

ТВЕРДЫЙ СТОК РЕКИ ДОН И ПОСТУПЛЕНИЕ ВЗВЕСИ В ДЕЛЬТУ
ПРИ НАГОНАХ: СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И СОПОСТАВЛЕНИЕ В ПЕРИОД МАЛОВОДЬЯН. В. Лихтанская¹ , С. В. Бердников¹ , А. В. Клеценков¹ ¹Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

* Контакт: Н. В. Лихтанская, natalikht@gmail.com

Выполнено статистическое моделирование твердого стока р. Дон на основе данных измерений расхода и мутности воды, полученных на гидрологическом посту в станции Раздорской за двенадцатилетний период (2009–2020 гг.), с применением методов WRTDS (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season – Взвешенные регрессии по времени, расходу и сезону) и WRTDSKalman (WRTDS с фильтрацией Калмана). Разработанная статистическая модель нацелена на решение проблемы несоответствия регулярности сбора данных о расходе воды и данных о концентрации взвешенного вещества путем «восстановления» значений концентрации в дни без измерений на основе данных о наиболее «похожих», с точки зрения времени, расхода воды и сезона днях с измерениями. Осуществлена проверка качества разработанной статистической модели и ее модификации. Среднесуточные значения концентрации взвеси и расхода наносов сопоставлены с оценками объемов взвешенного материала, оседающего в периоды повторяющихся сильных нагонных явлений. Выполнена сравнительная оценка вкладов морского и речного факторов в перенос и седиментацию взвешенного материала в дельте Дона.

Ключевые слова: взвешенное вещество, сток наносов, сгонно-нагонные явления, устьевая область Дона, статистическое моделирование

Цитирование: Лихтанская, Н. В., Бердников С. В., Клеценков 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. — ES4010. — EDN: <https://elibrary.ru/nbkdrs>. DOI: <https://doi.org/10.2205/2023es000856>

<https://elibrary.ru/nbkdrs>

Получено: 3 февраля 2023 г.

Принято: 22 июня 2023 г.

Опубликовано: 16 ноября 2023 г.



© 2023. Коллектив авторов.

Введение

Изменения гидрологического и гидрохимического режимов и продукционных процессов экосистемы Азовского моря, обусловленные климатическими флуктуациями и социально-экономическими решениями в области хозяйственной деятельности на водосборе основных рек, в акватории и береговой зоне, системно описаны только до 2000 г. [Воловик и др., 2008; 2010; Гидрометеорологический справочник Азовского моря, 1962; Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 5. Азовское море, 1991; Михайлов и Михайлова, 2015]. Анализ и оценка этих изменений и их последствий на рубеже XX–XXI веков в один из самых длительных периодов маловодья [Варенцова и др., 2020; Георгиади и др., 2020; Джамалов и др., 2013] и климатических аномалий – актуальная научная проблема.

Одним из индикаторов таких изменений является динамика взвешенного вещества в системе «река–море». Продолжающийся период маловодья, рост относительного уровня воды и солености Азовского моря и Таганрогского залива, а также повторяемости сильных нагонных явлений увеличивают роль морских факторов в развитии дельты Дона [Бердников и др., 2022; Михайлов и Михайлова, 2015].

Начало детального изучения устьевого взморья и дельты Дона приходится на 10–30-е годы прошлого века и связано с изысканиями, проектированием и вводом в эксплуатацию Азово-Донского морского канала. В те годы были даны первые оценки роли дельты в трансформации твердого стока Дона. Позже, в 50–60-х годах, серии специальных наблюдений сотрудников Донской устьевой станции были направлены на установление масштабов оседания взвешенных наносов в дельте Дона при движении от вершины к устьям рукавов. Тогда же было обращено внимание на влияние сгонно-нагонных явлений на поступление взвешенных веществ при нагонах. В дальнейшем эти работы были расширены и детализированы, однако основной целью было определение изменения гранулометрического состава взвеси и донных отложений в пределах устьевых баров и их размыва при сгонах и нагонах. Непосредственно поступлению взвеси из залива при нагонах внимания уделялось мало, т. к. твердый сток Дона в середине прошлого века был значительно выше современных показателей. Вместе с тем, было сформировано понимание, что в условиях половодья нагоны вызывают подпор, вследствие чего течение насыщенных наносами весенних вод реки замедляется, а наносы осаждаются на поверхности затопленной дельты. В межень мутные воды, приходящие с нагоном со взморья, распространяются вверх по течению, а зона наибольшего заиления дельты перемещается вместе с волной нагона [Родионов, 1958].

Изменения гидрологических условий Нижнего Дона и дельты во второй половине XX века после строительства Цимлянского водохранилища и ряда низконапорных гидроузлов (Николаевского, Константиновского, реконструкции Кочетовского) привели к значительной перестройке внутригодового распределения стока, сопровождающегося сокращением доли весеннего половодья [Бронфман и Хлебников, 1985; Сорокина, 2006]. Кроме того, произошло значительное сокращение стока взвешенных наносов от 4,4 млн т/год в 40-х годах до 0,4 млн т/год в период с 1983 по 2005 гг. [Сорокина, 2006]. Современный маловодный период, начавшийся в 2007 году, характеризуется значительным сокращением стока взвешенных наносов по сравнению с предыдущими годами и изменением его сезонного распределения [Клещенков, 2018]. Во многом это обусловлено тем фактом, что в настоящее время Нижний Дон представляет собой зарегулированную речную систему, состоящую из русловых водохранилищ, приуроченных к гидроузлам воднотранспортной системы, и отдельных участков естественного русла. Помимо осадения взвеси в русловых водохранилищах существенная ее часть теряется в результате сильного зарегулирования местного стока локальными гидротехническими сооружениями на малых водотоках [Матишов, 2016], широкого развития противоэрозионных мероприятий на водосборе, а также в процессе водоподготовительных мероприятий при использовании стока р. Дон в промышленности, теплоэнергетике и коммунальном хозяйстве [Бронфман и Хлебников, 1985]. Перечисленные выше проблемы отмечаются по всему миру, сокращение твердого стока и деградация дельт зафиксированы для Миссисипи, Нила, Дуная, Инда, Роны, и других рек [Giosan *u др.*, 2014].

