Russian Journal of Earth Sciences

Моделирование переноса и накопления взвешенных веществ в условиях маловодья и нагонных явлений в устьевой области р. Дон

С. В. Бердников[1], И. В. Шевердяев[1], А. В. Клещенков[1], В. В. Кулыгин[1], Н. В. Лихтанская[*,1]

[1]Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия
* **Контакт:** Наталия Викторовна Лихтанская, natalikht@gmail.com

Предложен подход к совместному применению модели, реализованной в программном комплексе HEC-RAS, и балансовой модели для описания переноса и трансформации взвешенных веществ в речной дельте. В устьевой области реки выделяются гидрологические районы: русловые районы, пойменные районы, затапливаемые при высоких паводках и штормовых нагонах со стороны моря, и районы авандельты. Для гидрологических районов строится динамическая модель баланса воды и веществ, переносимых водным потоком. Вводится параметризация процессов осаждения взвешенных веществ и их взмучивания 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 делается на оценке влияния морских штормовых нагонов на перенос взвешенных веществ в речную дельту и их осаждение. Для описания потоков воды между районами, скоростей ее движения, динамики ее уровня и процессов затопления поймы применяется детальная модель на базе программного комплекса HEC-RAS, адаптированная к условиям устьевой области р. Дон. Выполнены расчеты переноса и накопления взвешенных веществ в устьевой области Дона для двух вариантов гидрологических условий – с нагоном воды со стороны моря и без него. Рассмотрена пространственно-временная изменчивость концентрации и гранулометрического состава взвешенных наносов в зависимости от гидрологических условий. Показано, что в отсутствие нагонных явлений при небольших расходах воды взвешенные вещества в основном осаждаются в авандельте за пределами морского края дельты, а в период нагона насыщают воду и на этапе подъема ее уровня поступают в дельту, частично осаждаясь в рукавах и в пойменных районах. При этом на этапе спада уровня воды из русловых районов они выносятся за морской край дельты, а в пойменных в основном остаются. Для условий маловодья при наблюдаемой частоте нагонных явлений и при отсутствии паводков устьевая область Дона задерживает в среднем 20% взвешенных веществ, поступающих со стоком р. Дон.

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

Цитирование: Бердников, С. В., И. В. Шевердяев, А. В. Клещенков, В. В. Кулыгин и Н. В. Лихтанская Моделирование переноса и накопления взвешенных веществ в условиях маловодья и нагонных явлений в устьевой области р. Дон // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES4013. — DOI: 10.2205/2024es000926 — EDN: NYRZMC

https://elibrary.ru/nyrzmc

Получено: 12 марта 2024 г.
Принято: 30 июля 2024 г.
Опубликовано: 25 Декабря 2024 г.

© 2024. Коллектив авторов.

1. Введение

Дельты рек мира являются важными географическими районами, включающими в себя всего 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. Вместе с тем дельты сталкиваются с различными угрозами [*Day et al.*, 2016; *Day and Rybczyk*, 2019; *Giosan et al.*, 2014; *Syvitski and Milliman*, 2007], которые снижают ценность этих услуг. Глобальное эвстатическое повышение уровня моря, превышающее 3–4 мм/год [*Dieng et al.*, 2017], рассматривается как реальная угроза для дельт мира [*Day and Rybczyk*, 2019; *Giosan et al.*, 2014]. 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 and Kuenzer*, 2015].

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 [*Venevsky et al.*, 2023; 2022]. 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 заиление 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 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 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 и Бердников*, 2021]. Последняя все чаще смещается вглубь дельты.

Целью настоящей работы является описание подхода к моделированию влияния штормовых нагонов на перенос и накопление взвешенных веществ в дельте Дона в условиях недостаточной водности речного стока (период маловодья).

2. Материалы и методы исследования

2.1. Регион исследования

Регионом исследования является часть устьевой области р. Дон, которая начинается от станицы Раздорской (здесь находится гидрологический стоковый 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 [*Михайлов*, 1997], 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°11′–39°43′ в. д. и 47°05′–47°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. [*Матишов и др.*, 2019]).

2.2. 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-четырех суток. В остальные периоды времени, более длительные, территория дельты не затапливается. 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 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).

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 Южного научного центра Российской академии наук (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. [*Клещенков и др.*, 2023].

2.3. 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 [*Hicks and Peacock*, 2005; *Kleinschmidt Associates*, 2020]. Исследование с его помощью течения воды в дельтах в условиях сгонно-нагонных и приливных колебаний уровня моря в последнее время также получает распространение [*Pandey et al.*, 2021; *Wang et al.*, 2021]. Здесь мы опираемся на опыт оценки затопления дельты Дона в период экстремального нагона в сентябре 2014 г. [*Шевердяев и др.*, 2017].

Расчетная область делится на 101 095 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.

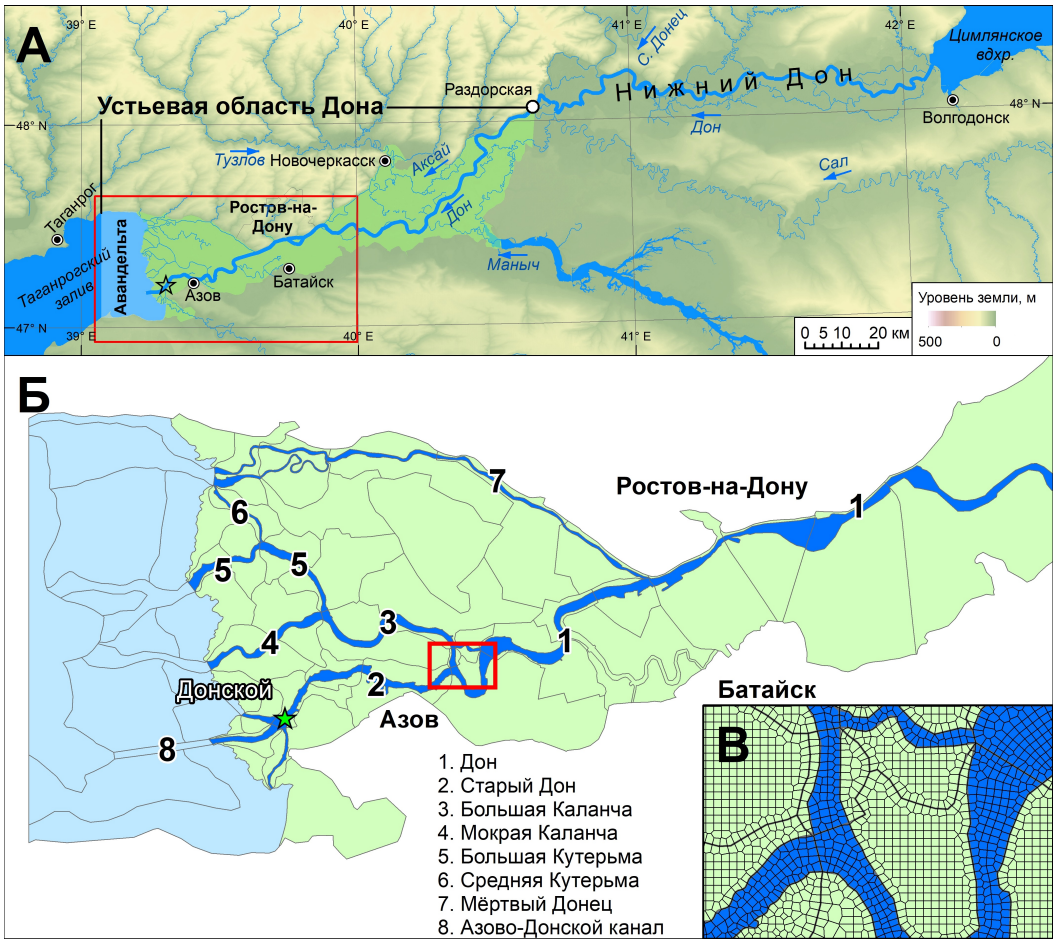

Рис. 1. Регион исследования: гидрографическая сеть (А) (звездочкой отмечен пункт наблюдения за уровнем воды), гидрологическое районирование устьевой области Дона (Б) и пример сеточного разбиения для моделирования гидрологических условий с применением программного комплекса HEC-RAS (В).

2.4. 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):

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

где $V_i(t+dt)$, $V_i(t)$ – объем воды в i-м районе в моменты времени $t+dt$ и t соответственно, тыс. м^3; $Q_{i,j}(t,t+dt)$ – объем воды, поступивший в i-й район из j-того района в период времени $(t,t+dt)$, тыс. м^3 (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. м^3; $Q_{in,i}(t,t+dt)$ – объем воды, поступивший в i-й район из внешних источников в период времени $(t,t+dt)$, тыс. м^3.

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 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):

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

где $b_i(t+dt)$, $b_i(t)$ – средняя по объему концентрация взвешенного вещества в i-м районе в моменты времени $t+dt$ и t соответственно, мг/дм^3; $b_{in,i}(t)$ – концентрация взвешенного вещества в водных потоках, поступающих извне, мг/дм^3; 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. м^2; α^0 – параметр, отвечающий за интенсивность взмучивания; $b_i^*(t,t+dt)$ – концентрация взвешенного вещества, обусловленная транспортирующей способностью потока, средняя в интервале $(t,t+dt)$, мг/дм^3.

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

$$b^* = K\left[\frac{u^3}{gR\omega}\right]^m, \tag{3}$$

где K, m – эмпирические параметры, $K = 5{,}0$ г/м^3, $m = 0{,}92$; u – средняя (по вертикали) скорость течения, м/с; g – ускорение свободного падения, $g = 9{,}81$ м/с^2; R – гидравлический радиус, м. Нижние индексы принадлежности к определенному району опущены.

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

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

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

$$\omega = \frac{\left(\dfrac{2g(\rho_1-\rho)k}{1{,}75\rho}\right)^{1/2}}{\varphi}, \tag{4}$$

где ρ_1 – плотность частиц, $\rho_1 = 2650$ кг/м^3; ρ – плотность воды, $\rho = 1000$ кг/м^3; φ – параметр турбулентного поведения наносов в потоке, который отражает особенности осаждения частиц в реальных условиях водоема.

Взвесь делится 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.

3. Результаты исследования и их обсуждение

3.1. Калибровка параметров и верификация модели DonDeltaHECRAS

Проверка гидрологического блока модели проводилась путем сравнения результатов расчетов 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 калибровки параметров модели и 22–23 сентября 2014 г. для контрольной проверки (распределение точек измерений в дельте Дона представлено на рис. 2А).

