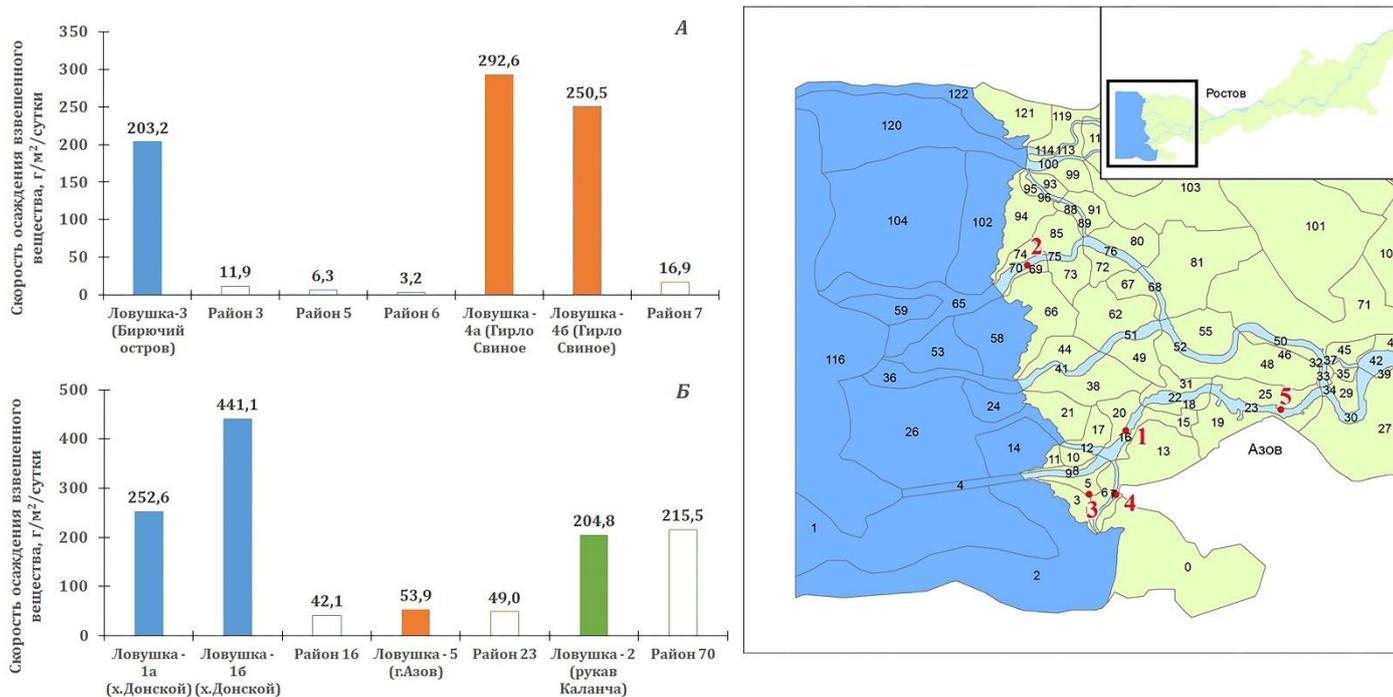


Рисунок 6. Скорость осаждения взвешенного вещества в пойменных (А) и русловых (Б) районах дельты по результатам расчетов в сопоставлении с материалом, накопленным в седиментационных ловушках. В — места установки ловушек

561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578

Можно отметить, что для русловых гидрологических районов суточные величины осаждения взвешенного вещества близки к модельным оценкам в большей степени, чем для пойменных районов. Для ловушек, установленных в районе причала в хуторе Донском (район №16), значительные отличия (в 5–10 раз) возможно связаны с усреднением модельных оценок в пределах всего района и особенностями расположения ловушек. Для пойменных районов дельты (ловушка 3, остров Бирючий и ловушки 4а и 4б, гирло Свиное) возможен недоучет в модели интенсивного взмучивания донных отложений, что потребует в дальнейшем корректировки параметров модели.

При выполнении вычислительных экспериментов рассчитывались значения разницы между взвешенным веществом, которое оседает на дно, и взвешенным веществом, которое переходит из донных отложений в воду в результате их взмучивания — результирующие величины баланса «оседание — взмучивание» в г/м²/сут. Для сценария БН-1 они представлены на рис. 7 для основных рукавов дельты в зависимости от расстояния от ее вершины (графики с индексом «1»). Чтобы сравнить их с величинами, характерными для сценариев с нагонами, значения баланса «оседание — взмучивание» были

579
580
581
582
583
584

усреднены по сценариям Н-40, Н-13, Н-2 и Н-1, а затем из них были вычтены значения баланса «оседание — взмучивание» для сценария БН-1 (показаны на рис. 7 с индексом «2»). Сценарий НЭ-3,7 не рассматривался, т.к. он является экстремальным. Сценарий Н-16 также не рассматривался, т.к. здесь нагон происходит при высоком расходе воды.