На фоне значительного сокращения объемов твердого стока Дона [Клещенков, 2018; Сорокина, 2006; Сорокина и Бердников, 2008; Сорокина *u др.*, 2006] во время нагонов (особенно сильных и экстремальных) в дельту может поступать значительное количество взвеси из Таганрогского залива, существенно меняющее соотношение вкладов стоковой и нагонной составляющих в поступление взвешенного вещества в дельту.

Количественная оценка этих изменений осуществляется на основе численного моделирования поступления взвеси во время нагона [Бердников *u др.*, 2018]. Для ее улучшения требуются данные о потоках взвешенного вещества с речным стоком в эти дни, но из-за несоответствия регулярности сбора данных о расходе воды и данных измерений концентрации взвеси их получение становится проблемой. Статистическое моделирование, широко используемое в исследованиях, связанных с оценкой потоков азота [Ator *u др.*, 2019; Chanat *u Yang*, 2018; Meter *u др.*, 2017; Strickling *u Obenour*, 2018], фосфора [Fanelli *u др.*, 2019; Rankinen *u др.*, 2016], органического вещества [Stackpole *u др.*, 2016], органического углерода [Zhang *u Blomquist*, 2018], наносов [Hirsch, 2012;

Zhang *u др.*, 2016], наносов и ртути [Zolkos *u др.*, 2022], позволяет преодолеть эту проблему и получить оценки среднесуточных значений концентрации взвеси и расхода наносов в период нагонных явлений.

В статье описываются результаты работы по статистическому моделированию твердого стока р. Дон на основе имеющихся данных за период 2009–2020 гг. и их использование для оценки вкладов морского и речного факторов в перенос и седиментацию взвешенных наносов в дельте Дона.

Материалы и методы исследования

Статистическое моделирование осуществлялось с помощью реализованного в виде R-пакета программного комплекса EGRET (Exploration and Graphics for RivEr Trends – Исследование и графическое отображение речных трендов), разработанного Геологической службой США [EGRET, 2022], который в настоящее время позиционируется как инструментальный, способный обеспечить одну из самых точных количественных оценок изменений качества воды и стока по сравнению с другими часто используемыми методами [Lee *u др.*, 2019].

Для разработки статистической модели использовались полученные на гидрологическом посту в станции Раздорской (рис. 1) данные измерений расхода и мутности воды из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [АИС ГМВО, 2014] и Базы данных гидрохимических показателей ЮНЦ РАН, измеренных при выполнении экспедиционных наблюдений [Бердников *u др.*, 2021]. Всего были рассмотрены результаты определений 4383 расходов воды и 452 мутностей воды за двенадцатилетний период 2009–2020 гг., представленные в АИС ГМВО.



Рис. 1. Расположение гидрологических постов, где проводились измерения.

Модель разрабатывалась с помощью метода WRTDS [Hirsch *u др.*, 2010]. Она имеет следующий вид (1):

$$\ln(c) = \beta_0 + \beta_1 q + \beta_2 T + \beta_3 \sin(2\pi T) + \beta_4 \cos(2\pi T) + \varepsilon, \quad (1)$$

где c – концентрация, мг/л; β_i – коэффициенты регрессии, $i = 0, 1, \dots, 4$; $q = \ln(Q)$, Q – среднесуточный расход воды, м³/с; T – время в десятичных годах; ε – ошибка (необъясненная вариация).

Метод WRTDS базируется на идее о том, что соотношение, отражающее связь между концентрацией рассматриваемого вещества и расходом воды, не может оставаться постоянным для всего изучаемого периода (поскольку эта связь не является постоянной во времени). Поэтому для каждого узла расчетной сетки подбирается уникальный набор коэффициентов уравнения (1) на основе наиболее «близких» по

времени, расходу воды и сезону измерений концентрации. Диапазоны, из которых выбираются «близкие» значения, задаются в параметрах модели (например, можно задать такие параметры, что будут использоваться измерения только этого года и двух соседних лет, попадающие в тот же сезон и заданный диапазон по расходу воды). При этом каждое «близкое» значение получает свой вес, который вычисляется на основе трех расстояний (по времени, расходу воды и сезону) между точкой оценки и точкой данных. Таким образом создается очень гибкое статистическое представление ожидаемых значений концентрации рассматриваемого вещества, которое позволяет вычислить оценки концентрации для каждого дня изучаемого периода посредством билинейной интерполяции оценок концентрации в узлах сетки с использованием значений q и T для конкретного дня.

Для повышения точности ежедневных оценок концентрации взвеси и расхода наносов за счет учета автокорреляционной структуры остатков модели и применения авторегрессионной модели первого порядка, результаты моделирования модифицировались методом WRTDSKalman [Zhang и Hirsch, 2019].

Описание разработки модели и ее модификации приведено в [Лихтанская и Бердников, 2022].

В качестве информации о нагонах использовались данные, получаемые с помощью автоматизированного комплекса гидрометеорологических наблюдений и хранящиеся в базе данных ЮНЦ РАН (комплекс был установлен в 2013 г. на морском причале ЮНЦ РАН и включает в себя датчик уровня воды на причале в хуторе Донском (рис. 1), расположенном в 10 км от морского края дельты в судоходном русле Дона). За период 2015–май 2020 гг. было выделено 50 нагонов с максимальным превышением уровня от 1 до 1,78 м. (табл. 1).

Оценки поступления взвешенных веществ со стороны Таганрогского залива и их осаждения на участке от вершины дельты до морского края получены с использованием математической гидродинамической модели Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS), адаптированной для расчета динамики затопления дельты Дона при штормовых нагонах, и мультикомпарментальной балансовой модели переноса и седиментации взвешенного вещества [Шевурдяев и Клещевков, 2020]. В гидродинамической модели применялась нерегулярная расчетная сетка для дельты Дона со средним разрешением 100×100 м. Ячейки сетки были сгруппированы в 95 компарментов по гидрологическому принципу. На морском крае дельты, в Таганрогском заливе, задавалось изменение уровня воды при штормовом нагоне со стороны моря, в вершине дельты – постоянный расход воды. На основе гидрологических расчетов оценивались потоки воды и взвешенного вещества между компарментами, изменение в них объема воды и массы взвешенного вещества с учетом оседания взвеси в зависимости от крупности частиц, как на фазе подъема уровня, так и на фазе последующего спада.