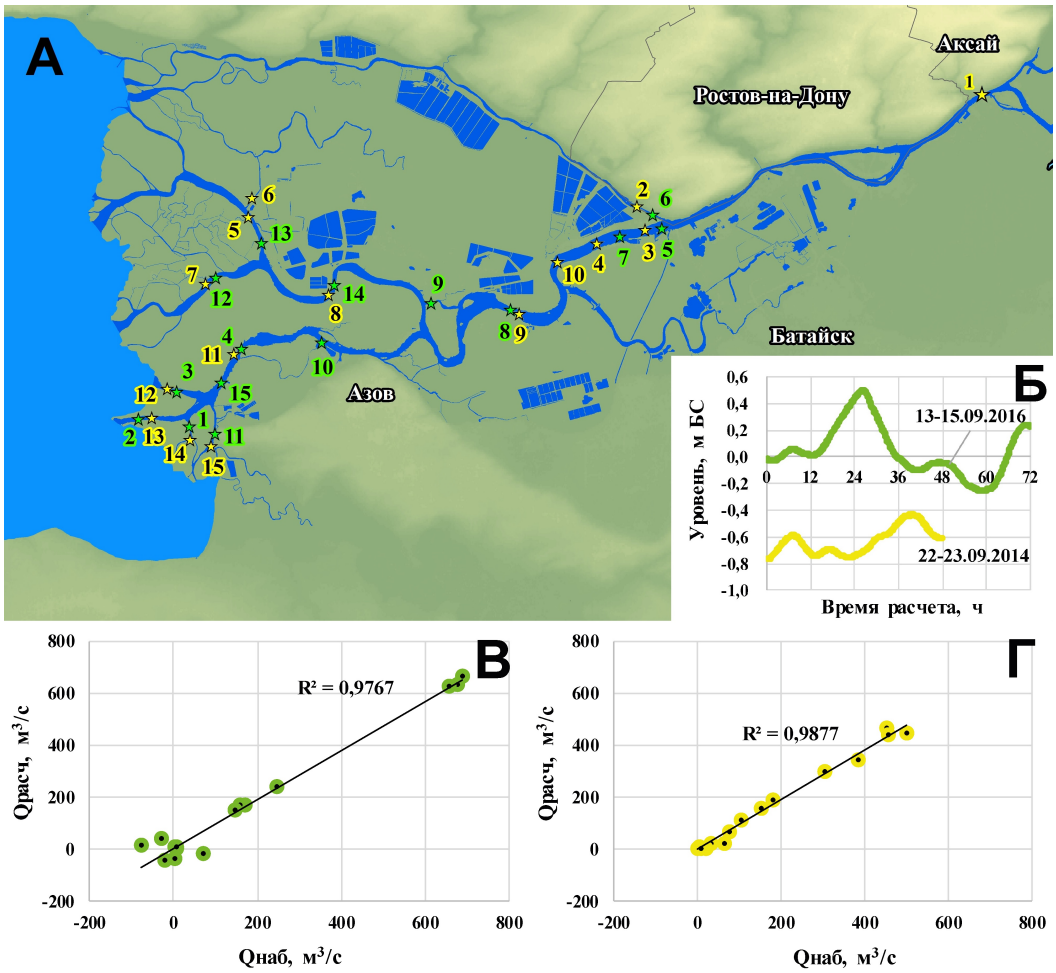

Рис. 2. Результаты верификации модели устьевой области Дона по данным 13–15 сентября 2016 г. (зеленый цвет) и 22–23 сентября 2014 г. (желтый цвет): распределение точек измерений в дельте Дона (А); ход уровня воды на уровнемере на причале «Донской» (Б); сопоставление результатов расчета расходов воды 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).

В период 13–15 сентября 2016 г. расход воды в ст. Раздорской в среднем был равен 390 м^3/с, в период 22–23 сентября 2014 г. – 430 м^3/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 м^3/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, который расположен примерно в 20 км от

границы расчетной области в Таганрогском заливе со сдвигом по времени 20 минут назад и отмечен звездочкой на рис. 1А (ход уровня воды на уровнемере представлен на рис. 2Б).

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

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

Результаты проверки [см. табл. ДМ3 и ДМ4, *Бердников и др.*, 2023] показывают, что модель дельты Дона воспроизводит особенности распределения воды по основным рукавам, несмотря на некоторые 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.

3.2. Математическое моделирование гидрологических условий устьевой области Дона при различных расходах воды и нагонных колебаниях ее уровня в Таганрогском заливе

В период 2015–2020 гг. в дельте Дона наблюдалось 50 нагонов с максимальным подъемом уровня воды от 1,0 до 1,77 м относительно среднемноголетнего положения [*Лихтанская и др.*, 2023]. Из этого перечня выбрано 5 нагонов, имеющих разную обеспеченность и разный расход воды в ст. Раздорская (табл. 1), и один экстремальный нагон 23–25 сентября 2014 г. с максимальным превышением уровня воды 3,7 м. Кроме этого рассмотрены: характерные для устьевой области гидрологические условия, когда явный нагон отсутствует, но на морском крае дельты наблюдается периодическое изменение уровня воды до минус 0,5 м относительно среднемноголетнего значения с периодом 12 часов (сценарий БН-2), а также гидрологические условия постоянного расхода воды при полном отсутствии изменения уровня воды на левой границе расчетной области – в Таганрогском заливе (сценарий БН-1). Для каждого нагона выбраны дата и время максимального подъема уровня воды. Расчеты по модели DeltaDonHEC-RAS проводились для четырех суток (двух суток до наступления максимального уровня воды и двух – после). Краткие характеристики рассмотренных нагонов воды со стороны Таганрогского залива приведены ниже.

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. А2). Расход воды в Дону в эти даты сначала снижался с 514 м^3/с (19 марта) до 432 м^3/с (21 марта), а затем возрастал до 631 м^3/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.

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. А3). Расход воды в Дону в эти даты был стабильно очень низким – около 300 м^3/с. Рост

Таблица 1. Характеристики расчетных сценариев нагонов в дельте Дона

№ пп	Условное обозначение сценария	Максимальный подъем уровня воды от среднемноголетнего значения, м	Дата начала нагона	Дата окончания нагона	Средний расход воды в ст. Раздорской за период нагона, м^3/с	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	03/04/2016	407	54	70
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

Примечание: 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 [*Ганичева*, 1985] 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 [*Лихтанская и др.*, 2023].

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.

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. А4). Расход воды в ст. Раздорской в целом пониженный (около 400 м^3/с), но с устойчивым ростом от 383 до 440 м^3/с. На протяжении всего сценария уровень воды был выше его среднемноголетнего положения, максимальный нагонный уровень воды 1,4 м был достигнут примерно за 10 часов ростом на 0,7 м, затем примерно за то же время уровень воды упал до 0,7 м и постепенно падал до 0,2 м, сменившись в конце сценария скачком уровня воды на 0,4 м. В целом можно отметить, что в этом сценарии имитируется ветровой всплеск уровня воды на 0,7 м на фоне повышенного уровня воды и меженного расхода воды в Дону.

Сценарий Н-16. Расчёт проводился для периода между 10:00 20 апреля и 10:00 25 апреля 2018 г. с максимальным подъемом уровня воды на 1,36 м в 10:00 22 апреля (рис. А5). Это сценарий небольшого ветрового нагона на фоне половодного расхода воды в Дону – рост от 1330 до 1550 м^3/с. Подъем уровня воды начался с отметки 0,4 м относительно его среднемноголетнего положения. После небольшого снижения на 0,2 м в течение суток наблюдался нагонный рост уровня воды примерно на 1,2 м.

Сценарий Н-40. Расчёт проводился для периода между 0:00 24 февраля и 0:00 1 марта 2019 г. с максимальным подъемом уровня воды на 1,06 м в 0:00 26 февраля (рис. А6). Это самый слабый нагон из рассмотренных, развивавшийся на фоне среднего расхода воды в Дону – от 491 до 565 м^3/с. По форме нагон близок к сценарию Н-13. Такие нагоны на фоне среднего расхода воды в Дону наиболее часты.

Сценарий НЭ-3,7. Это наиболее экстремальный нагон за последние 100 лет наблюдений. Расчёт проводился для периода между 17:20 22 сентября и 17:20 27 сентября

2014 г. с максимальным подъемом уровня воды на 3,70 м в 17:20 24 сентября (рис. А7). Рост уровня воды составил порядка 3,5 м за 12 часов на фоне стабильного меженного расхода воды в Дону – 430 м^3/с. За пиком подъема уровня воды наблюдалось его падение в течение полутора дней.

Для оценки полученных результатов моделирования гидрологических условий при нагонах разной обеспеченности выделено три русловых гидрологических района (16, 23 и 42), расположенных на разном расстоянии от фронта дельты, и один (4), являющийся продолжением Азово-Донского судоходного канала в авандельте.

Для русловых районов в период действия нагонов с превышением уровня воды в диапазоне от 1,0 до 3,7 м (рисунки А2–А7) наблюдается сначала замедление скоростей потоков, направленных в сторону залива, а затем потоки разворачиваются в обратную сторону и их скорость растет вплоть до достижения пика уровня воды, который наступает раньше пика скорости потока. Затем скорости потоков быстро падают до нуля, потоки разворачиваются в направлении от реки к морю, и восстанавливаются обычные значения их скоростей. Амплитуды скоростей обратных потоков при удалении от морского края дельты уменьшаются. Потоки в русловых районах вдали от моря под воздействием нагонов только замедляются (без изменения направления). Чем интенсивней нагон (выше максимальный уровень) и ниже речной расход, тем дальше от морского края дельты формируются обратные течения [*Клещенков и Шевердяев*, 2023].

Важно отметить, что при падении уровня воды после достижения 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. А7). Однако, при расходе воды в Дону близком к значениям, характерным для половодья (рис. А5), и не очень высоком уровне нагона, эта особенность нарушается – практически всегда скорость потока при уменьшении уровня воды выше (сравните рисунки А5–А6 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).

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.