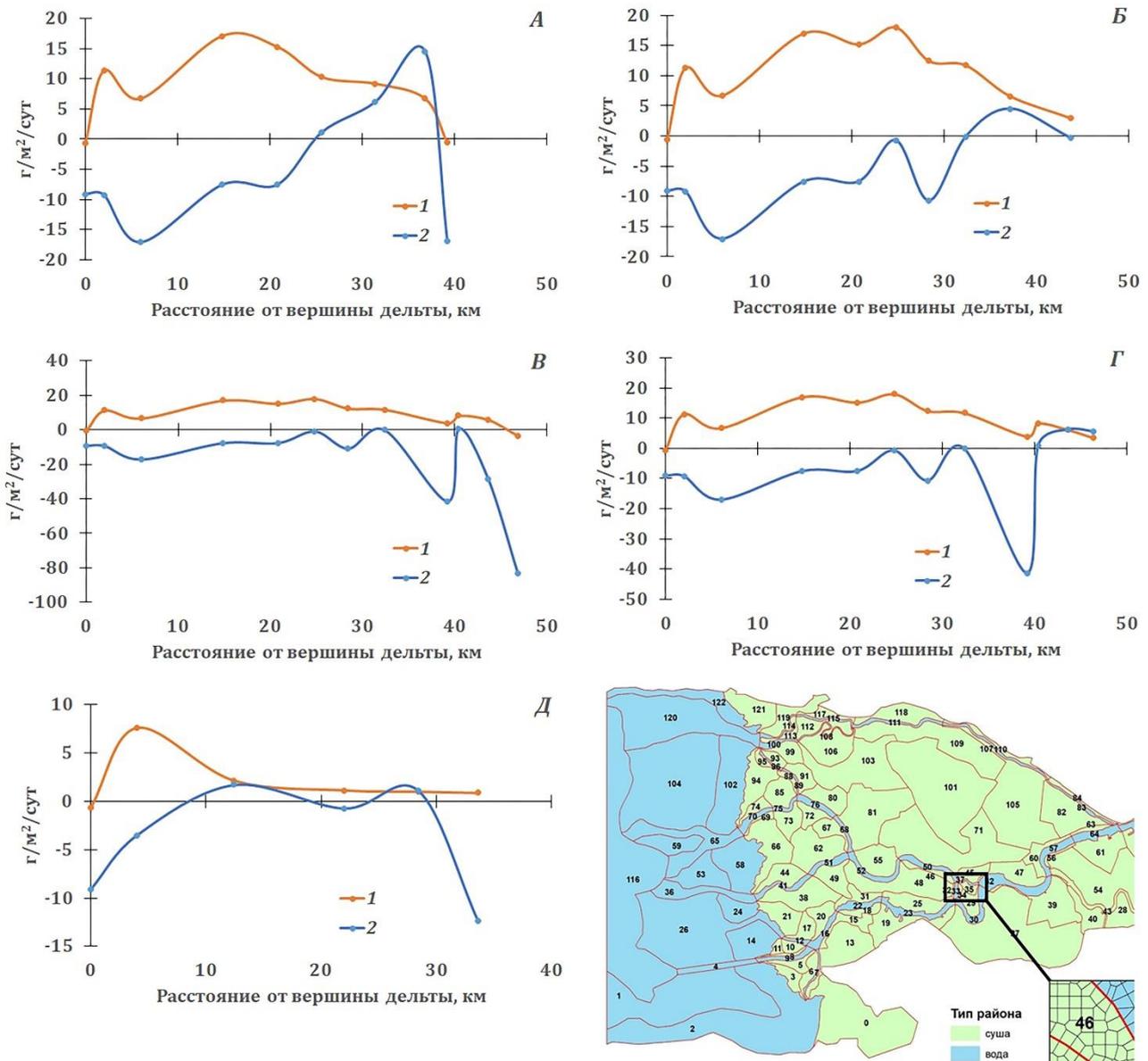


Рисунок 7. Потoki взвешенного материала при обмене с дном по рукавам дельты: «Дон — Старый Дон — АДСК» (А), «Дон — Большая Каланча — Мокрая Каланча» (Б), «Дон — Большая Каланча — Большая Кутерьма — Кутерьма» (В), «Дон — Большая Каланча — Большая Кутерьма — Средняя Кутерьма» (Г), «Дон — Мертвый Донец» (Д)
1 — баланс «оседание — взмучивание» для сценария БН-1, 2 — разница в значениях баланса «оседание — взмучивание» между сценариями с нагонами и сценарием БН-1

585
586
587
588
589

При отсутствии нагона баланс «оседание — взмучивание» положителен, и по всем руслам происходит накопление взвешенного материала. Вклад нагонов приводит к взмучиванию донных отложений на участках от вершины дельты примерно до 25 км (за исключением Мертвого Донца), затем

наблюдается переключение: процессы накопления материала начинают превалировать над размывом, но потом возле морского края дельты взмучивание опять начинает доминировать. Это подтверждает вывод о том, что речная вода на этапе падения ее уровня начинает выносить накопленный в русловых районах осадочный материал за пределы морского края дельты, где скорости потоков резко падают и взвешенное вещество начинает накапливаться на дне.

Количественные оценки взвешенного вещества, оседающего в устьевой области Дона (в пойменных районах, в русловых районах и районах авандельты) при нагонах разной обеспеченности, представлены в табл. П.1.

Данная версия модели, предусматривающая процессы осаждения взвешенного вещества и взмучивания донных отложений, демонстрирует следующий механизм, определяющий разную динамику взвешенных наносов в различных районах устьевой области. Скорость потока при спаде уровня воды после прохождения пика нагона в русловых районах становится существенно выше, чем при подъеме ее уровня. В результате взвешенное вещество, поступающее в дельту при подъеме уровня воды и оседающее в районах с околонулевыми скоростями потоков, затем опять выносится за пределы морского края дельты.

При нагонах с небольшими расходами воды (300–600 м³/с) в русловых ячейках взвешенное вещество накапливается, но с ростом расходов воды до 1400–1550 м³/с баланс смещается в сторону взмучивания донных отложений (табл. П.1). Тот же эффект характерен и для экстремального нагона 3,7 м при средних расходах воды (450 м³/с).

Ранее нами в работе [25] были представлены оценки накопления взвешенных веществ в дельте Дона, которые опирались на расчеты, выполненные в работе [30]. Здесь, с применением нового подхода к моделированию переноса и осаждения взвешенных веществ устьевой области Дона эти оценки уточнены (табл. 2).

Таблица 2. Твердый сток р. Дон (ст. Раздорская) и осаждение взвешенных веществ в дельте Дона при штормовых нагонах

Год	Число дней с нагоном	По [25]		Эта работа
		Сток взвешенных веществ, тыс. тонн	Осаждение взвешенных веществ в дельте Дона, тыс. тонн	
2015	37	65,2	129,6	15,04
2016	51	72,9	176,5	22,72
2017	36	356,8	143,5	18,54
2018	12	331,6	52,0	7,46
2019	35	496,6	99,5	10,61
2020	19	318,3	77,1	10,13

Наибольшее накопление взвешенного вещества отмечается для районов, расположенных в авандельте. Фактически взвешенные вещества, поднятые волнением со дна в период развития нагона, возвращается обратно, за исключением той части, которая оседает в пойменных районах и в отдельных рукавах дельты.

Число дней с нагонами в 2015–2020 гг. изменялось от 12 до 51 дня. В остальное время взвешенные вещества, переносимая речной водой, могла накапливаться в русловых районах дельты (в условиях маловодья при расходах воды 300–600 м³/с вода на пойму не выходит). Но периодические нагоны могут способствовать в дальнейшем выносу этого материала за пределы морского края дельты.

Выводы

1. В отсутствие нагонных явлений при расходах воды ниже среднемноголетних за современный маловодный период 2007–2020 гг. взвешенные вещества практически транзитом проходят через дельту, незначительно осаждаются в рукавах с небольшими скоростями потоков, но в основном осаждаются в авандельте за пределами морского края дельты.

2. При нагоне любой обеспеченности взвешенные вещества, накопленные в авандельте, под воздействием волнения насыщают воду и на этапе подъема ее уровня поступают в дельту, частично осаждаются в рукавах и в залитых водой пойменных районах. При снижении уровня нагона вещества, осевшие в пойменных районах дельты, в основном там и остаются, а вещества, накопленные в русловых районах, выносятся за морской край дельты. При этом из рукавов дельты могут быть вынесены и вещества, накопленные там между нагонами.

3. Для условий маловодья при наблюдаемой в период 2015–2020 гг. частоте нагонных явлений и при отсутствии паводков устьевая область Дона задерживает в среднем 20 % взвешенных веществ, поступающих со стоком р. Дон.

Благодарность Работа выполнена в рамках ГЗ ЮНЦ РАН: № государственной регистрации 122013100131-9, № государственной регистрации 122011900153-9, № государственной регистрации 122103100027-3 и научного проекта РФ № 22-27-00818 «Влияние длительного маловодья и изменений климата (на рубеже XX-XXI веков) на динамику взвешенного вещества в устьевой области Дона».

Список литературы

1. Dunn F.E., Darby S.E., Nicholls R.J., Cohen S., Zarfl C., Fekete B.M. Projections of Declining Fluvial Sediment Delivery to Major Deltas Worldwide in Response to Climate Change and Anthropogenic Stress // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14, no. 8. Article ID: 084034, 10 p. DOI: 10.1088/1748-9326/ab304e
2. Tessler Z.D., Vorosmarty C.J., Grossberg M., Gladkova I., Aizenman H., Syvitski J.P.M., Foufoula-Georgiou E. Profiling Risk and Sustainability in Coastal Deltas of the World // Science. 2015. Vol. 349, no. 6248. P. 638–643. DOI: 10.1126/science.aab3574