При расчетах рассматривалось несколько сценариев, соответствующих двум вариантам расходов воды: а) $500 \text{ м}^3/\text{с}$ (средний расход воды в течение года) и б) $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ (наблюдался в мае 2018 г., ранее был типичным расходом в паводковый период) и трем сценариям нагонов с максимальным подъемом уровня: 1,5 м, 2,5 м и 3,7 м (экстремальный нагон в сентябре 2014 г.). На морской границе дельты в период нагона задавалась концентрация взвеси 71 мг/л , в вершине дельты – 19 мг/л соответственно на основе многолетних наблюдений [Клещевков и др., 2023].

Для каждого сценария на основе полученных оценок оседания взвешенного вещества в дельте Дона за период нагона рассчитывалась функция связи (2):

$$S_Q = f(h), \quad (2)$$

где S_Q – объем (тыс. тонн) осевшего за период нагона (с максимальным уровнем h , м) взвешенного вещества при среднесуточном расходе воды Q , $\text{м}^3/\text{с}$.

Таблица 1. Число нагонов с максимальным уровнем более 1 метра в 2015–2020 гг. в дельте Дона (зафиксированы уровнемером на причале ЮНЦ РАН в хуторе Донской; прочерк – нагоны с высотой превышения уровня более 1,0 м не наблюдались)

Год	Максимальный уровень при нагоне, м								Всего
	1,0–1,1	1,1–1,2	1,2–1,3	1,3–1,4	1,4–1,5	1,5–1,6	1,6–1,7	1,7–1,9	
2015	4	2	1	1	1	1	–	–	10
2016	6	1	–	2	1	2	–	1	13
2017	1	3	2	1	–	1	2	–	10
2018	–	–	–	1	1	–	–	1	3
2019	6	1	2	–	–	–	–	–	9
2020	–	1	1	2	–	–	–	1	5
Всего	17	8	6	7	3	4	2	3	50

Зависимость оседающего в дельте материала от максимального уровня воды во время нагона имеет квадратичный вид (3) при рассмотренных в работе [Шевурдяев и Клещенок, 2020] двух сценариях среднесуточного расхода воды:

$$\begin{aligned} S_{500} &= 2,92 \cdot h^2 + 7,44 \cdot h, \\ S_{2000} &= 3,97 \cdot h^2 + 5,45 \cdot h. \end{aligned} \quad (3)$$

При оценках объема осевшего в дельте взвешенного материала за период конкретного нагона сначала по формулам (3) рассчитывались величины S_{500} , S_{2000} , а затем выполнялась линейная интерполяция (экстраполяция) в зависимости от среднего за нагон среднесуточного расхода воды.

Результаты исследования и их обсуждение

Построение статистической модели методом WRTDS

Метод WRTDS заключается в построении для каждого дня рассматриваемого периода уникальной взвешенной регрессии с применением ряда ключевых параметров модели для взвешенного сглаживания по времени, расходу воды и сезону. Значения ключевых параметров при построении статистической модели подбирались опытным путем на основе значений, используемых в программном комплексе EGRET по умолчанию, и результатов проверки качества и валидации построенной модели.

Для оценки надежности результатов статистического моделирования твердого стока р. Дон проверка качества разработанной модели осуществлялась следующим образом.

Наиболее распространенная статистика для оценки качества регрессионной модели – коэффициент детерминации – для натурального логарифма концентрации взвеси равен 0,565 и для натурального логарифма расхода взвеси – 0,573, что демонстрирует приемлемое качество модели.

Еще одной характеристикой качества модели является статистика смещения значений расхода взвеси B , которая в соответствии с рекомендациями в [EGRET, 2022] была рассчитана по формуле (4):

$$B = (P - O)/P, \quad (4)$$

где P , O – суммы наблюдаемых и расчетных среднесуточных расходов взвеси в дни с измерениями.

Близкое к нулю полученное значение $B = -0,01$, предполагает, что модель достаточно хорошо подогнана, но имеет небольшое отрицательное смещение, которое может приводить к занижению модельных оценок.

Для исследования возможных проблем смещения были построены графики остатков модели (разностей натурального логарифма наблюдаемых значений концентрации и натурального логарифма концентрации по оценкам модели), которые продемонстрировали, что остатки модели случайным образом и достаточно симметрично разбросаны вокруг нуля для всех значений оценок натурального логарифма концентрации взвеси (рис. 2а) и расхода воды (рис. 2б). Отсутствие диапазонов, для которых имеются только отрицательные или только положительные остатки, говорит о том, что оценки модели в среднем верны, а не систематически завышены или занижены.

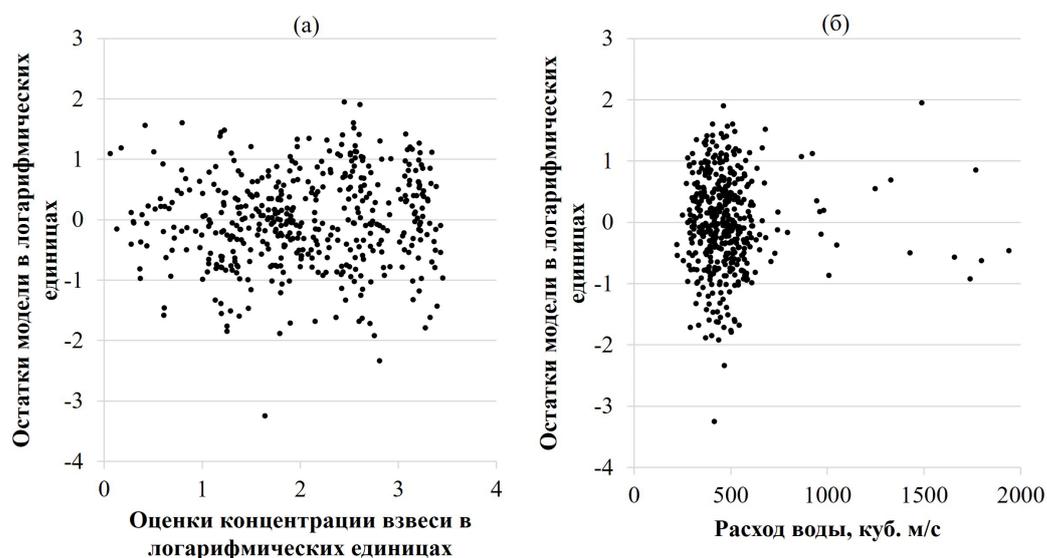


Рис. 2. Графики, демонстрирующие степень надежности результатов моделирования.