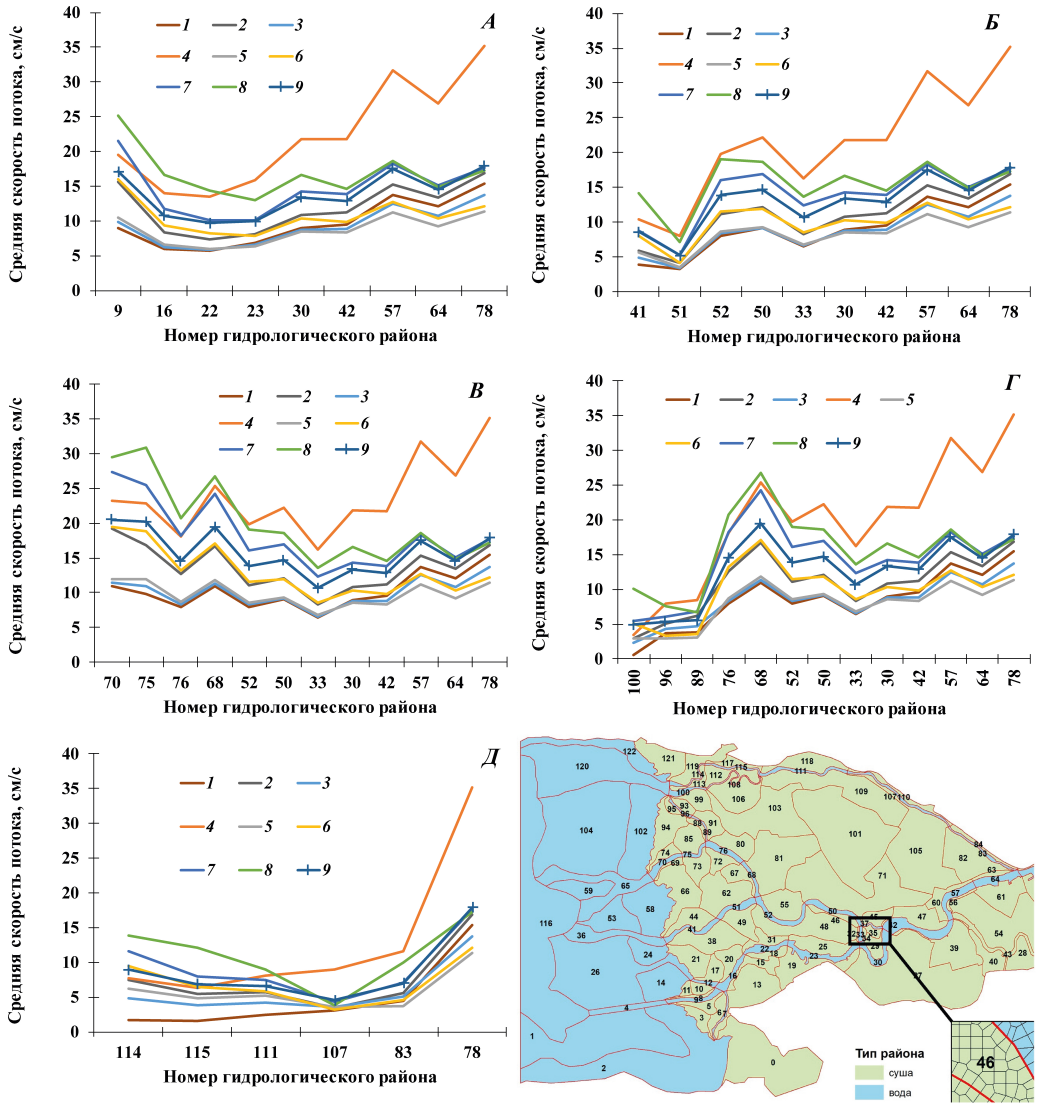

Рис. 3. Распределение средних скоростей потоков по рукавам дельты: «Дон – Старый Дон – АДСК» (А), «Дон – Большая Каланча – Мокрая Каланча» (Б), «Дон – Большая Каланча – Большая Кутерьма – Кутерьма» (В), «Дон – Большая Каланча – Большая Кутерьма – Средняя Кутерьма» (Г), «Дон – Мертвый Донец» (Д). 1 – 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.

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 (рисунки A2–A7). Гидрологические условия сценария Н-16 отличаются большими расходами воды (до 1550 м^3/с), поэтому здесь скорости потоков в вершине дельты существенно выше по сравнению с тем, когда расходы воды находятся на уровне 300–500 м^3/с.

Все это в совокупности влияет на процессы переноса взвешенных частиц.

3.3. 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 [*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. 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 [*Исаев и др.*, 2022]: 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.

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

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

Похожая ситуация характерна и для второго сценария без явно выраженного нагона (сценарий БН-2), но в отдельных районах дельты, примыкающих к морскому краю, концентрация взвешенного вещества возрастает до 30 мг/л (рис. 4). Это связано

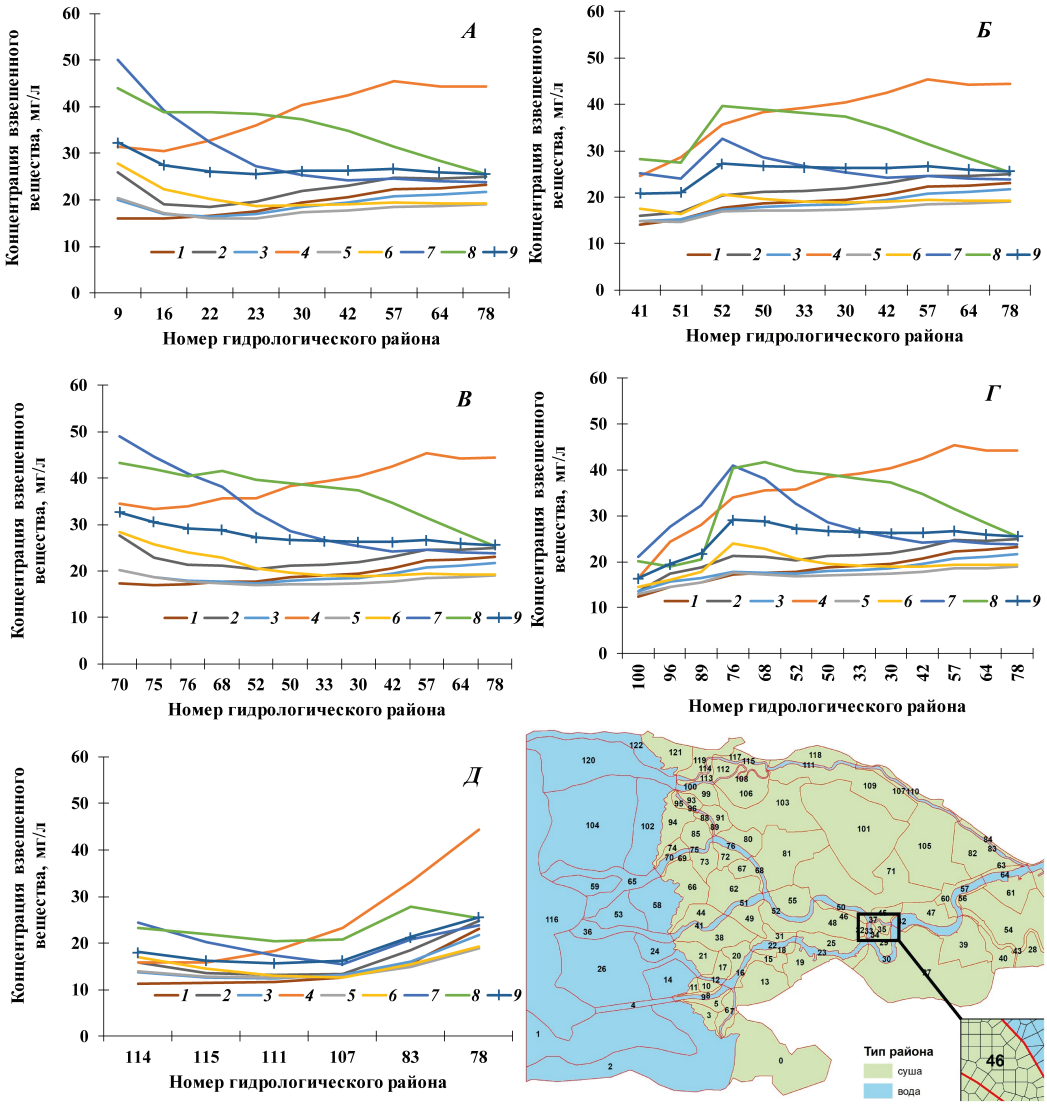

Рис. 4. Распределение средней концентрации взвешенного вещества по рукавам дельты: «Дон – Старый Дон – АДСК» (А), «Дон – Большая Каланча – Мокрая Каланча» (Б), «Дон – Большая Каланча – Большая Кутерьма – Кутерьма» (В), «Дон – Большая Каланча – Большая Кутерьма – Средняя Кутерьма» (Г), «Дон – Мертвый 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.

с суточными колебательными движениями уровня воды и увеличением скоростей потоков.

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

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

В авандельте в условиях штормового нагона происходит волновое взмучивание донных отложений, и в дельту поступают водные потоки, насыщенные взвешенным материалом (табл. 1). Концентрация взвешенного вещества в воде существенно меня-

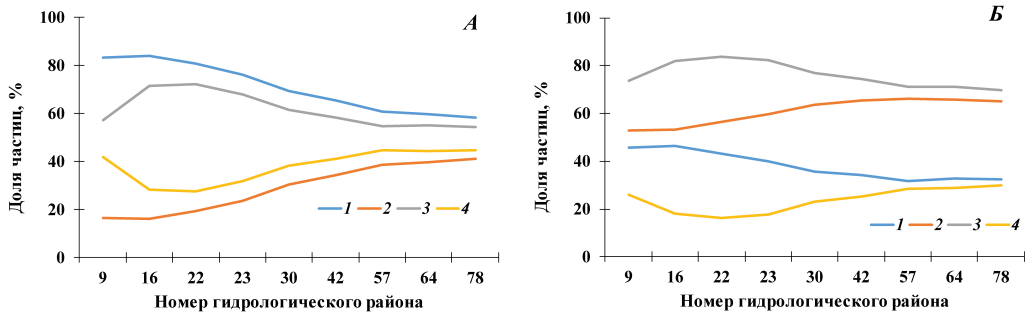

Рис. 5. Гранулометрический состав взвешенного вещества в основном русле «Дон – Старый Дон – АДСК»: А – сценарий БН-1 (1 – глина, 2 – ил) и сценарий БН-2 (3 – глина, 4— ил), Б – сценарий Н-16 (1 – глина, 2 – ил) и сценарий Н-1 (3 – глина, 4 – ил).