- 665 3. Syvitski J.P.M., Milliman J.D. Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the Delivery
666 of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean // *The Journal of Geology*. 2007. Vol. 115, no. 1. P. 1–19. DOI:
667 10.1086/509246
- 668 4. Giosan L., Syvitski J., Constantinescu S., Day J. Climate Change: Protect the World's Deltas // *Nature*.
669 2014. Vol. 516, no. 7529. P. 31–33. DOI: 10.1038/516031a
- 670 5. Day J.W., Agboola J., Chen Z., D'Elia C., Forbes D.L., Giosan L., Kemp P., Kuenzer C., Lane R.R.,
671 Ramachandran R., Syvitski J., Yañez-Arancibia A. Approaches to Defining Deltaic Sustainability in the
672 21st Century // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2016. Vol. 183, part B. P. 275–291. DOI:
673 10.1016/j.ecss.2016.06.018
- 674 6. Day J.W., Rybczyk J.M. Chapter 36 — Global Change Impacts on the Future of Coastal Systems:
675 Perverse Interactions Among Climate Change, Ecosystem Degradation, Energy Scarcity, and
676 Population // *Coasts and Estuaries* / E. Wolanski et al. Elsevier, 2019. P. 621–639. DOI:
677 10.1016/B978-0-12-814003-1.00036-8
- 678 7. Dieng H.B., Cazenave A., Meyssignac B., Ablain M. New Estimate of the Current Rate of Sea Level Rise
679 from a Sea Level Budget Approach // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, no. 8. P. 3744–
680 3751. DOI: 10.1002/2017GL073308
- 681 8. Wolters M.L., Kuenzer C. Vulnerability Assessments of Coastal River Deltas — Categorization and
682 Review // *Journal of Coastal Conservation*. 2015. Vol. 19, no 3. P. 345–368. DOI: 10.1007/s11852-
683 015-0396-6
- 684 9. Venevsky S., Berdnikov S., Sorokina V., Kulygin V., Kleshchenkov A., Sheverdyayev I., Arkhipova O.,
685 Dashkevich L., Gerasjuk V., Mesropyan K., Ukrainsky P., Yaitskaya N. Coastal Deltas of Big Rivers as
686 Synergetic Transformation Elements of the Earth System — (An Example of the Don River Delta) //
687 *New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences* / H. Chenchouni et al. Springer,
688 2022. P. 79–81. DOI: 10.1007/978-3-030-72543-3_18
- 689 10. Venevsky S., Berdnikov S., Day J.W., Sorokina V., Gong P., Kleshchenkov A., Kulygin V., Li W., Misirov
690 S., Sheverdyayev I., Yuan C., Giosan L. Don River Delta Hydrological and Geomorphological
691 Transformation Under Anthropogenic and Natural Factors: Century and Decadal Perspectives. 2023.
692 Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4474057/>. DOI: 10.2139/ssrn.4474057
- 693 11. Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В. Новое состояние гидрологического режима
694 Азовского моря в XXI веке // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 503,
695 № 1. С. 65–70. DOI: 10.31857/S2686739722030057
- 696 12. Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Kleshchenkov A.V., Tyutyunov Yu.V., Kulygin V.V., Kovaleva G.V.,
697 Bulysheva N.I. Marine Indicators of Climate Change in the Azov Sea Ecosystem // *Journal of Sea
698 Research*. 2023. Vol. 193. Article ID: 102373, 17 p. DOI: 10.1016/j.seares.2023.102373
- 699 13. Герасюк В.С., Бердников С.В. Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного
700 вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 5. С. 780–790.
701 DOI: 10.31857/S0030157421040055
- 702 14. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.:
703 ГЕОС, 1997. 413 с.
- 704 15. Матишов Г.Г., Московец А.Ю., Инжебейкин Ю.И., Ильичев В.Г., Кириллова Е.Э. Этапы
705 сооружения плотин, пересыпей, каналов и трансформация речного стока в авандельте Дона
706 (XVIII–XXI века) // *Наука Юга России*. 2019. Т. 15, № 4. С. 46–54. DOI: 10.7868/S25001640190406
- 707 16. Клещенко А.В., Герасюк В.С., Кулыгин В.В., Бердников С.В. Взвешенное вещество вод от
708 Цимлянского водохранилища до Таганрогского залива в период длительного маловодья
709 2006–2020 гг. // *Наука Юга России*. 2023. Т. 19, № 1. С. 29–39. DOI: 10.7868/25000640230104
- 710 17. The Place for HEC-RAS Modelers. 2020. URL: <https://www.kleinschmidtgroup.com/raspost/hecras-6-0-beta-is-now-available/> (дата обращения 17.11.2020)
-

- 712 18. Hicks F., Peacock T. Suitability of HEC-RAS for Flood Forecasting // Canadian Water Resources
713 Journal. 2005. Vol. 30, no. 2. P. 159–174. DOI: 10.4296/cwrj3002159
- 714 19. Pandey S., Rao A.D., Haldar R. Modeling of Coastal Inundation in Response to a Tropical Cyclone
715 Using a Coupled Hydraulic HEC-RAS and ADCIRC Model // Journal of Geophysical Research: Oceans.
716 2021. Vol. 126, no. 7. Article ID: e2020JC016810, 25 p. DOI: 10.1029/2020JC016810
- 717 20. Wang X., Guo Y., Ren J. The Coupling Effect of Flood Discharge and Storm Surge on Extreme Flood
718 Stages: A Case Study in the Pearl River Delta, South China // International Journal of Disaster Risk
719 Science. 2021. Vol. 12. P. 495–509. DOI: 10.1007/s13753-021-00355-5
- 720 21. Шевердяев И.В., Бердников С.В., Клещенков А.В. Применение программного комплекса HEC-
721 RAS для моделирования гидрологического режима дельты Дона // Экология. Экономика.
722 Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических
723 систем. 2017. Т. 1, № 2. С. 113–122. EDN: ZNARIL
- 724 22. Zhang W., Jia Q., Chen X. Numerical Simulation of Flow and Suspended Sediment Transport in the
725 Distributary Channel Networks // Journal of Applied Mathematics. 2014. Vol. 2014. Article ID:
726 948731, 9 p. DOI: 10.1155/2014/948731
- 727 23. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С.
728 455 с. EDN: YOETUN
- 729 24. Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клещенков А.В., Кулыгин В.В. Совместное применение
730 гидрологической модели HEC RAS и мультикомпарментальной балансовой модели для
731 описания переноса и трансформации взвешенных веществ в речной дельте: случай устьевой
732 области р. Дон. 2023. Доступно на PREPRINTS.RU: <https://preprints.ru/article/1073>. DOI:
733 10.24108/preprints-3112769
- 734 25. Лихтанская Н.В., Бердников С.В., Клещенков А.В. Твердый сток реки Дон и поступление
735 взвеси в дельту при нагонах: статистическое моделирование и сопоставление в период
736 маловодья // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23, № 5. ES4010. DOI:
737 10.2205/2023es000856
- 738 26. Ганичева Л.З. Закономерности седиментогенеза в Азовском море (взвеси и условия их
739 образования): Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Ростов-на-Дону: Южгеология, 1985. С. 27
740 с.
- 741 27. Клещенков А.В., Шевердяев И.В. Численное исследование условий осаждения взвеси в дельте
742 Дона при нагонах // Пятые виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен. Сборник
743 докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого
744 Юрия Борисовича Виноградова. С. 211-216. СПб.: Изд-во ВВМ, 2023.
- 745 28. Исаев А.В., Демаков Ю.П., Шарафутдинов Р.Н. Закономерности изменения
746 гранулометрического состава аллювиальных почв в процессе развития пойм рек // Вестник
747 Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология.
748 Природопользование. 2022. № 2(54). С. 80–93. DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.80
- 749 29. Лукашин В.Н., Ключиткин А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н. Малая седиментационная
750 ловушка МСЛ-110 // Океанология. 2011. Т. 51, № 4. С. 746–750. EDN: NXXEWJ
- 751 30. Шевердяев И.В., Клещенков А.В. Выявление вклада нагонных явлений в поступление
752 тяжелых металлов в дельту Дона // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С.
753 582–594. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-5-582-594

754 References

- 756 1. Dunn F.E., Darby S.E., Nicholls R.J., Cohen S., Zarfl C., Fekete B.M. Projections of Declining Fluvial
757 Sediment Delivery to Major Deltas Worldwide in Response to Climate Change and Anthropogenic