Улучшение статистической модели методом *WRTDSKalman*

Результатом статистической модели WRTDS для всех дней рассматриваемого периода являются несмещенные оценки концентрации взвеси. С помощью метода WRTDSKalman эти оценки были заменены измеренными значениями для дней, когда измерения производились, и скорректированными на основе информации о стандартизованных остатках модели оценками для остальных дней.

Валидация статистических моделей

Для выполнения валидации модели использовались опубликованные в АИС ГМВО данные о среднегодовых расходах наносов в рассматриваемый период. На рис. 3 представлены графики, которые демонстрируют достаточно хорошее совпадение данных АИС ГМВО и модельных оценок, полученных с помощью обоих методов, в годы, когда расход наносов не превышал 10 кг/с, и гораздо лучшее совпадение данных АИС ГМВО и модельных оценок, улучшенных с помощью фильтрации Калмана, в годы с более высоким расходом наносов.

Для модельных оценок среднегодовых расходов наносов, улучшенных с помощью фильтрации Калмана, построены 90% интервалы прогнозирования (рис. 3), которые, в отличие от доверительных интервалов, учитывают не только неопределенность в оценке среднего значения генеральной совокупности, но и случайную вариацию отдельных значений. Для лет с высокими значениями расхода наносов интервалы прогнозирования существенно шире, поэтому неопределенность результатов выше.

Полученные с помощью метода WRTDSKalman оценки расхода взвешенных наносов в современный период маловодья мы сравнили с расходом взвешенных наносов в маловодные периоды условно-естественного режима донского стока до строительства Цимлянской плотины и зарегулированного режима (табл. 2).

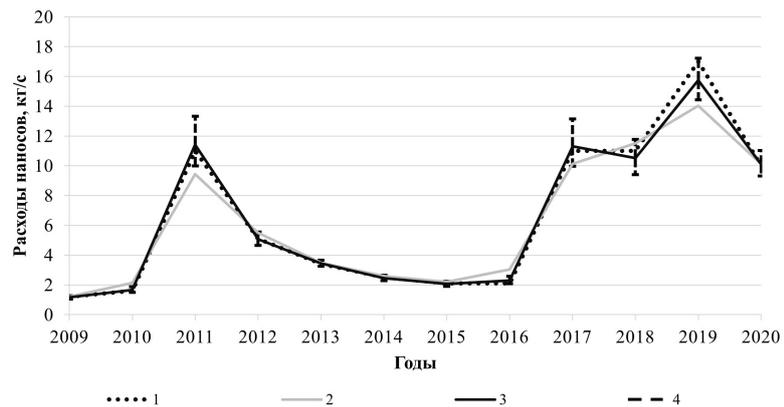


Рис. 3. Среднегодовые расходы наносов по данным АИС ГМВО (1), модельным оценкам, полученным с помощью метода взвешенных регрессий (2) и улучшенным с помощью фильтрации Калмана (3), и 90% интервалы прогнозирования (4).

Данные, представленные в табл. 2, показывают существенное влияние зарегулирования стока р. Дон на сокращение поступления взвешенных веществ в устьевую область. И если, как отмечалось выше, в целом сокращение годового стока взвесей в створе ст. Раздорской в период зарегулированного стока относительно периода условно-естественного стока составило более 45% (с 3,94 до 2,16 млн т/год) [Бронфман и Хлебников, 1985], то такое же сокращение применительно к маловодным годам соответствующих периодов составляет 77% (с 2,41 до 0,56 млн т), а к современному периоду 91% (с 2,41 до 0,21 млн т).

Помимо непосредственной аккумуляции взвешенных наносов в чаше Цимлянского водохранилища сокращению стока взвесей р. Дон способствовало также резкое уменьшение расходов, а следовательно, и транспортирующей способности реки в весенний период. Таким образом, можно говорить о значительном сокращении поступления материкового стока взвеси в дельту Дона в современный период.

Таблица 2. Среднегодовые расходы (Q) и сток взвешенных наносов (R) р. Дон у ст. Раздорская в маловодные периоды

Год	Q, м ³ /с	R, кг/с	R, млн т	Год	Q, м ³ /с	R, кг/с	R, млн т	Год	Q, м ³ /с	R, кг/с	R, млн т
Условно-естественный режим (по [Бронфман и Хлебников, 1985])			Зарегулированный режим (по [Бронфман и Хлебников, 1985])				Современный период (рассчитано по модели с помощью метода WRTDSKalman)				
1938	492	89	2,81	1972	300	10	0,32	2009	459	1,2	0,04
1944	555	67	2,14	1973	376	13	0,41	2010	551	1,7	0,05
1945	608	106	3,34	1974	540	29	0,91	2011	414	11,4	0,36
1949	433	65	2,05	1975	357	10	0,31	2012	513	5,1	0,16
1950	373	53	1,7	1976	374	26	0,82	2013	496	3,4	0,11
								2014	461	2,5	0,08
								2015	356	2,1	0,07
								2016	401	2,3	0,07
								2017	470	11,3	0,36
								2018	746	10,5	0,33
								2019	510	15,7	0,50
								2020	325	10,1	0,32
Среднее	492	76	2,41	Среднее	389	17,6	0,56	Среднее	475	6,4	0,20

Таким образом, результаты моделирования с помощью метода WRTDSKalman заслуживают доверия и могут быть использованы для получения среднесуточных

значений концентрации взвеси и расхода наносов, позволяющих оценить твердый сток в периоды повторяющихся сильных нагонных явлений.

Оценка вклада морского и речного факторов в перенос и седиментацию взвешенных наносов в дельте Дона

На основе значений расходов воды в период действия каждого нагона и максимальной величины подъема уровня воды выполнена оценка объема взвешенного материала, осевшего в дельте (табл. 3). Восстановленные с помощью статистической модели WRTDSKalman значения расходов взвешенных наносов суммированы за период нагона и сопоставлены с оценками осевшего в дельте материала (рис. 4). При этом не принимались во внимание возможные потери взвеси на участке от ст. Раздорская до вершины дельты и возможное поступление взвеси с притоками и с водосбора.