ется во времени из-за изменения средних скоростей потоков в широком диапазоне от практически нулевых значений до 40–50 см/с (рисунки А2–А7).

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

3.4. Осаждение взвешенного вещества в дельте

В сентябре 2021 г. во время нагона, который по гидрологическим условиям соответствует сценарию Н-40, были установлены седиментационные ловушки, конструктивно схожие с МСЛ-110 [*Лукашин и др.*, 2011], в приурезовой 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. 6А, Б).

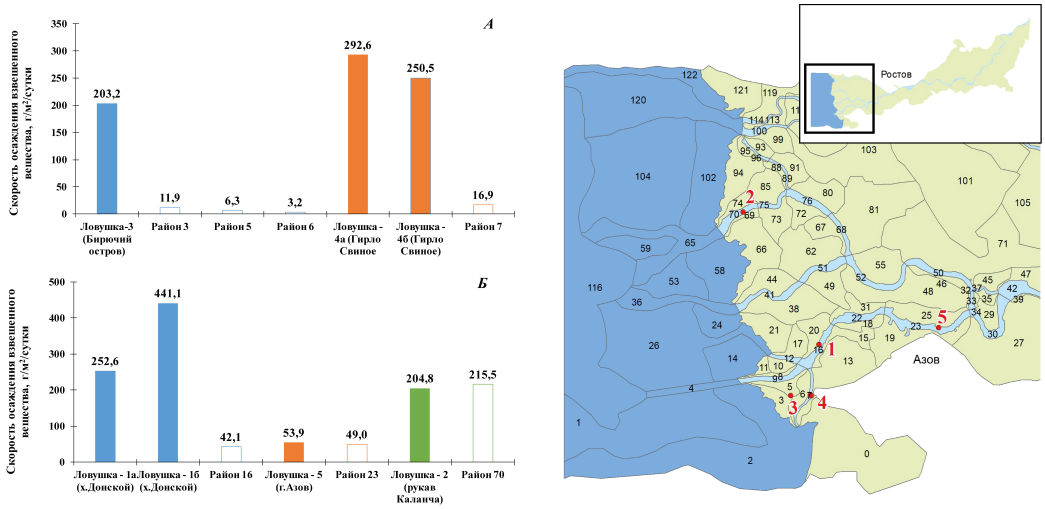

Рис. 6. Скорость осаждения взвешенного вещества в пойменных (А) и русловых (Б) районах дельты по результатам расчетов в сопоставлении с материалом, накопленным в седиментационных ловушках. В – места установки ловушек.

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/м^2/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 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.

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. А1.

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 м^3/с) в русловых ячейках взвешенное вещество накапливается, но с ростом расходов воды до 1400–1550 м^3/с баланс смещается в сторону взмучивания донных отложений (табл. А1). Тот же эффект характерен и для экстремального нагона 3,7 м при средних расходах воды (450 м^3/с).

Ранее нами в работе [*Лихтанская и др.*, 2023] были представлены оценки накопления взвешенных веществ в дельте Дона, которые опирались на расчеты, выполненные в работе [*Шевердяев и Клещенков*, 2020]. Здесь, с применением нового подхода к моделированию переноса и осаждения взвешенных веществ устьевой области Дона эти оценки уточнены (табл. 2).

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

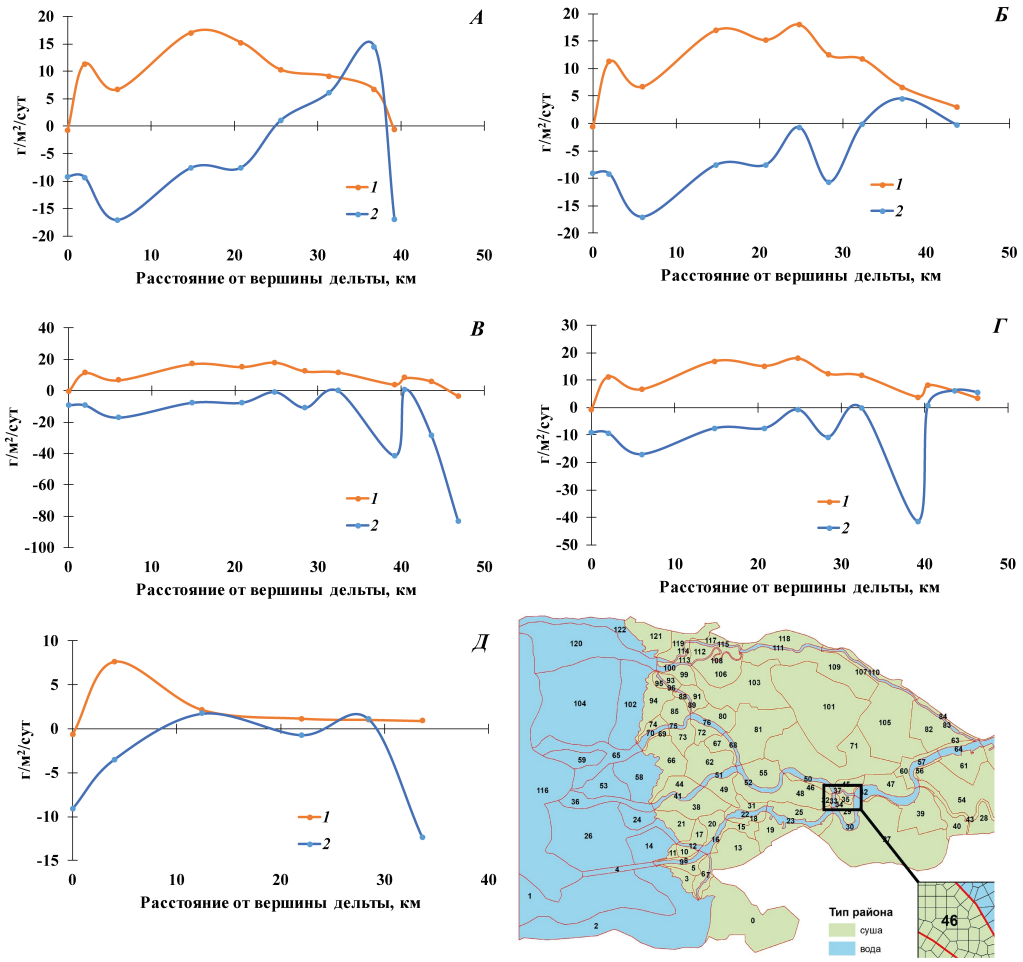

Рис. 7. Потоки взвешенного материала при обмене с дном по рукавам дельты: «Дон – Старый Дон – АДСК» (А), «Дон – Большая Каланча – Мокрая Каланча» (Б), «Дон – Большая Каланча – Большая Кутерьма – Кутерьма» (В), «Дон – Большая Каланча – Большая Кутерьма – Средняя Кутерьма» (Г), «Дон – Мертвый Донец» (Д).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

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

Год	Число дней с нагоном	По [*Лихтанская и др.*, 2023]		Осаждение взвешенных веществ в дельте Дона, тыс. т
		Сток взвешенных веществ, тыс. т	Осаждение взвешенных веществ в дельте Дона, тыс. т	
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

Число дней с нагонами в 2015–2020 гг. изменялось от 12 до 51 дня. В остальное время взвешенные вещества, переносимые речной водой, могли накапливаться в русловых районах дельты (в условиях маловодья при расходах воды 300–600 м^3/с вода

на пойму не выходит). Но периодические нагоны могут способствовать в дальнейшем выносу этого материала за пределы морского края дельты.

4. 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 осаждаясь 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 осаждаясь 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.

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

Приложение А

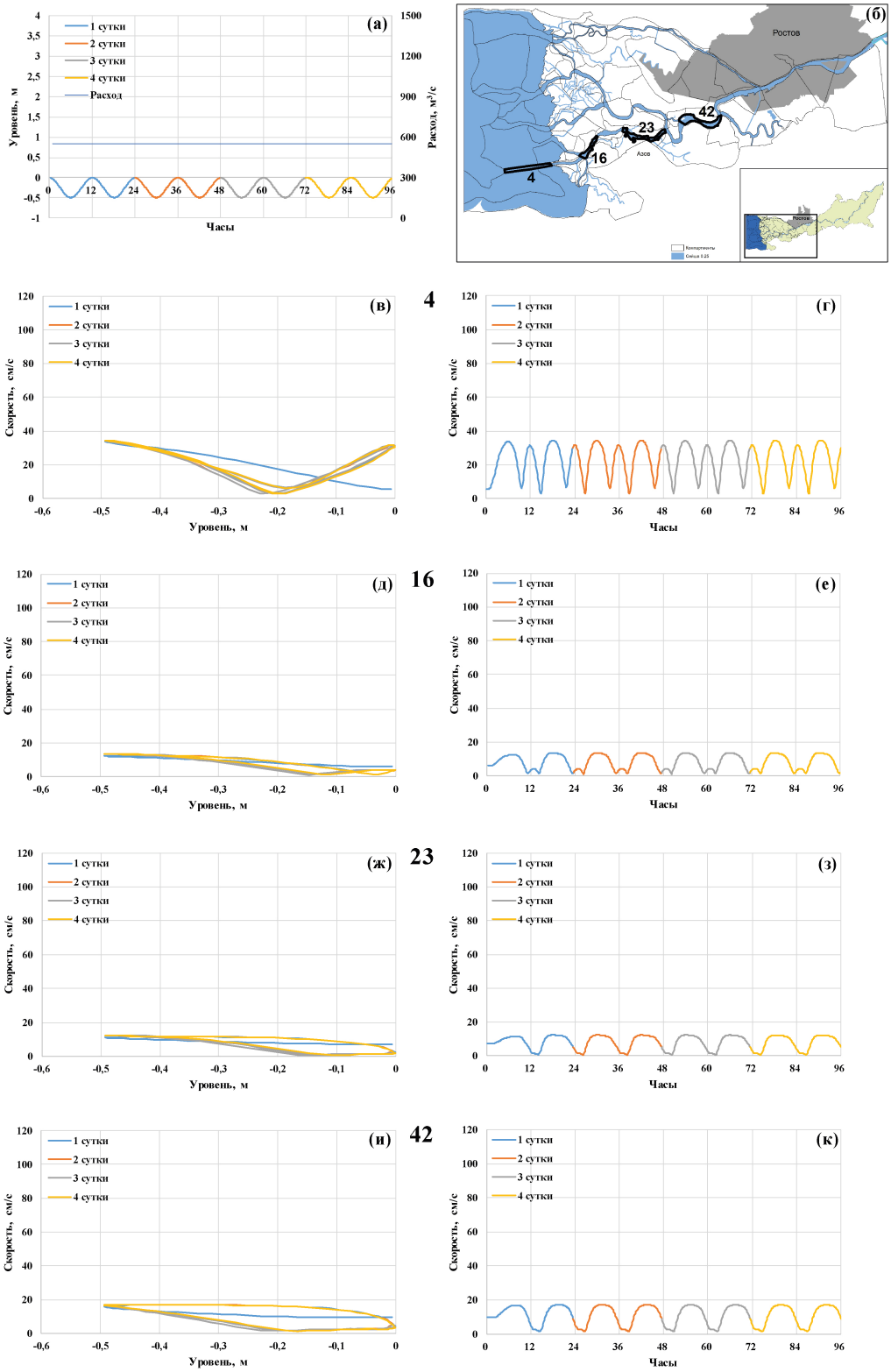

Рис. А1. Сценарий «без нагона» – БН-2. Колебание уровня воды на морском крае дельты с амплитудой 0,5 м и расход воды в станице Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах. Динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах.