-
- 758 Stress // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14, no. 8. Article ID: 084034, 10 p. DOI:
759 10.1088/1748-9326/ab304e
- 760 2. Tessler Z.D., Vorosmarty C.J., Grossberg M., Gladkova I., Aizenman H., Syvitski J.P.M., Foufoula-
761 Georgiou E. Profiling Risk and Sustainability in Coastal Deltas of the World // Science. 2015. Vol. 349,
762 no. 6248. P. 638–643. DOI: 10.1126/science.aab3574
- 763 3. Syvitski J.P.M., Milliman J.D. Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the Delivery
764 of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean // The Journal of Geology. 2007. Vol. 115, no. 1. P. 1–19. DOI:
765 10.1086/509246
- 766 4. Giosan L., Syvitski J., Constantinescu S., Day J. Climate Change: Protect the World's Deltas // Nature.
767 2014. Vol. 516, no. 7529. P. 31–33. DOI: 10.1038/516031a
- 768 5. Day J.W., Agboola J., Chen Z., D'Elia C., Forbes D.L., Giosan L., Kemp P., Kuenzer C., Lane R.R.,
769 Ramachandran R., Syvitski J., Yañez-Arancibia A. Approaches to Defining Deltaic Sustainability in the
770 21st Century // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2016. Vol. 183, part B. P. 275–291. DOI:
771 10.1016/j.ecss.2016.06.018
- 772 6. Day J.W., Rybczyk J.M. Chapter 36 — Global Change Impacts on the Future of Coastal Systems:
773 Perverse Interactions Among Climate Change, Ecosystem Degradation, Energy Scarcity, and
774 Population // Coasts and Estuaries / E. Wolanski et al. Elsevier, 2019. P. 621–639. DOI:
775 10.1016/B978-0-12-814003-1.00036-8
- 776 7. Dieng H.B., Cazenave A., Meyssignac B., Ablain M. New Estimate of the Current Rate of Sea Level Rise
777 from a Sea Level Budget Approach // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, no. 8. P. 3744–
778 3751. DOI: 10.1002/2017GL073308
- 779 8. Wolters M.L., Kuenzer C. Vulnerability Assessments of Coastal River Deltas — Categorization and
780 Review // Journal of Coastal Conservation. 2015. Vol. 19, no 3. P. 345–368. DOI: 10.1007/s11852-
781 015-0396-6
- 782 9. Venevsky S., Berdnikov S., Sorokina V., Kulygin V., Kleshchenkov A., Sheverdyayev I., Arkhipova O.,
783 Dashkevich L., Gerasyuk V., Mesropyan K., Ukrainsky P., Yaitskaya N. Coastal Deltas of Big Rivers as
784 Synergetic Transformation Elements of the Earth System — (An Example of the Don River Delta) //
785 New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences / H. Chenchouni et al. Springer,
786 2022. P. 79–81. DOI: 10.1007/978-3-030-72543-3_18
- 787 10. Venevsky S., Berdnikov S., Day J.W., Sorokina V., Gong P., Kleshchenkov A., Kulygin V., Li W., Misirov
788 S., Sheverdyayev I., Yuan C., Giosan L. Don River Delta Hydrological and Geomorphological
789 Transformation Under Anthropogenic and Natural Factors: Century and Decadal Perspectives. 2023.
790 Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4474057/>. DOI: 10.2139/ssrn.4474057
- 791 11. Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V. A New State in the Hydrological Regime of the Sea of
792 Azov in the 21th Century // Doklady Earth Sciences. 2022. Vol. 503, no. 1. P. 123–128. DOI:
793 10.1134/S1028334X22030059
- 794 12. Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Kleshchenkov A.V., Tyutyunov Yu.V., Kulygin V.V., Kovaleva G.V.,
795 Bulysheva N.I. Marine Indicators of Climate Change in the Azov Sea Ecosystem // Journal of Sea
796 Research. 2023. Vol. 193. Article ID: 102373, 17 p. DOI: 10.1016/j.seares.2023.102373
- 797 13. Gerasyuk V.S., Berdnikov S.V. Experimental Estimation of the Deposition Rate of Water Suspended
798 Particulate Matter in the Mouth of the Don River and in Taganrog Bay // Oceanology. 2021. Vol. 61,
799 no. 5. P. 687–696. DOI: 10.1134/S0001437021040056
- 800 14. Mikhailov V.N. River mouths of Russia and adjacent countries: past, present and future. Moscow:
801 GEOS, 1997. 413 p. (in Russian)
- 802 15. Matishov G.G., Moskovets A.Yu., Inzhebeikin1 Yu.I., Il'ichev1 V.G., Kirillova E.E. Stages of Construction
803 of Dams, Embankments, and Canals and the Transformation of River Runoff in the Front-Delta of the
-

-
- 804 Don (the 18th–21st Centuries) // Science of the South of Russia. 2019. Vol. 15, no. 4. P. 46–54. DOI:
805 10.7868/S25001640190406 (in Russian)
- 806 16. Kleshchenkov A.V., Gerasyuk V.S., Kulygin V.V., Berdnikov S.V. Suspended Matter of the Water from
807 the Tsimlyansk Reservoir to the Taganrog Bay in the Period of Long Low Water in 2006–2020 //
808 Science of the South of Russia. 2023. Vol. 19, no. 1. P. 29–39. DOI: 10.7868/25000640230104 (in
809 Russian)
- 810 17. The Place for HEC-RAS Modelers. 2020. URL: [https://www.kleinschmidtgroup.com/raspost/hec-](https://www.kleinschmidtgroup.com/raspost/hec-ras-6-0-beta-is-now-available/)
811 [ras-6-0-beta-is-now-available/](https://www.kleinschmidtgroup.com/raspost/hec-ras-6-0-beta-is-now-available/) (accessed 17 November 2020)
- 812 18. Hicks F., Peacock T. Suitability of HEC-RAS for Flood Forecasting // Canadian Water Resources
813 Journal. 2005. Vol. 30, no. 2. P. 159–174. DOI: 10.4296/cwrj3002159
- 814 19. Pandey S., Rao A.D., Haldar R. Modeling of Coastal Inundation in Response to a Tropical Cyclone
815 Using a Coupled Hydraulic HEC-RAS and ADCIRC Model // Journal of Geophysical Research: Oceans.
816 2021. Vol. 126, no. 7. Article ID: e2020JC016810, 25 p. DOI: 10.1029/2020JC016810
- 817 20. Wang X., Guo Y., Ren J. The Coupling Effect of Flood Discharge and Storm Surge on Extreme Flood
818 Stages: A Case Study in the Pearl River Delta, South China // International Journal of Disaster Risk
819 Science. 2021. Vol. 12. P. 495–509. DOI: 10.1007/s13753-021-00355-5
- 820 21. Sheverdyayev I.V., Berdnikov S.V., Kleshchenkov A.V. HEC-RAS Using for Hydrologic Regime Modeling
821 on the Don's Delta // Ecology. Economy. Series: Informatics. System analysis and mathematical
822 modeling of ecological and economic systems. 2017. Vol. 1, no. 2. P. 113–122. EDN: ZNARIL (in
823 Russian)
- 824 22. Zhang W., Jia Q., Chen X. Numerical Simulation of Flow and Suspended Sediment Transport in the
825 Distributary Channel Networks // Journal of Applied Mathematics. 2014. Vol. 2014. Article ID:
826 948731, 9 p. DOI: 10.1155/2014/948731
- 827 23. Baryshnikov N.B., Popov I.V. Dynamics of Riverbed Processes. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. P.
828 455 p. EDN: YOETUN (in Russian)
- 829 24. Berdnikov S.V., Sheverdyayev I.V., Kleshchenkov A.V., Kulygin V.V. Combined Application of the
830 Hydrological Model HEC RAS and a Multicompartmental Balance Model to Describe the Transport
831 and Transformation of Suspended Solids in a River Delta: A Case Study of the Don River Estuary Area.
832 2023. Available at PREPRINTS.RU: <https://preprints.ru/article/1073>. DOI: 10.24108/preprints-
833 3112769 (in Russian)
- 834 25. Likhtanskaya N., Berdnikov S., Kleshchenkov A. Solid Runoff of the Don River and Suspended Matter
835 Flow into the Delta During Surges: Statistical Modeling and Comparison in the Low Water Period //
836 Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Vol. 23, no. 5. ES4010. DOI: 10.2205/2023es000856 (in
837 Russian)
- 838 26. Ganicheva L.Z. Patterns of Sedimentogenesis in the Sea of Azov (Suspensions and Conditions of their
839 Formation): Abstract of Thesis ... PhD in Geological and Mineralogical Sciences. Rostov-on-Don:
840 SouthGeology, 1985. P. 27 p. (in Russian)
- 841 27. Kleshchenkov A.V., Sheverdyayev I.V. Numerical Study of the Conditions for Sedimentation of
842 Suspended Matter in the Don Delta during Surges // Fifth Vinogradov Readings. Hydrology in an Era
843 of Change. Collection of Reports of the International Scientific Conference in Memory of the
844 Outstanding Russian Scientist Yuri Borisovich Vinogradov. P. 211–216. St. Petersburg: VVM
845 Publishing House, 2023. (in Russian)
- 846 28. Isaev A.V., Demakov Yu.P., Sharafutdinov R.N. Patterns of Changes in the Granulometric Composition
847 of Alluvial Soils During the Development of River Floodplains // Bulletin of the Volga State
848 Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2022. No. 2(54). P. 80–93.
849 DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.80 (in Russian)
-