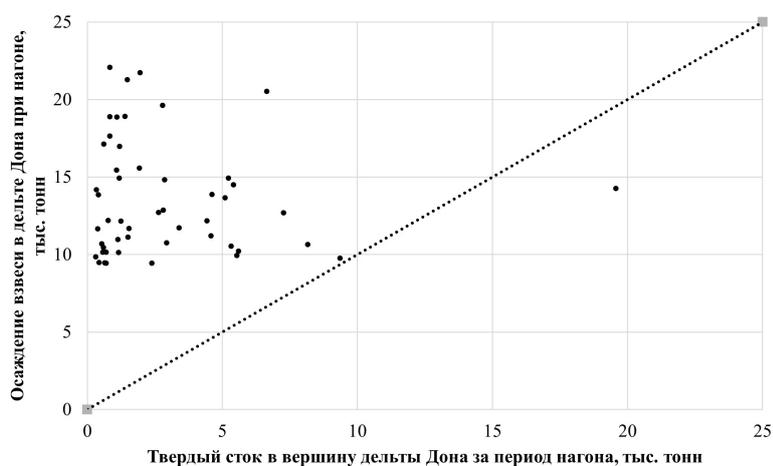


Рис. 4. Сопоставление твердого стока в вершину дельты Дона с объемом взвешенных наносов, которые потенциально осаждаются в дельте в период нагона.

Практически во всех случаях нагонов объем взвеси, поступившей с морскими водами и осевшей в дельте, в несколько раз (от 5 до 22) превышает твердый сток за период нагона. За исключением небольшого нагона в конце апреля 2018 г., когда расход превышал $1400 \text{ м}^3/\text{с}$. В целом, в маловодные годы, если интегрировать все значимые (более 1 м) нагоны, объем взвешенного материала, который потенциально мог оседать в дельте Дона, превышал годовой твердый сток (табл. 4 и рис. 5).

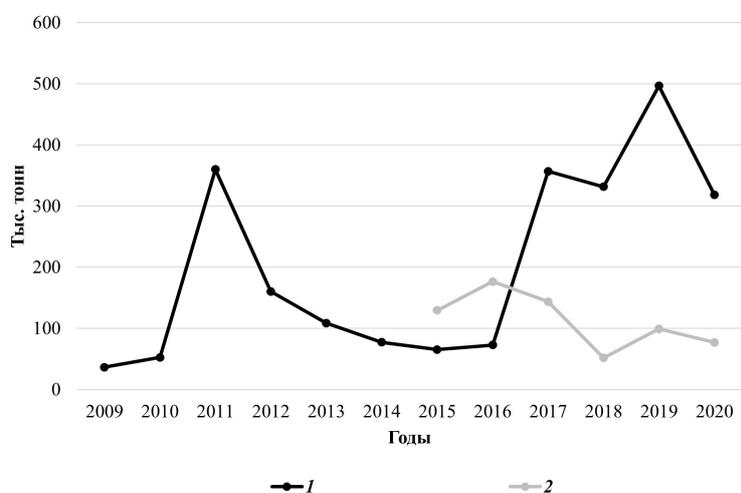


Рис. 5. Твердый сток (1) р. Дон (ст. Раздорская) и осаждение взвешенных наносов в дельте Дона при штормовых нагонах (2).

Таблица 3. Штормовые нагоны в дельту Дона в 2015–2020 гг. и показатели речного стока, рассчитанные по модели WRTDSKalman. Сопоставление величины твердого стока и оседания взвеси в дельте за период нагона

Даты нагона	Максимальный уровень нагона, м	Объем взвеси,		Средний расход воды, м ³ /с	Средняя концентрация взвеси, мг/л	Средний расход наносов, кг/с	Твердый сток за период нагона, тыс. т
		осевшей в дельте в результате нагона, тыс. т	в дельте				
03.04.2015–06.04.2015	1,09	11,65	377	2,98	1,11	0,38	
15.04.2015–17.04.2015	1,50	17,13	447	5,30	2,37	0,61	
18.04.2015–21.04.2015	1,53	17,64	473	4,98	2,40	0,83	
22.04.2015–25.04.2015	1,00	9,45	457	4,32	2,01	0,70	
13.05.2015–16.05.2015	1,09	10,70	425	3,65	1,53	0,53	
17.05.2015–18.05.2015	1,03	9,86	444	4,00	1,78	0,31	
30.11.2015–03.12.2015	1,37	14,94	456	7,40	3,42	1,18	
19.11.2015–22.11.2015	1,19	12,20	344	6,43	2,22	0,77	
05.12.2015–08.12.2015	1,19	12,15	421	8,70	3,61	1,25	
25.12.2015–28.12.2015	1,30	13,86	381	3,13	1,19	0,41	
18.01.2016–21.01.2016	1,07	10,46	364	5,00	1,74	0,60	
31.03.2016–03.04.2016	1,40	15,45	413	7,74	3,12	1,08	
19.03.2016–22.03.2016	1,60	18,92	394	10,13	4,03	1,39	
21.04.2016–24.04.2016	1,49	16,97	413	8,89	3,47	1,20	
26.04.2016–29.04.2016	1,32	14,17	382	2,55	0,97	0,34	
11.05.2016–14.05.2016	1,05	10,16	404	4,80	2,00	0,69	
18.05.2016–21.05.2016	1,00	9,46	440	4,33	1,88	0,65	
19.07.2016–22.07.2016	1,05	10,16	399	4,20	1,67	0,58	
18.09.2016–21.09.2016	1,00	9,49	394	3,18	1,27	0,44	
08.11.2016–11.11.2016	1,11	10,97	445	7,32	3,27	1,13	
12.11.2016–14.11.2016	1,05	10,13	445	10,06	4,45	1,15	
01.12.2016–04.12.2016	1,60	18,86	562	5,60	3,16	1,09	
06.12.2016–09.12.2016	1,73	21,29	589	7,30	4,30	1,49	
25.03.2017–28.03.2017	1,64	19,63	435	18,37	8,06	2,79	
29.03.2017–30.03.2017	1,16	11,67	482	18,35	8,89	1,54	
12.04.2017–15.04.2017	1,00	9,44	476	14,59	6,91	2,39	
16.04.2017–19.04.2017	1,23	12,72	486	15,80	7,62	2,63	
21.04.2017–24.04.2017	1,24	12,86	506	15,93	8,14	2,81	
21.06.2017–24.06.2017	1,37	14,93	481	31,04	15,12	5,22	
27.07.2017–30.07.2017	1,12	11,12	441	9,74	4,36	1,51	
28.10.2017–31.10.2017	1,69	20,54	537	37,76	19,23	6,65	
01.11.2017–02.11.2017	1,17	11,72	658	29,89	19,64	3,39	
21.12.2017–24.12.2017	1,60	18,89	468	5,12	2,40	0,83	
18.03.2018–21.03.2018	1,77	22,09	473	5,14	2,41	0,83	
19.04.2018–22.04.2018	1,36	14,28	1440	38,47	56,61	19,56	
23.12.2018–26.12.2018	1,41	15,59	474	11,31	5,57	1,92	
09.01.2019–12.01.2019	1,08	10,54	470	33,11	15,41	5,33	
26.02.2019–01.03.2019	1,13	11,20	546	23,53	13,25	4,58	
22.02.2019–25.02.2019	1,06	10,23	517	31,28	16,19	5,59	
20.03.2019–23.03.2019	1,10	10,76	570	14,80	8,50	2,94	
24.05.2019–27.05.2019	1,03	9,77	588	46,19	27,08	9,36	
03.08.2019–06.08.2019	1,04	9,95	521	30,40	16,00	5,53	
16.09.2019–19.09.2019	1,09	10,66	500	47,17	23,63	8,17	
20.09.2019–23.09.2019	1,23	12,70	521	40,51	21,01	7,26	
29.12.2019–01.01.2019	1,29	13,66	460	31,53	14,76	5,10	
23.01.2020–26.01.2020	1,36	14,84	342	24,40	8,28	2,86	
10.02.2020–13.02.2020	1,30	13,88	343	38,91	13,35	4,61	
23.02.2020–26.02.2020	1,34	14,50	361	43,40	15,65	5,41	
27.02.2020–29.02.2020	1,19	12,19	367	46,67	17,11	4,43	
15.04.2020–18.04.2020	1,75	21,73	300	18,87	5,66	1,96	