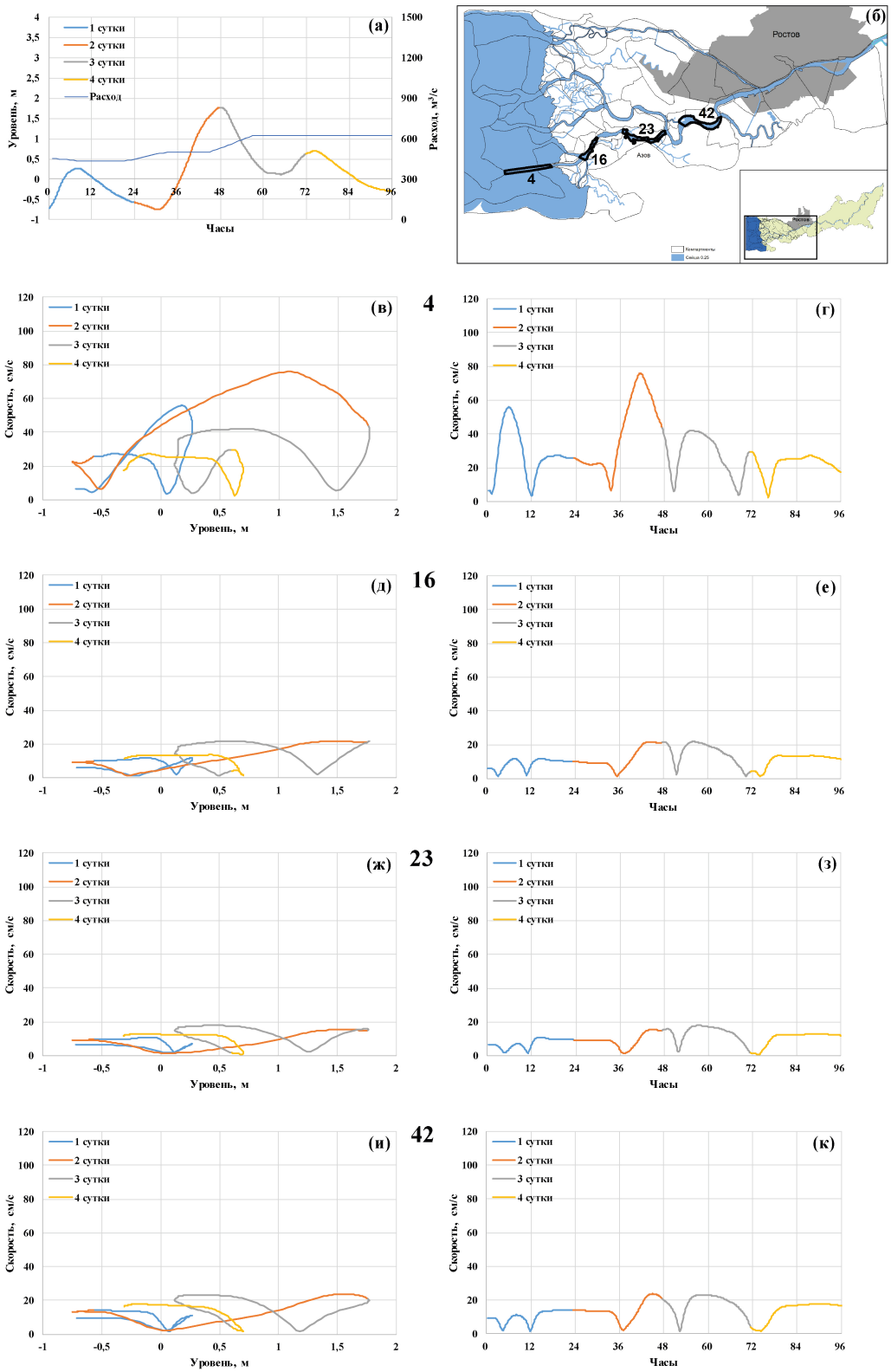

Рис. А2. Сценарий Н-1. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в ст. Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах. Динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах.

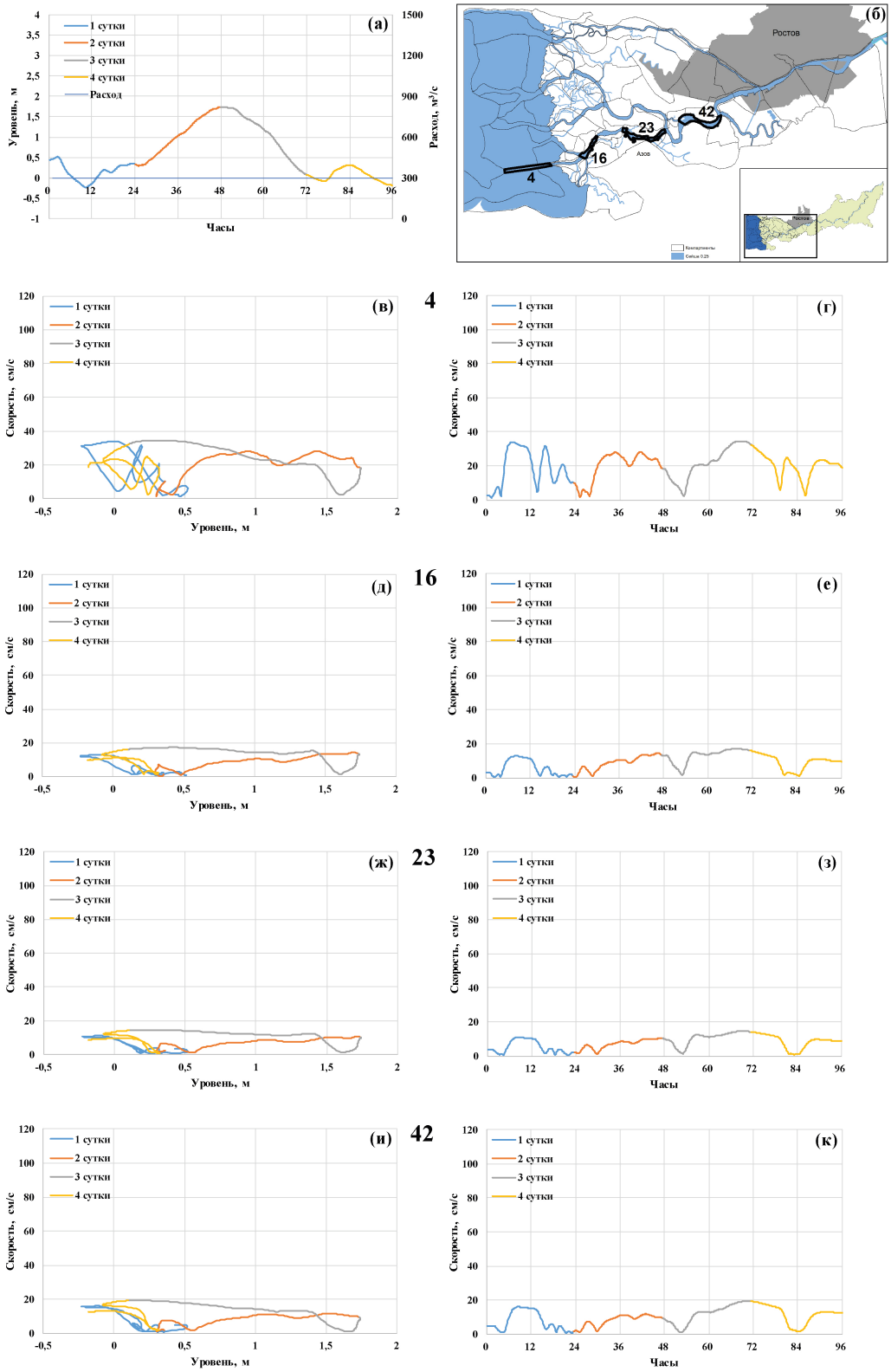

Рис. А3. Сценарий Н-2. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станице Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах. Динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах.