-
- 850 29. Lukashin V.N., Klyuvitkin A.A., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N. The MSL-110 small sediment trap //
851 Oceanology. 2011. Vol. 51, no. 4. P. 699-703. DOI: 10.1134/S0001437011040126
852 30. Sheverdyaev I.V., Kleschenkov A.V. Revealing the Surge Phenomena Contribution of the Heavy
853 Metals Inflow to the River Don Delta // Physical Oceanography. 2020. Vol. 27, no. 5. P. 535–546. DOI:
854 10.22449/1573-160X-2020-5-535-546
855

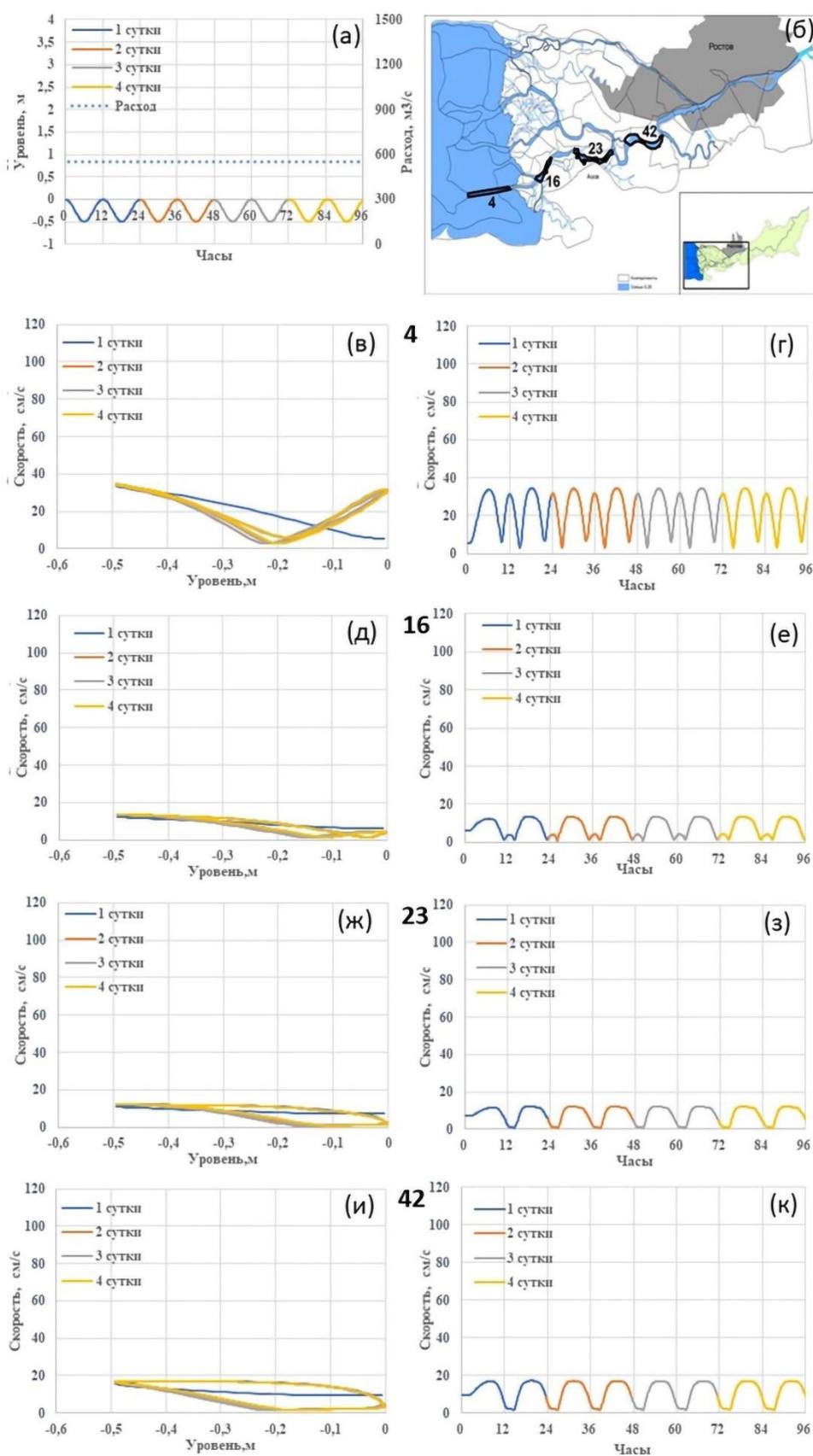


Рисунок П.1. Сценарий «без нагона» — БН-2. Колебание уровня воды на морском крае дельты с амплитудой 0,5 м и расход воды в станции Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах, динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах

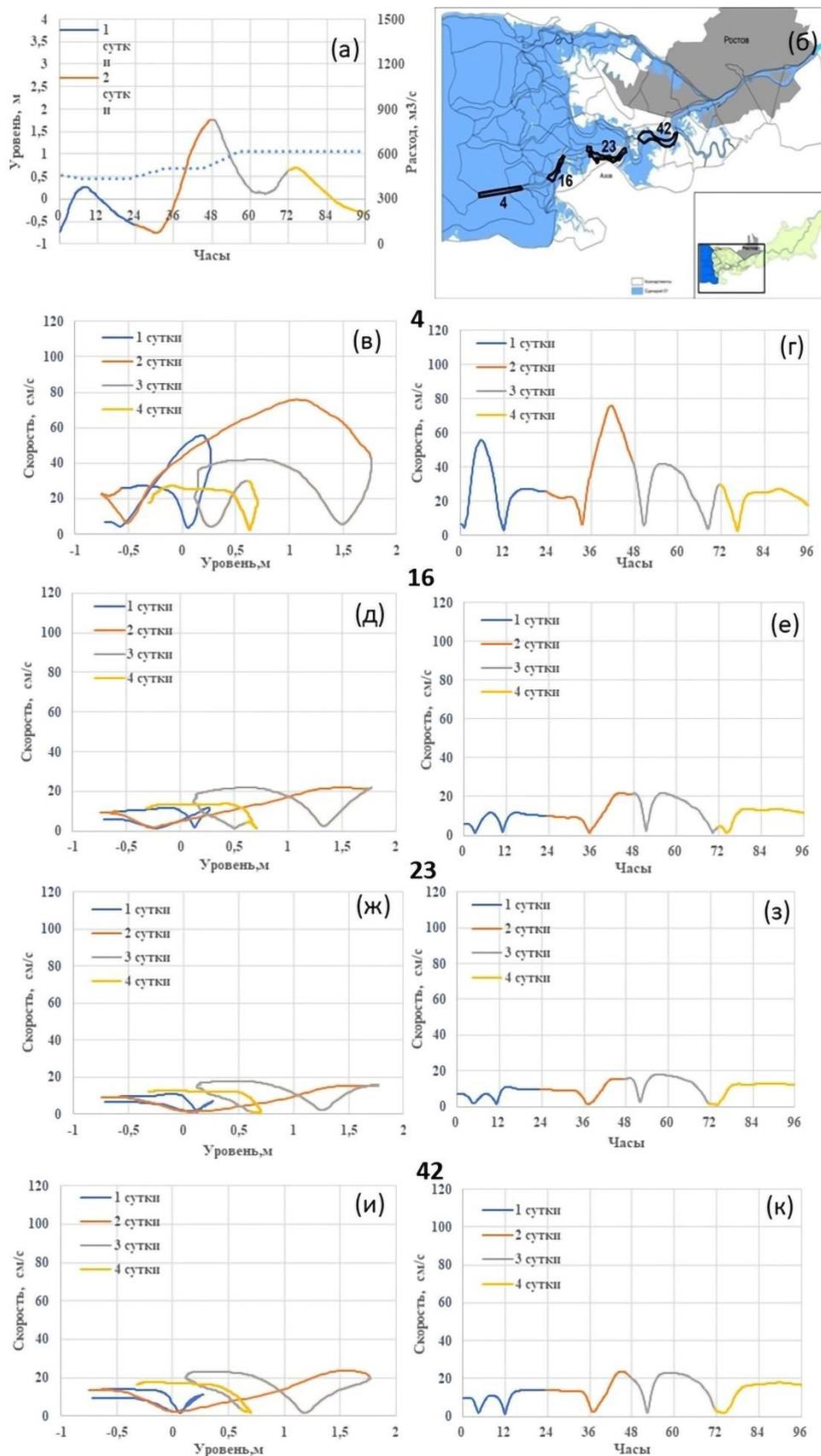


Рисунок П.2. Сценарий Н-1. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станице Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах, динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах

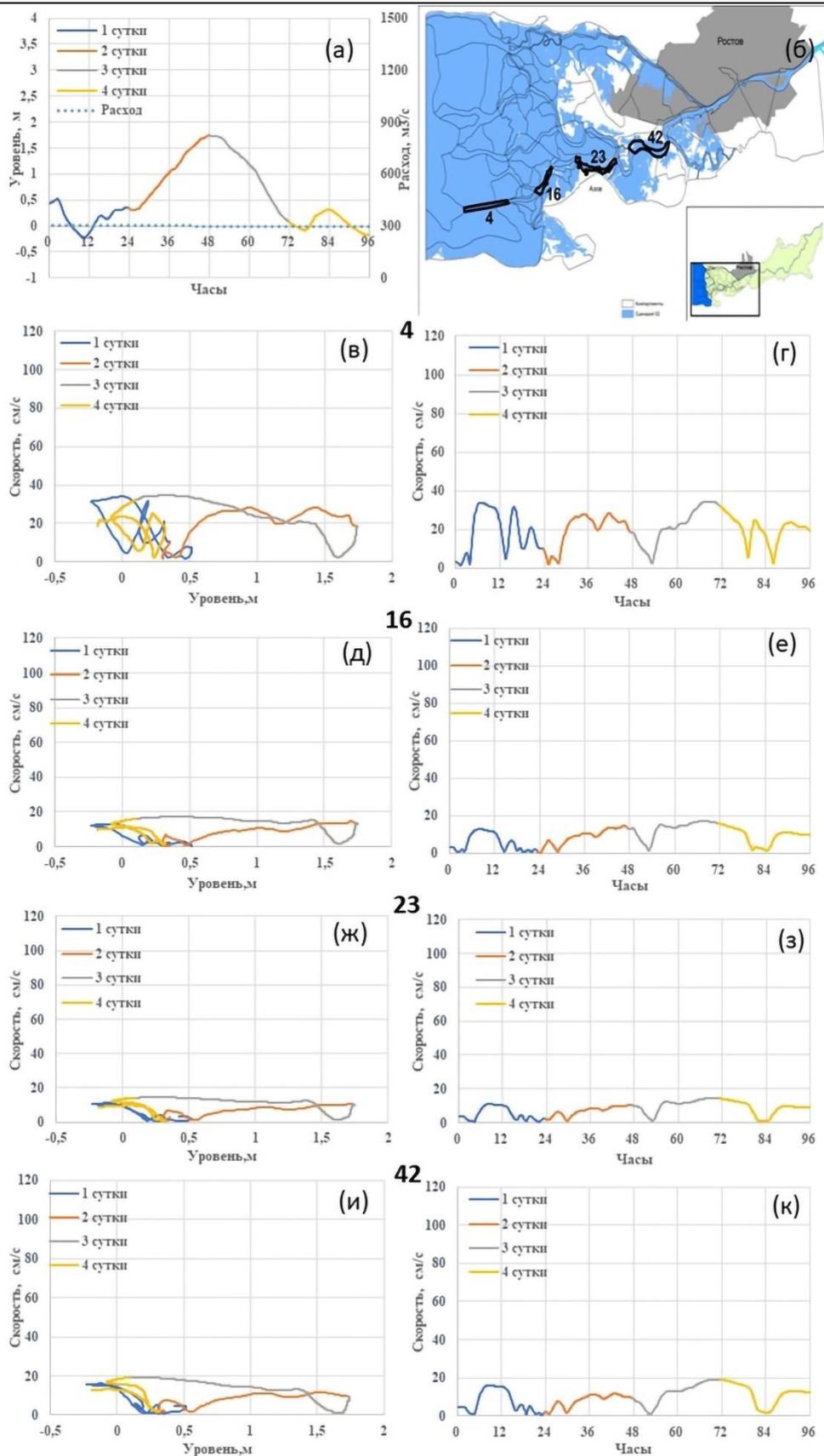


Рисунок П.3. Сценарий Н-2. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станции Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах, динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах

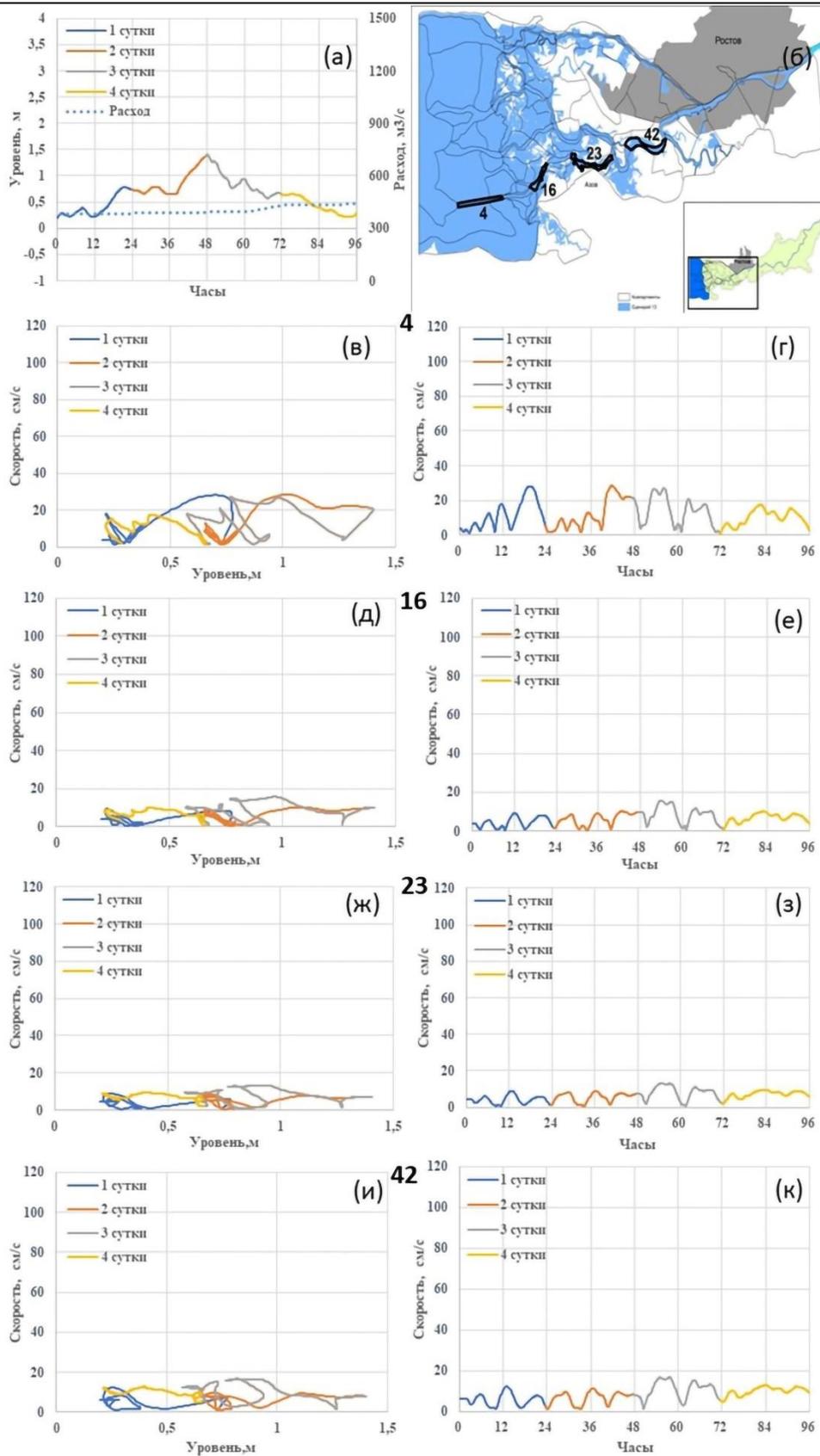


Рисунок П.4. Сценарий Н-13. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станции Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (и) гидрологических районах, динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (к) гидрологических районах

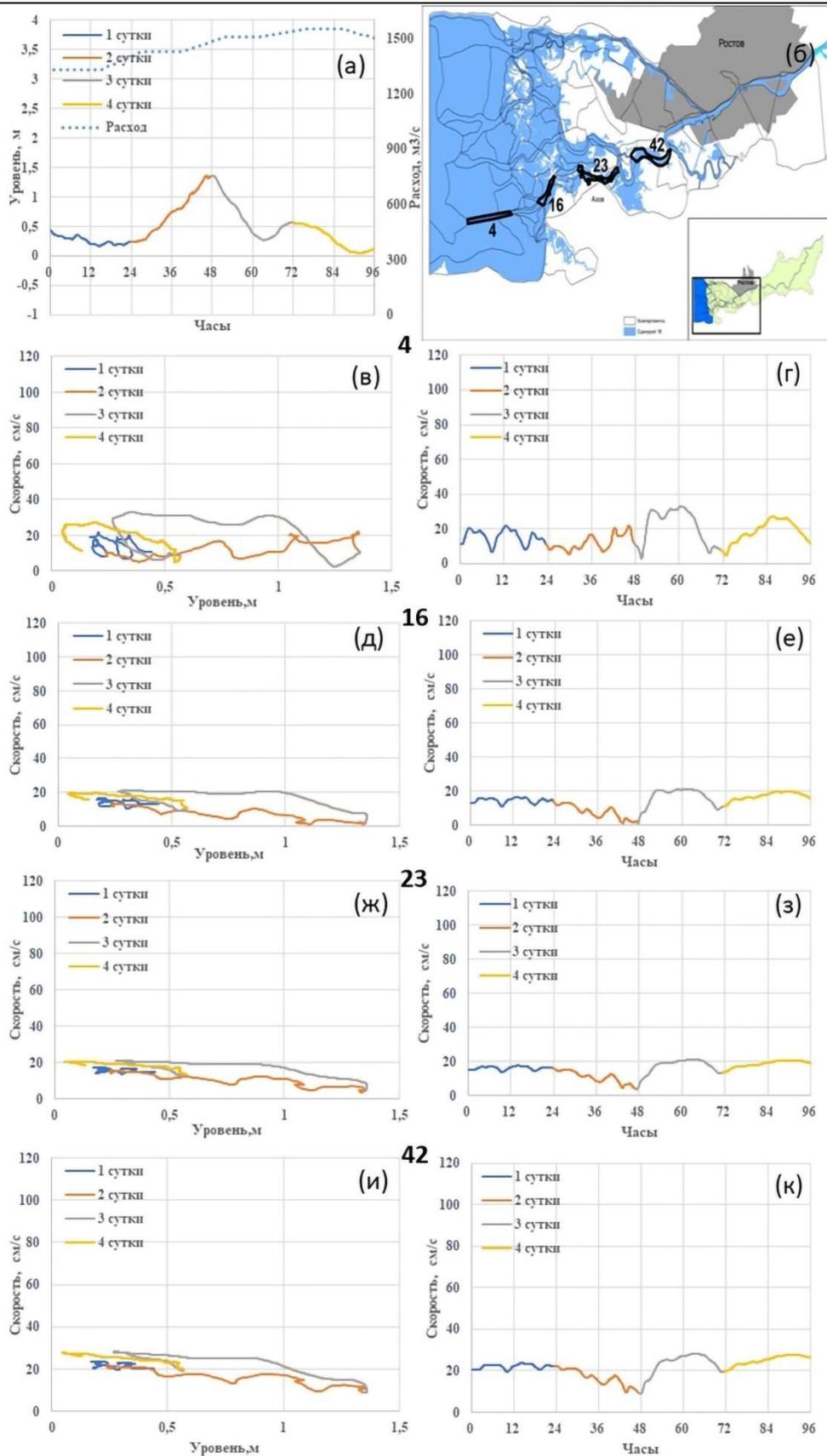


Рисунок П.5. Сценарий Н-16. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станице Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах, динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах

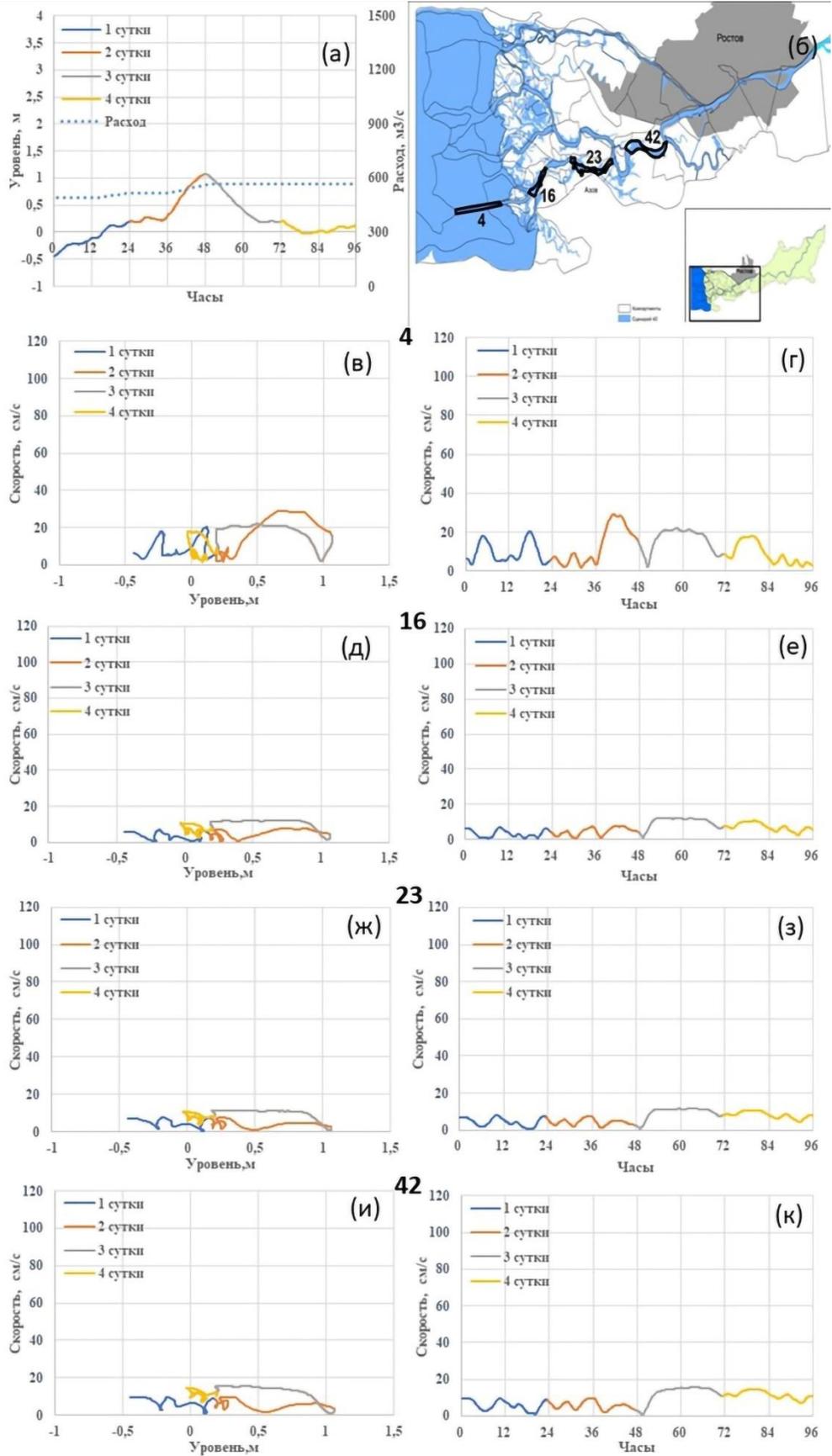


Рисунок П.6. Сценарий Н-40. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станице Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах, динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах

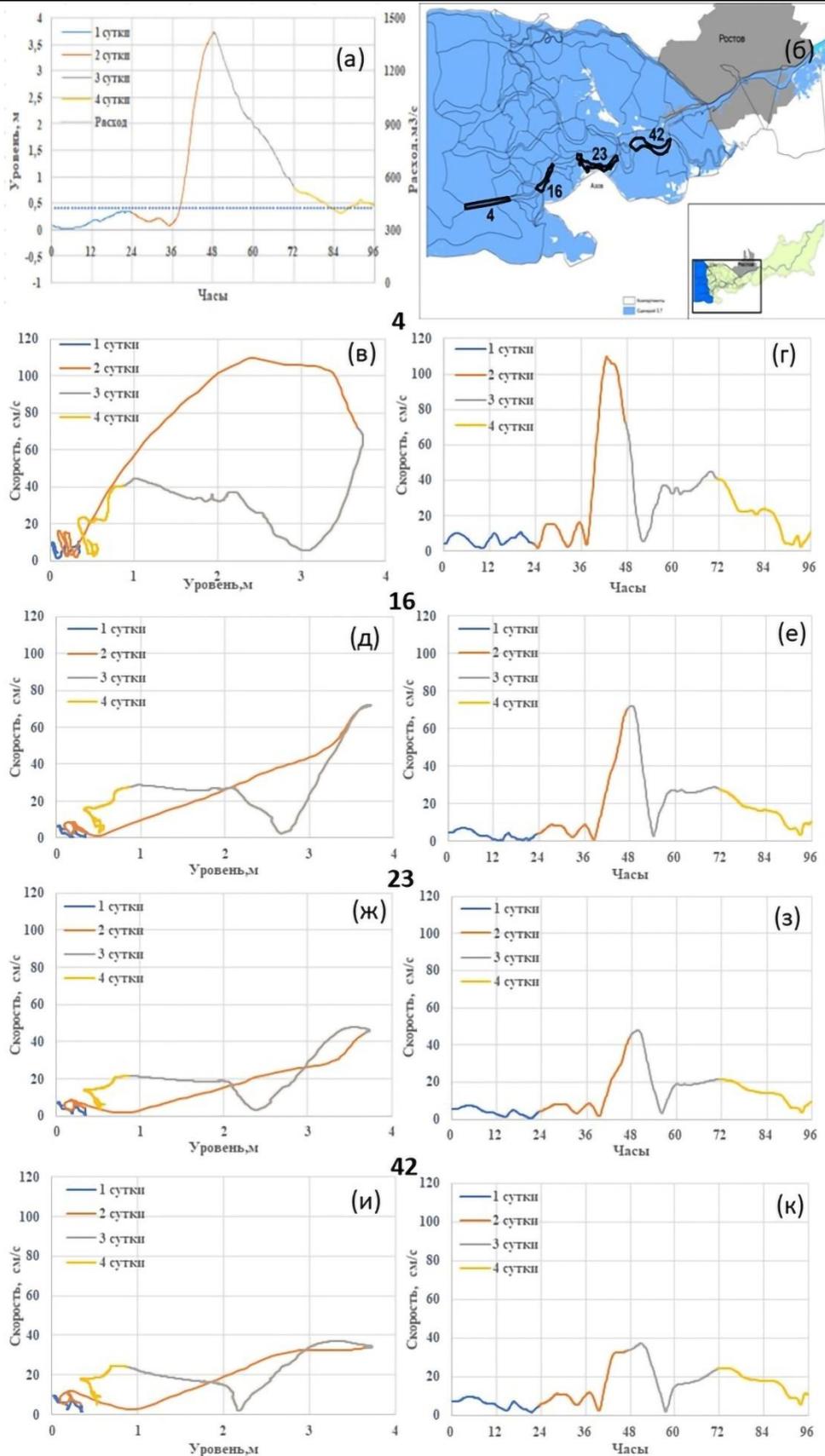


Рисунок П.7. Сценарий НЭ-3,7. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станции Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах, динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах

864

Таблица П.1. Динамика взвешенного вещества в устьевой области Дона за период нагона, тыс. тонн

Статья (приход, расход) расхода воды	Без нагона, колебание уровня воды от минус 50 см до 0 см		Параметры нагонов				
	БН-2	Н-40	Н-16	Н-13	Н-2	Н-1	НЭ-3,7
Номер сценария	БН-2	Н-40	Н-16	Н-13	Н-2	Н-1	НЭ-3,7
Максимальное изменение уровня воды при нагоне, см	50	106	136	140	175	177	370
Средний расход воды, м ³ /с	550	540	1450	540	300	540	430

865