Таблица 4. Твердый сток р. Дон (ст. Раздорская) и осаждение взвешенных наносов в дельте Дона при штормовых нагонах

Год	Сток наносов, р. Дон, модель WRTDSKalman, тыс. т	Осаждение взвешенных наносов в дельте Дона, тыс. т
2009	36,7	–
2010	52,7	–
2011	360,0	–
2012	160,4	–
2013	108,8	–
2014	77,3	–
2015	65,2	129,6
2016	72,9	176,5
2017	356,8	143,5
2018	331,6	52,0
2019	496,6	99,5
2020	318,3	77,1

Заключение

Таким образом, с помощью метода взвешенных регрессий по времени, расходу воды и сезону WRTDS, входящего в арсенал программного комплекса EGRET, разработана статистическая модель для оценки потоков растворенных и взвешенных веществ с речным стоком. Разработанная статистическая модель нацелена на решение проблемы несоответствия регулярности сбора данных о расходе воды и данных о концентрации взвешенного вещества путем «восстановления» значений концентрации в дни без измерений на основе данных о наиболее «похожих» с точки зрения времени, расхода воды и сезона днях с измерениями. Показано, что результаты моделирования заслуживают доверия, могут быть улучшены с помощью метода WRTDSKalman и использованы для получения среднесуточных значений концентрации взвеси и расхода наносов, позволяющих оценить твердый сток в периоды повторяющихся сильных нагонных явлений. Сопоставление оценок твердого стока с оценками осевшего в дельте в результате сильных нагонов материала показало, что в отдельные маловодные годы объем взвешенного материала, приносимого со стороны моря, который потенциально мог оседать в дельте Дона, превышал годовой твердый сток.

Благодарности. Публикация подготовлена в рамках реализации проекта Российского научного фонда № 22-27-00818 «Влияние длительного маловодья и изменений климата (на рубеже XX–XXI веков) на динамику взвешенного вещества в устьевой области Дона». Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование разработка апробация)» № 501994.

Список литературы

- АИС ГМВО. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. — 2014. — URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обр. 10.10.2022).
- Бердников С. В., Бухмин Д. А., Гуськов Г. Е. и др. Экспедиционная деятельность ЮНЦ РАН на НИС "Профессор Панов" и НИС "Денеб" в Азовском, Черном и Каспийском морях в 2020 году // Итоги экспедиционных исследований в 2020 году в Мировом океане и внутренних водах. Тезисы докладов всероссийской научной конференции, Москва, 24–26 февраля 2021 года. — Севастополь : Морской гидрофизический институт РАН, 2021. — С. 136–144.
- Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В. Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2022. — Т. 503, № 1. — С. 65–70. — DOI: [10.31857/S2686739722030057](https://doi.org/10.31857/S2686739722030057).