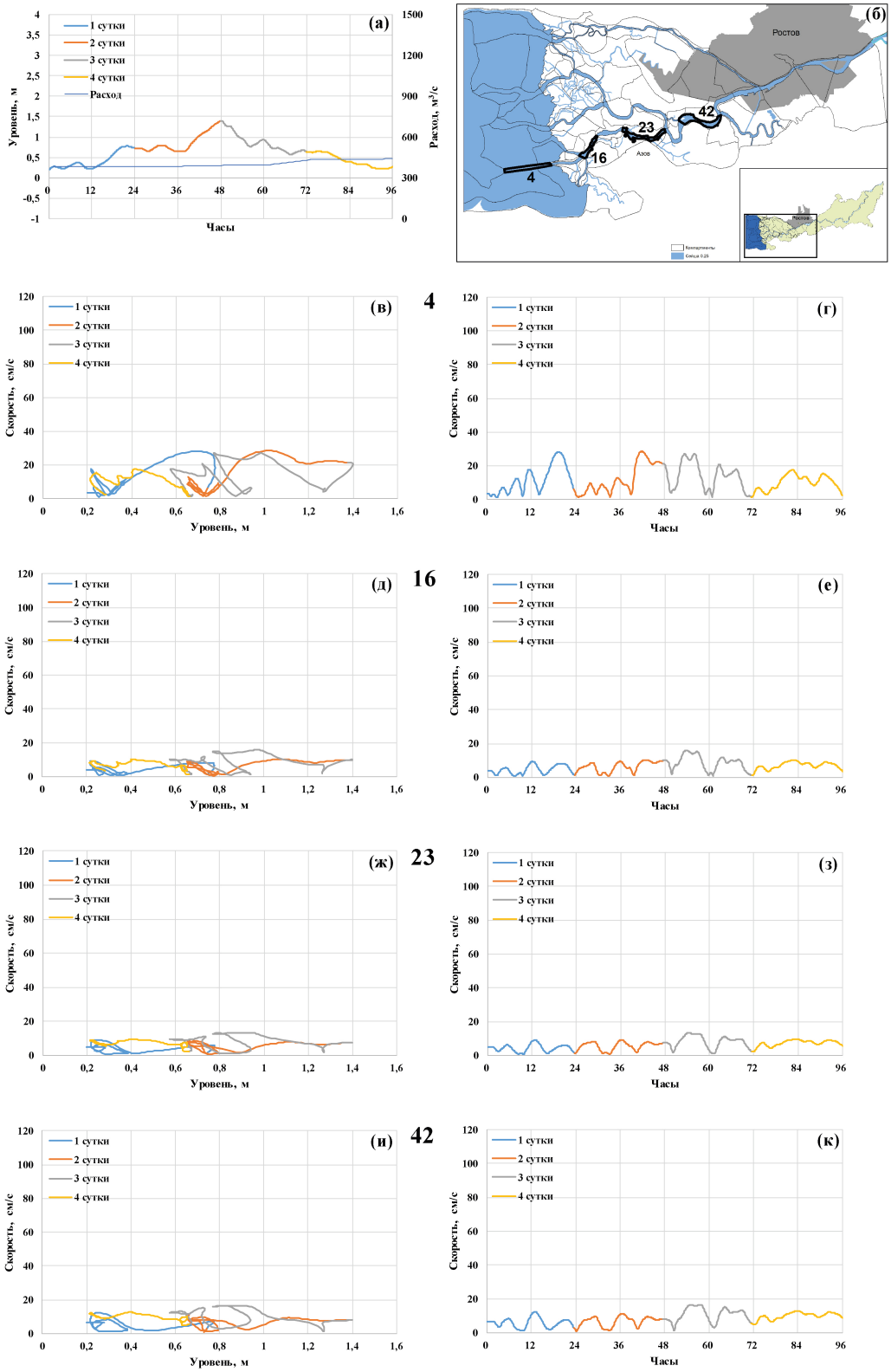

Рис. А4. Сценарий Н-13. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станице Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах. Динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах.

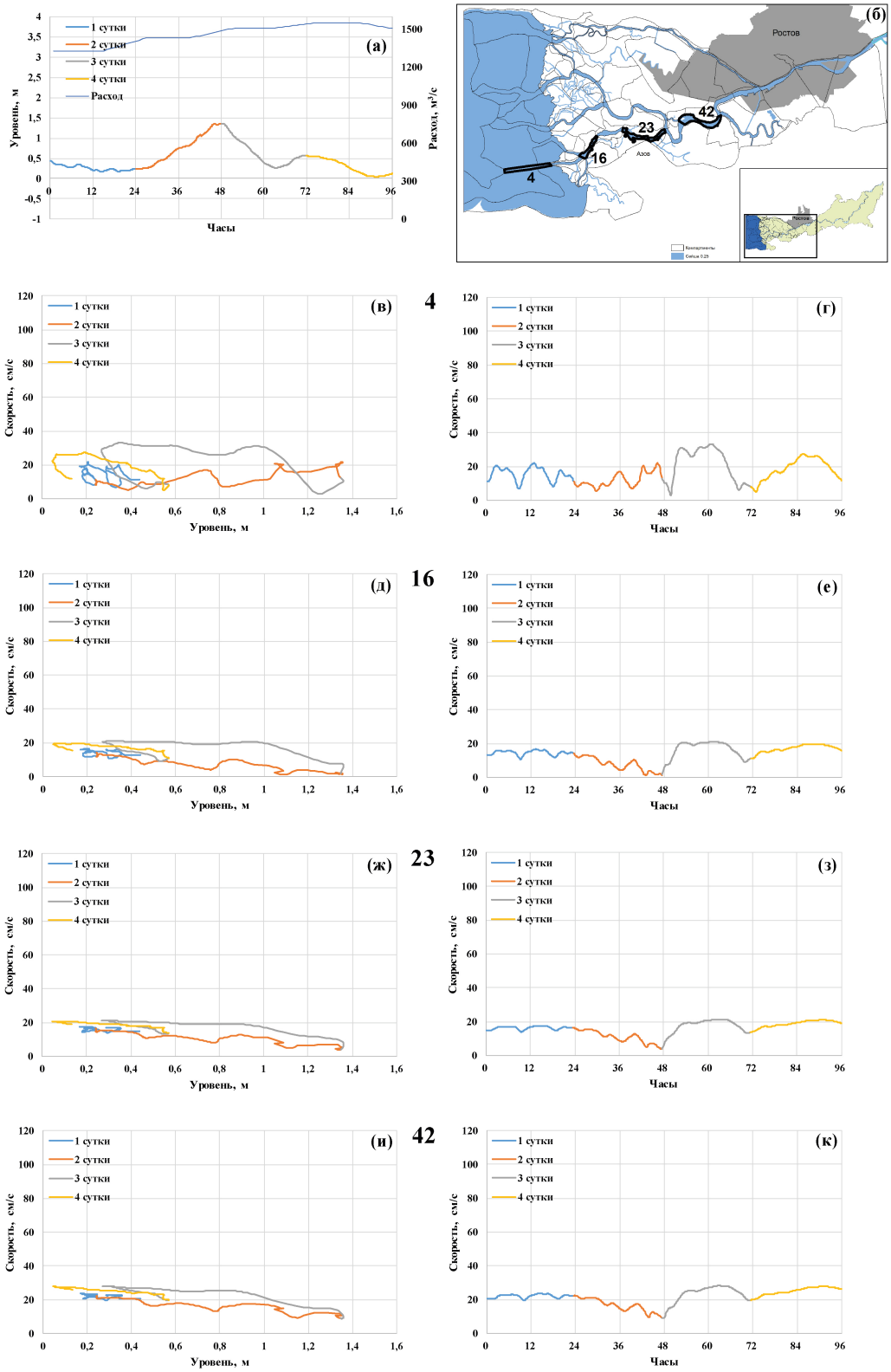

Рис. А5. Сценарий Н-16. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станице Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах. Динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах.

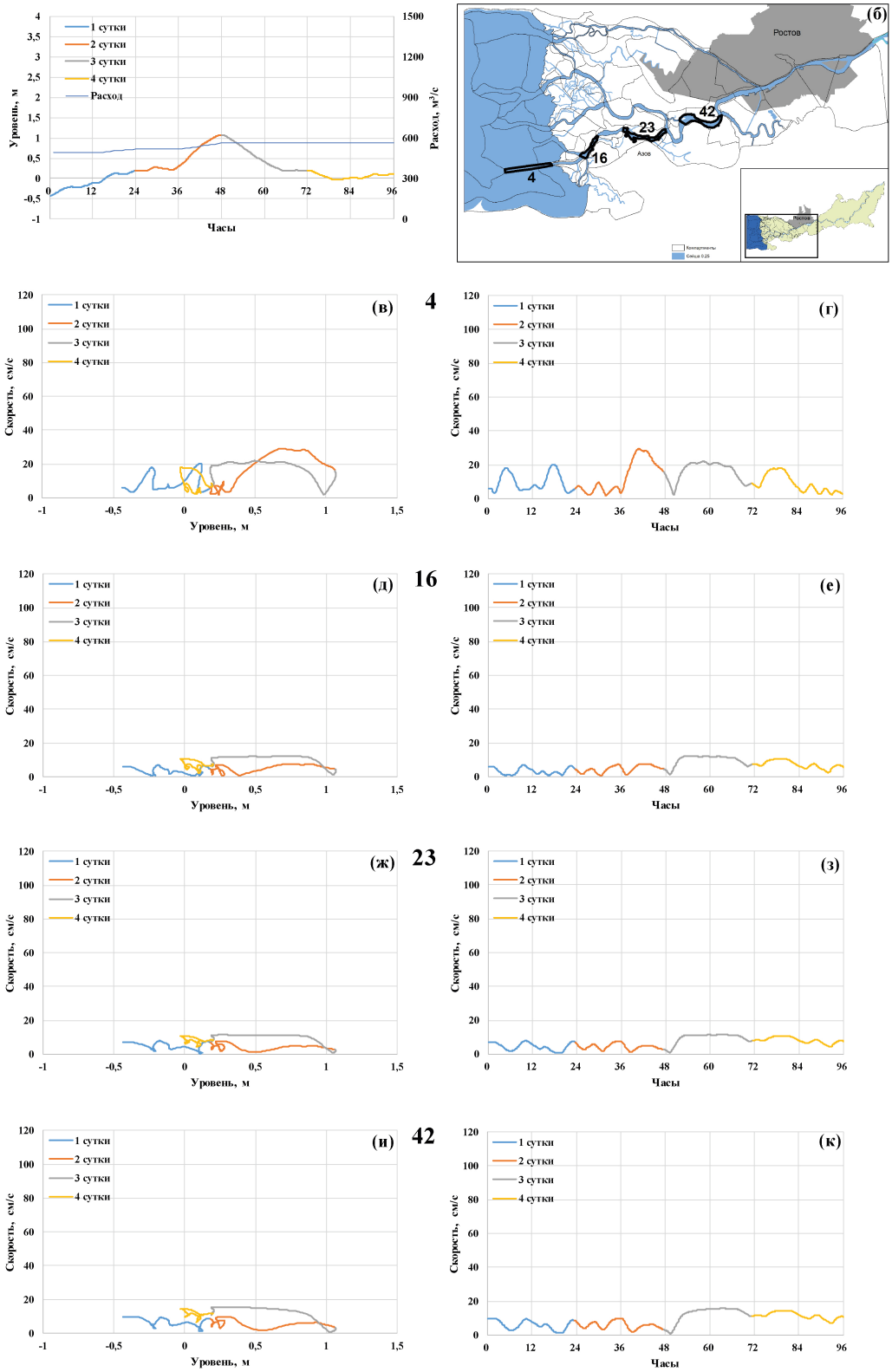

Рис. А6. Сценарий Н-40. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станице Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах. Динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах.