- Бердников С. В., Швердяев И. В., Клещенков А. В. Анализ поступления взвешенных веществ в дельту Дона при нагонах на основе численного моделирования // *Материалы Международной молодежной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 4–6 сентября 2018 г.)* — Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2018. — С. 18–23.
- Бронфман А. М., Хлебников Е. П. Азовское море. Основы реконструкции. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. — С. 272.
- Варенцова Н. А., Киреева М. Б., Фролова Н. Л. *и др.* Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // *Водные ресурсы*. — 2020. — Т. 47, № 6. — С. 694–709. — DOI: [10.31857/S0321059620060152](https://doi.org/10.31857/S0321059620060152).
- Воловик С. П., Корпакова И. Г., Лавренова Е. А. *и др.* Экосистема Азовского моря: режим, продуктивность, проблемы управления. Ч. 1: Режим и продуктивность в период до зарегулирования стока рек. — Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2008. — С. 347.
- Воловик С. П., Корпакова И. Г., Лавренова Е. А. *и др.* Экосистема Азовского моря: режим, продуктивность, проблемы управления. Ч. 2: Климат и водные ресурсы бассейна во второй половине XX века. — Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2010. — С. 393.
- Георгиади А. Г., Милюкова И. П., Капущина Е. А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона // *Водные ресурсы*. — 2020. — Т. 47, № 6. — С. 651–662. — DOI: [10.31857/s0321059620060061](https://doi.org/10.31857/s0321059620060061).
- Гидрометеорологический справочник Азовского моря / под ред. А. А. Аксенова. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1962. — С. 856.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 5. Азовское море / под ред. Н. П. Гонтарева, А. И. Симонова. — Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1991.
- Джамалов Р. Г., Л.Фролова Н., Киреева М. Б. Современные изменения водного режима бассейна Дона // *Водные ресурсы*. — 2013. — Т. 40, № 6. — С. 544–556. — DOI: [10.7868/s0321059613060047](https://doi.org/10.7868/s0321059613060047).
- Клещенков А. В. Особенности твердого стока р. Дон в современный маловодный период // Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. — СПб : Научное издание, 2018. — С. 591–594.
- 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. — Т. 19, № 1. — С. 29–39. — DOI: [10.7868/25000640230104](https://doi.org/10.7868/25000640230104).
- Лихтанская Н. В., Бердников С. В. Использование программного комплекса EGRET для оценки потоков взвешенных веществ с речным стоком // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. — 2022. — Т. 1, № 7. — С. 32–37. — DOI: [10.23885/2500-395X-2022-1-7-32-37](https://doi.org/10.23885/2500-395X-2022-1-7-32-37).
- Матишов Г. Г. Климат, водные ресурсы и реконструкция гидротехнических сооружений с учетом интересов населения, рыболовства и сельского хозяйства, судоходства и энергетики: Доклад на расширенном заседании Президиума Южного научного центра РАН. — ЮНЦ РАН, 2016. — С. 64.
- Михайлов В. Н., Михайлова М. В. Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // *Водные ресурсы*. — 2015. — Т. 42, № 4. — С. 367–379. — DOI: [10.7868/s0321059615040082](https://doi.org/10.7868/s0321059615040082).
- Родионов Н. А. Гидрология устьевой области Дона. — Москва : Гидрометеиздат, 1958. — С. 95.
- Сорокина В. В. Особенности терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. — 2006. — С. 216.
- Сорокина В. В., Бердников С. В. Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море // *Океанология*. — 2008. — Т. 48, № 3. — С. 456–466.
- Сорокина В. В., Ивлиева О. В., Лурье П. М. Динамика стока на устьевых участках рек Дон и Кубань во второй половине XX века // *Вестник Южного научного центра*. — 2006. — Т. 2, № 2. — С. 58–67. — DOI: [10.23885/1813-4289-2006-2-2-58-67](https://doi.org/10.23885/1813-4289-2006-2-2-58-67).
- Швердяев И. В., 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](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-5-582-594).
- Ator S. W., García A. M., Schwarz G. E., *et al.* Toward Explaining Nitrogen and Phosphorus Trends in Chesapeake Bay Tributaries, 1992–2012 // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. — 2019. — Vol. 55, no. 5. — P. 1149–1168. — DOI: [10.1111/1752-1688.12756](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12756).

- Chanat J. G., Yang G. Exploring Drivers of Regional Water-Quality Change Using Differential Spatially Referenced Regression-A Pilot Study in the Chesapeake Bay Watershed // *Water Resources Research*. — 2018. — Vol. 54, no. 10. — P. 8120–8145. — DOI: [10.1029/2017wr022403](https://doi.org/10.1029/2017wr022403).
- EGRET. Exploration and Graphics for RivEr Trends. — URL: <http://usgs-r.github.io/EGRET/> (visited on 10/10/2022).
- Fanelli R. M., Blomquist J. D., Hirsch R. M. Point sources and agricultural practices control spatial-temporal patterns of orthophosphate in tributaries to Chesapeake Bay // *Science of The Total Environment*. — 2019. — Vol. 652. — P. 422–433. — DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.10.062](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.062).
- 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](https://doi.org/10.1038/516031a).
- Hirsch R. M. Flux of nitrogen, phosphorus, and suspended sediment from the Susquehanna River basin to the Chesapeake Bay during Tropical Storm Lee, September 2011, as an indicator of the effects of reservoir sedimentation on water quality. — U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2012. — P. 17.
- Hirsch R. M., Moyer D. L., Archfield S. A. Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (WRTDS), with an Application to Chesapeake Bay River Inputs // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. — 2010. — Vol. 46, no. 5. — P. 857–880. — DOI: [10.1111/j.1752-1688.2010.00482.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00482.x).
- Lee C. J., Hirsch R. M., Crawford C. G. An evaluation of methods for computing annual water-quality loads. — US Geological Survey, 2019. — P. 58. — DOI: [10.3133/sir20195084](https://doi.org/10.3133/sir20195084).
- Meter K. J. V., Basu N. B., Cappellen P. V. Two centuries of nitrogen dynamics: Legacy sources and sinks in the Mississippi and Susquehanna River Basins // *Global Biogeochemical Cycles*. — 2017. — Vol. 31, no. 1. — P. 2–23. — DOI: [10.1002/2016gb005498](https://doi.org/10.1002/2016gb005498).
- Rankinen K., Keinänen H., Bernal J. E. C. Influence of climate and land use changes on nutrient fluxes from Finnish rivers to the Baltic Sea // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. — 2016. — Vol. 216. — P. 100–115. — DOI: [10.1016/j.agee.2015.09.010](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.010).
- Stackpoole S. M., Stets E. G., Clow D. W., *et al.* Spatial and temporal patterns of dissolved organic matter quantity and quality in the Mississippi River Basin, 1997–2013 // *Hydrological Processes*. — 2016. — Vol. 31, no. 4. — P. 902–915. — DOI: [10.1002/hyp.11072](https://doi.org/10.1002/hyp.11072).
- Strickling H. L., Obenour D. R. Leveraging Spatial and Temporal Variability to Probabilistically Characterize Nutrient Sources and Export Rates in a Developing Watershed // *Water Resources Research*. — 2018. — Vol. 54, no. 7. — P. 5143–5162. — DOI: [10.1029/2017wr022220](https://doi.org/10.1029/2017wr022220).
- Zhang Q., Blomquist J. D. Watershed export of fine sediment, organic carbon, and chlorophyll-a to Chesapeake Bay: Spatial and temporal patterns in 1984–2016 // *Science of The Total Environment*. — 2018. — Vol. 619/620. — P. 1066–1078. — DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.10.279](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.279).
- Zhang Q., Hirsch R. M. River Water-Quality Concentration and Flux Estimation Can be Improved by Accounting for Serial Correlation Through an Autoregressive Model // *Water Resources Research*. — 2019. — Vol. 55, no. 11. — P. 9705–9723. — DOI: [10.1029/2019wr025338](https://doi.org/10.1029/2019wr025338).
- Zhang Q., Hirsch R. M., Ball W. P. Long-Term Changes in Sediment and Nutrient Delivery from Conowingo Dam to Chesapeake Bay: Effects of Reservoir Sedimentation // *Environmental Science & Technology*. — 2016. — Vol. 50, no. 4. — P. 1877–1886. — DOI: [10.1021/acs.est.5b04073](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04073).
- Zolkos S., Zhulidov A. V., Gurtovaya T. Y., *et al.* Multidecadal declines in particulate mercury and sediment export from Russian rivers in the pan-Arctic basin // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2022. — Vol. 119, no. 14. — DOI: [10.1073/pnas.2119857119](https://doi.org/10.1073/pnas.2119857119).