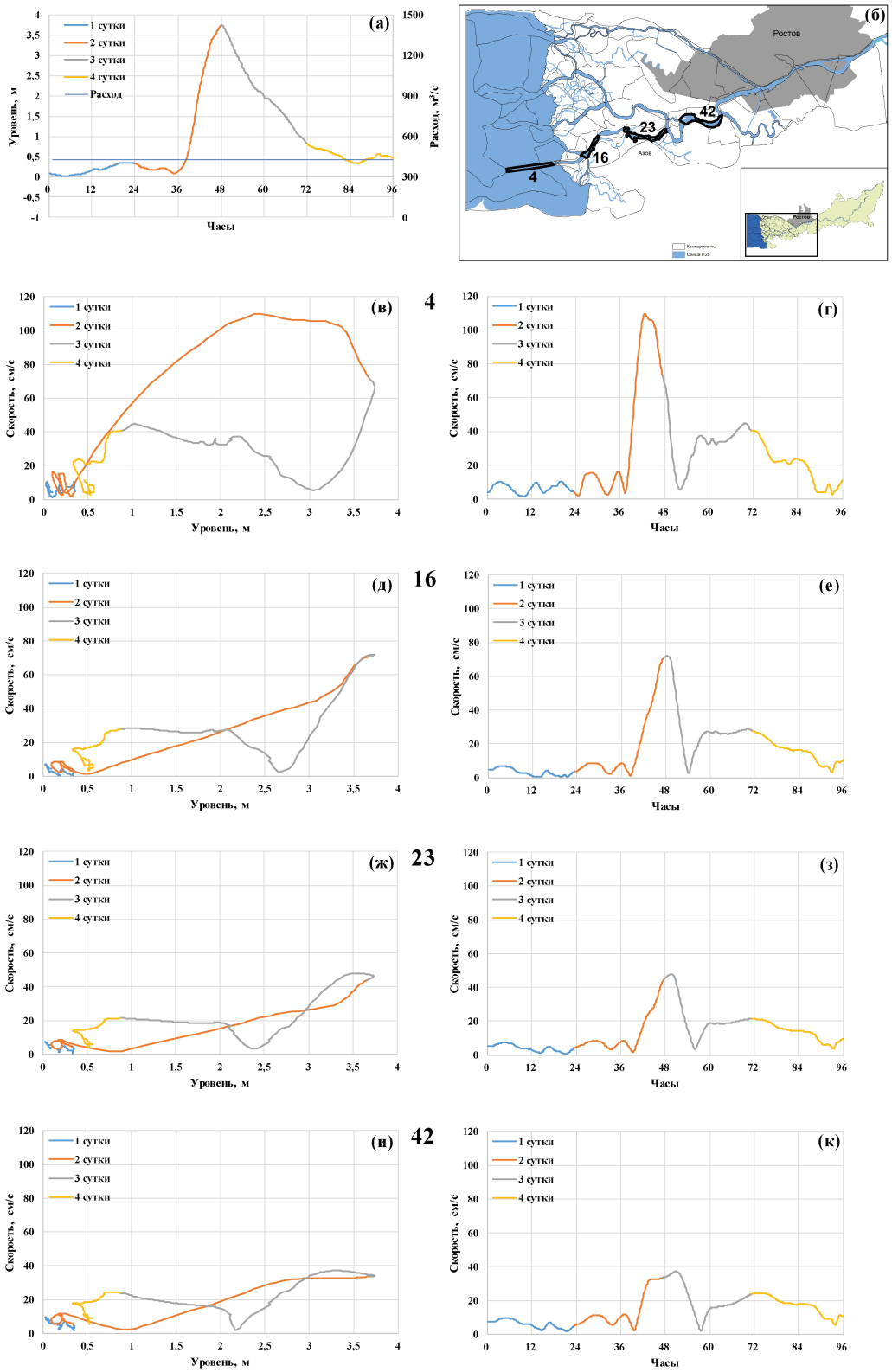

Рис. А7. Сценарий НЭ-3,7. Динамика уровня воды по данным уровнемера в х. Донском и расход воды в станице Раздорской (а), расчётная зона затопления (б), связь средней скорости потоков и уровня воды в 4 (в), 16 (д), 23 (ж) и 42 (ж) гидрологических районах. Динамика средней скорости потоков в 4 (г), 16 (е), 23 (з) и 42 (л) гидрологических районах.

Таблица A1. Динамика взвешенного вещества в устьевой области Дона за период нагона, тыс. т

Статья (приход, расход) расхода воды	Без нагона, колебание уровня воды от −50 см до 0 см	Параметры нагонов					
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	525	1462	407	300	507	541
Изменения в осаждении взвешенного вещества, тыс. т							
Осело всего, в том числе:	1,23	0,25	3,37	0,32	1,00	1,40	3,79
В пойменных районах дельты	0,00	0,02	0,02	0,05	0,19	0,07	1,77
В русловых районах дельты	0,11	0,12	0,02	0,24	0,60	1,82	2,93
В районах авандельты	1,12	0,11	3,33	0,03	0,21	−0,49	−0,91

Список литературы

Барышников Н. Б. *и* Попов И. В. Динамика русловых процессов. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1988. — 455 с. — EDN: YOETUN.

Бердников С. В., Дашкевич Л. В. *и* 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.

Бердников С. В., Шевердяев И. В., Клещенков А. В. *и др.* 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 // Elpub.Preprints. — 2023. — DOI: 10.24108/preprints-3112769.

Ганичева Л. З. Закономерности седиментогенеза в Азовском море (взвеси и условия их образования) : дис. ... канд. / Ганичева Л. З. — Ростов-на-Дону, 1985.

Герасюк В. С. *и* Бердников С. В. Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе // Океанология. — 2021. — Т. 61, № 5. — С. 780—790. — DOI: 10.31857/S0030157421040055.

Исаев А. В., Демаков Ю. П. *и* Шарафутдинов Р. Н. Закономерности изменения гранулометрического состава аллювиальных почв в процессе развития пойм рек // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. — 2022. — Т. 2, № 54. — С. 80—93. — DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.80.

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

Клещенков А. В. *и* Шевердяев И. В. Численное исследование условий осаждения взвеси в дельте Дона при нагонах // Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен: Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова, Санкт-Петербург, 05-14 октября 2023 года. — СПб : ВВМ, 2023. — С. 257—262. — EDN: JIBVDI.

Лихтанская Н. В., Бердников С. В. *и* Клещенков А. В. Твердый сток реки Дон и поступление взвеси в дельту при нагонах: статистическое моделирование и сопоставление в период маловодья // Russian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Т. 23, № 4. — С. 1—15. — DOI: 10.2205/2023es000856.

Лукашин В. Н., Клювиткин А. А., Лисицын А. П. *и др.* Малая седиментационная ловушка МСЛ-110 // Океанология. — 2011. — Т. 51, № 4. — С. 746—750. — EDN: NXXEWJ.

Матишов Г. Г., Московец А. Ю., Инжебейкин Ю. И. *и др.* Этапы сооружения плотин, пересыпей, каналов и трансформация речного стока в авандельте Дона (XVHI-XXI века) // Наука Юга России. — 2019. — № 4. — С. 46—54. — DOI: 10.7868/S25001640190406.

Михайлов В. Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. — Москва : ГЕОС, 1997. — 413 с.

Шевердяев И. В., Бердников С. В. *и* 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. — EDN: ZNARIL.

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

Berdnikov S. V., Sorokina V. V., Kleshchenkov A. V., *et al.* Marine indicators of climate change in the Azov Sea ecosystem // Journal of Sea Research. — 2023. — Vol. 193. — P. 102373. — DOI: 10.1016/j.seares.2023.102373.

Day J. W., Agboola J., Chen Zh., *et al.* Approaches to defining deltaic sustainability in the 21st century // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2016. — Vol. 183. — P. 275–291. — DOI: 10.1016/j.ecss.2016.06.018.

Day J. W. *and* Rybczyk J. M. Global Change Impacts on the Future of Coastal Systems: Perverse Interactions Among Climate Change, Ecosystem Degradation, Energy Scarcity, and Population // Coasts and Estuaries. — Elsevier, 2019. — P. 621–639. — DOI: 10.1016/B978-0-12-814003-1.00036-8.

Dieng H. B., Cazenave A., Meyssignac B., *et al.* New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach // Geophysical Research Letters. — 2017. — Vol. 44, no. 8. — P. 3744–3751. — DOI: 10.1002/2017GL073308.

Dunn F. E., Darby S. E., Nicholls R. J., *et al.* 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. — P. 084034. — DOI: 10.1088/1748-9326/ab304e.

Giosan L., Syvitski J., Constantinescu S., *et al.* Climate change: Protect the world's deltas // Nature. — 2014. — Vol. 516, no. 7529. — P. 31–33. — DOI: 10.1038/516031a.

Hicks F. E. *and* Peacock T. Suitability of HEC-RAS for Flood Forecasting // Canadian Water Resources Journal. — 2005. — Vol. 30, no. 2. — P. 159–174. — DOI: 10.4296/cwrj3002159.

Kleinschmidt Associates. The Place for HEC-RAS Modelers. — 2020. — URL: https://www.kleinschmidtgroup.com/raspost/hec-ras-6-0-beta-is-now-available/ (visited on 11/17/2023).

Pandey S., Rao A. D. *and* Haldar R. Modeling of Coastal Inundation in Response to a Tropical Cyclone Using a Coupled Hydraulic HEC-RAS and ADCIRC Model // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2021. — Vol. 126, no. 7. — DOI: 10.1029/2020JC016810.

Syvitski J. P. M. *and* Milliman J. D. Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the Delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean // The Journal of Geology. — 2007. — Vol. 115, no. 1. — P. 1–19. — DOI: 10.1086/509246.

Tessler Z. D., Vörösmarty C. J., Grossberg M., *et al.* Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world // Science. — 2015. — Vol. 349, no. 6248. — P. 638–643. — DOI: 10.1126/science.aab3574.

Venevsky S., Berdnikov S., Day J. W., *et al.* Don River Delta Hydrological and Geomorphological Transformation Under Anthropogenic and Natural Factors: Century and Decadal Perspectives // Elsevier BV. Preprint. — 2023. — DOI: 10.2139/ssrn.4474057.

Venevsky S., Berdnikov S., Sorokina V., *et al.* Coastal Deltas of Big Rivers as Synergetic Transformation Elements of the Earth System-(An Example of the Don River Delta) // New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences. — Springer International Publishing, 2022. — P. 79–81. — DOI: 10.1007/978-3-030-72543-3_18.

Wang X., Guo Y. *and* 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 // International Journal of Disaster Risk Science. — 2021. — Vol. 12, no. 4. — P. 1–15. — DOI: 10.1007/s13753-021-00355-5.

Wolters M. L. *and* Kuenzer C. Vulnerability assessments of coastal river deltas - categorization and review // Journal of Coastal Conservation. — 2015. — Vol. 19, no. 3. — P. 345–368. — DOI: 10.1007/s11852-015-0396-6.

Zhang W., Jia Q. *and* Chen X. Numerical Simulation of Flow and Suspended Sediment Transport in the Distributary Channel Networks // Journal of Applied Mathematics. — 2014. — Vol. 2014. — P. 1–9. — DOI: 10.1155/2014/948731.

Russian Journal of Earth Sciences

Modeling the Transport and Deposition of Suspended Solids Under Conditions of Low Water and Surge Phenomena in the Don River Estuary Area

S. V. Berdnikov[1], I. V. Sheverdyaev[1], A. V. Kleshchenkov[1], V. V. Kulygin[1], and N. V. Likhtanskaya[*,1]

[1]Southern Scientific Center RAS, Rostov-on-Don, Russia
**Correspondence to: Nataliya V. Likhtanskaya, natalikht@gmail.com .

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

Recieved: 12 March 2024
Accepted: 30 July 2024
Published: 25 December 2024

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

© 2024. The Authors.

Citation: Berdnikov, S. V., I. V. Sheverdyaev, A. V. Kleshchenkov, V. V. Kulygin, and N. V. Likhtanskaya (2024), Modeling the Transport and Deposition of Suspended Solids Under Conditions of Low Water and Surge Phenomena in the Don River Estuary Area, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES4013, https://doi.org/10.2205/2024ES000926, EDN: NYRZMC

References

Baryshnikov N. B. *and* Popov I. V. Dynamics of channel processes. — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1988. — P. 455. — EDN: YOETUN.

Berdnikov S. V., Dashkevich L. V. *and* Kulygin V. V. A New State in the Hydrological Regime of the Sea of Azov in the 21th Century // Doklady Earth Sciences. — 2022. — Vol. 503, no. 1. — P. 123–128. — DOI: 10.1134/S1028334X22030059.

Berdnikov S. V., Sheverdyaev I. V., Kleshchenkov A. V., *et al.* Combined Application of the Hydrological Model HEC RAS and a Multicompartmental Balance Model to Describe the Transport and Transformation of Suspended Solids in a River Delta: A Case Study of the Don River Estuary Area // Elpub.Preprints. — 2023a. — DOI: 10.24108/preprints-3112769.

Berdnikov S. V., Sorokina V. V., Kleshchenkov A. V., *et al.* Marine indicators of climate change in the Azov Sea ecosystem // Journal of Sea Research. — 2023b. — Vol. 193. — P. 102373. — DOI: 10.1016/j.seares.2023.102373.

Day J. W., Agboola J., Chen Zh., *et al.* Approaches to defining deltaic sustainability in the 21st century // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2016. — Vol. 183. — P. 275–291. — DOI: 10.1016/j.ecss.2016.06.018.

Day J. W. *and* Rybczyk J. M. Global Change Impacts on the Future of Coastal Systems: Perverse Interactions Among Climate Change, Ecosystem Degradation, Energy Scarcity, and Population // Coasts and Estuaries. — Elsevier, 2019. — P. 621–639. — DOI: 10.1016/B978-0-12-814003-1.00036-8.

Dieng H. B., Cazenave A., Meyssignac B., *et al.* New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach // Geophysical Research Letters. — 2017. — Vol. 44, no. 8. — P. 3744–3751. — DOI: 10.1002/2017GL073308.

Dunn F. E., Darby S. E., Nicholls R. J., *et al.* 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. — P. 084034. — DOI: 10.1088/1748-9326/ab304e.

Ganicheva L. Z. Patterns of Sedimentogenesis in the Sea of Azov (Suspensions and Conditions of their Formation) : PhD thesis / Ganicheva L. Z. — Rostov-on-Don, 1985.

Gerasyuk V. S. *and* Berdnikov S. V. Experimental Estimation of the Deposition Rate of Water Suspended Particulate Matter in the Mouth of the Don River and in Taganrog Bay // Oceanology. — 2021. — Vol. 61, no. 5. — P. 687–696. — DOI: 10.1134/S0001437021040056.

Giosan L., Syvitski J., Constantinescu S., *et al.* Climate change: Protect the world's deltas // Nature. — 2014. — Vol. 516, no. 7529. — P. 31–33. — DOI: 10.1038/516031a.

Hicks F. E. *and* Peacock T. Suitability of HEC-RAS for Flood Forecasting // Canadian Water Resources Journal. — 2005. — Vol. 30, no. 2. — P. 159–174. — DOI: 10.4296/cwrj3002159.

Isaev A. V., Demakov Yu. P. *and* Sharafutdinov R. N. Patterns of Changes in the Granulometric Composition of Alluvial Soils During the Development of River Floodplains // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management. — 2022. — Vol. 2, no. 54. — P. 80–93. — DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.80.

Kleinschmidt Associates. The Place for HEC-RAS Modelers. — 2020. — (visited on 2023/11/17). https://www.kleinschmidtgroup.com/raspost/hec-ras-6-0-beta-is-now-available/.

Kleshchenkov A. V., Gerasyuk V. S., Kulygin V. V., *et al.* Suspended Matter of the Water from the Tsimlyansk Reservoir to the Taganrog Bay in the Period of Long Low Water in 2006-2020 // Science of the South of Russia. — 2023. — No. 1. — P. 29–39. — DOI: 10.7868/25000640230104.

Kleshchenkov A. V. *and* Sheverdyaev I. V. Numerical Study of the Conditions for Sedimentation of Suspended Matter in the Don Delta during Surges // Fifth Vinogradov Readings. Hydrology in an Era of Change: Collection of Reports of the International Scientific Conference in Memory of the Outstanding Russian Scientist Yuri Borisovich Vinogradov, Saint Petersburg, October 5-14, 2023. — St. Petersburg : VVM, 2023. — P. 257–262. — EDN: JIBVDI.

Likhtanskaya N., Berdnikov S. *and* Kleshchenkov A. Solid runoff of the Don River and suspended matter flow into the delta during surges: statistical modeling and comparison in the low water period // Russian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Vol. 23, no. 4. — P. 1–15. — DOI: 10.2205/2023es000856.

Lukashin V. N., Klyuvitkin A. A., Lisitzin A. P., *et al.* The MSL-110 small sediment trap // Oceanology. — 2011. — Vol. 51, no. 4. — P. 699–703. — DOI: 10.1134/s0001437011040126.

Matishov G. G., Moskovets A. Yu., Inzhebeikin1 Yu. I., *et al.* Stages of Construction of Dams, Embankments, and Canals and the Transformation of River Runoff in the Front-Delta of the Don (the 18th-21st Centuries) // Science in the South of Russia. — 2019. — No. 4. — P. 46–54. — DOI: 10.7868/S25001640190406.

Mikhailov V. N. River mouths of Russia and adjacent countries: past, present and future. — Moscow : GEOS, 1997. — P. 413.

Pandey S., Rao A. D. *and* Haldar R. Modeling of Coastal Inundation in Response to a Tropical Cyclone Using a Coupled Hydraulic HEC-RAS and ADCIRC Model // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2021. — Vol. 126, no. 7. — DOI: 10.1029/2020JC016810.

Sheverdyaev I. V., Berdnikov S. V. *and* Kleshchenkov A. V. HEC-RAS Using for Hydrologic Regime Modeling on the Don's Delta // Ecology. Economy. Series: Informatics. System analysis and mathematical modeling of ecological and economic systems. — 2017. — Vol. 1, no. 2. — P. 113–122. — EDN: ZNARIL.

Sheverdyaev I. V. *and* Kleschenkov A. V. Revealing the Surge Phenomena Contribution of the Heavy Metals Inflow to the River Don Delta // Physical Oceanography. — 2020. — Vol. 27, no. 5. — DOI: 10.22449/1573-160X-2020-5-535-546.

Syvitski J. P. M. *and* Milliman J. D. Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the Delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean // The Journal of Geology. — 2007. — Vol. 115, no. 1. — P. 1–19. — DOI: 10.1086/509246.

Tessler Z. D., Vörösmarty C. J., Grossberg M., *et al.* Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world // Science. — 2015. — Vol. 349, no. 6248. — P. 638–643. — DOI: 10.1126/science.aab3574.

Venevsky S., Berdnikov S., Day J. W., *et al.* Don River Delta Hydrological and Geomorphological Transformation Under Anthropogenic and Natural Factors: Century and Decadal Perspectives // Elsevier BV. Preprint. — 2023. — DOI: 10.2139/ssrn.4474057.

Venevsky S., Berdnikov S., Sorokina V., *et al.* Coastal Deltas of Big Rivers as Synergetic Transformation Elements of the Earth System-(An Example of the Don River Delta) // New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences. — Springer International Publishing, 2022. — P. 79–81. — DOI: 10.1007/978-3-030-72543-3_18.

Wang X., Guo Y. *and* 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 // International Journal of Disaster Risk Science. — 2021. — Vol. 12, no. 4. — P. 1–15. — DOI: 10.1007/s13753-021-00355-5.

Wolters M. L. *and* Kuenzer C. Vulnerability assessments of coastal river deltas - categorization and review // Journal of Coastal Conservation. — 2015. — Vol. 19, no. 3. — P. 345–368. — DOI: 10.1007/s11852-015-0396-6.

Zhang W., Jia Q. *and* Chen X. Numerical Simulation of Flow and Suspended Sediment Transport in the Distributary Channel Networks // Journal of Applied Mathematics. — 2014. — Vol. 2014. — P. 1–9. — DOI: 10.1155/2014/948731.