SOLID RUNOFF OF THE DON RIVER AND SUSPENDED MATTER FLOW INTO THE DELTA DURING SURGES: STATISTICAL MODELING AND COMPARISON IN THE LOW WATER PERIOD

N. V. Likhtanskaya*¹ , S. V. Berdnikov¹ , A. V. Kleschenkov¹ ¹Southern Scientific Center RAS, Rostov-on-Don, Russia

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

Statistical modeling of the Don River solid runoff based on water discharge and turbidity measurements obtained at the hydrological station in the village of Razdorskaya for the twelve-year period 2009–2020 was carried out. The WRTDS (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season) and WRTDSKalman (WRTDS with Kalman filtering) methods were applied. The developed statistical model is aimed at solving the problem of the imbalance between the regularity of collecting data on water discharge and data on the concentration of suspended matter by “restoring” the concentration values on days without measurements based on data on the most “similar” days with measurements in terms of time, discharge and season and does not claim to describe a relationship between the concentration of the constituent of interest and discharge. The quality of the developed statistical model and its modification were checked. The average daily concentrations and fluxes of suspended matter were compared with estimates of the volumes of suspended material deposited during periods of recurring strong surge phenomena. A comparative assessment of sea and river factors contributions to the transport and sedimentation of suspended matter in the Don River delta was fulfilled.

Keywords: suspended matter, sediment runoff, surge phenomena, Don River estuary area, statistical modeling

Received: 3 February 2023

Accepted: 13 June 2023

Published: 16 November 2023



© 2023. The Authors.

Citation: Likhtanskaya, N. V., S. V. Berdnikov, and A. V. Kleschenkov (2023), 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*, 23, ES4010, <https://doi.org/10.2205/2023ES000856>

References

- AIS GMVO. Automated information system for state monitoring of water bodies. — 2014. — (in Russian). <https://gmvo.skniivh.ru>.
- Ator S. W., García A. M., Schwarz G. E., *et al.* Toward Explaining Nitrogen and Phosphorus Trends in Chesapeake Bay Tributaries, 1992–2012 // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. — 2019. — Vol. 55, no. 5. — P. 1149–1168. — DOI: [10.1111/1752-1688.12756](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12756).
- Berdnikov C. V., Bukhmin D. A., Guskov G. E., *et al.* Expedition activities of the SSC RAS on the R/V "Professor Panov" and R/V "Deneb" in the Azov, Black and Caspian Seas in 2020 // *Results of expeditionary research in 2020 in the World Ocean and inland waters. Abstracts of the All-Russian Scientific Conference, Moscow, February 24–26, 2021*. — Sevastopol : Marine Hydrophysical Institute RAS, 2021. — P. 136–144. — (in Russian).
- Berdnikov C. V., Dashkevich L. V., Kulygin V. V. New state of the hydrological regime of the Sea of Azov in the 21st century // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Geosciences*. — 2022. — Vol. 503, no. 1. — P. 65–70. — DOI: [10.31857/S2686739722030057](https://doi.org/10.31857/S2686739722030057). — (in Russian).

- Berdnikov C. V., Sheverdyayev I. V., Kleshchenkov A. V. Analysis of suspended matter influx into the Don Delta during surges based on numerical simulation // Proceedings of the International Youth Scientific Conference in memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences D. G. Matishov (Rostov-on-Don, September 4–6, 2018). — Rostov-on-Don : SSC RAS, 2018. — P. 18–23. — (in Russian).
- Bronfinan A. M., Khlebnikov E. P. Sea of Azov. Fundamentals of Reconstruction. — Leningrad : Hydrometeoizdat, 1985. — P. 272. — (in Russian).
- Chanat J. G., Yang G. Exploring Drivers of Regional Water-Quality Change Using Differential Spatially Referenced Regression-A Pilot Study in the Chesapeake Bay Watershed // Water Resources Research. — 2018. — Vol. 54, no. 10. — P. 8120–8145. — DOI: [10.1029/2017wr022403](https://doi.org/10.1029/2017wr022403).
- Dzhamalov R. G., Frolova N. L., Kireeva M. B. Modern changes in the water regime of the Don basin // Water resources. — 2013. — Vol. 40, no. 6. — P. 544–556. — DOI: [10.7868/s0321059613060047](https://doi.org/10.7868/s0321059613060047). — (in Russian).
- EGRET. Exploration and Graphics for RivEr Trends. — (date of access: 10.10.2022). <http://usgs-r.github.io/EGRET/>.
- Fanelli R. M., Blomquist J. D., Hirsch R. M. Point sources and agricultural practices control spatial-temporal patterns of orthophosphate in tributaries to Chesapeake Bay // Science of The Total Environment. — 2019. — Vol. 652. — P. 422–433. — DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.10.062](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.062).
- Georgiadi A. G., Milyukova I. P., Kashutina E. A. Modern and scenario changes in river flow in the Don basin // Water resources. — 2020. — Vol. 47, no. 6. — P. 651–662. — DOI: [10.31857/s0321059620060061](https://doi.org/10.31857/s0321059620060061). — (in Russian).
- 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](https://doi.org/10.1038/516031a).
- Hirsch R. M. Flux of nitrogen, phosphorus, and suspended sediment from the Susquehanna River basin to the Chesapeake Bay during Tropical Storm Lee, September 2011, as an indicator of the effects of reservoir sedimentation on water quality. — U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2012. — P. 17.
- Hirsch R. M., Cicco L. A. D. User guide to Exploration and Graphics for RivEr Trends (EGRET) and dataRetrieval: R packages for hydrologic data. — U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2015. — DOI: [10.3133/tm4A10](https://doi.org/10.3133/tm4A10).
- Hirsch R. M., Moyer D. L., Archfield S. A. Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (WRTDS), with an Application to Chesapeake Bay River Inputs // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. — 2010. — Vol. 46, no. 5. — P. 857–880. — DOI: [10.1111/j.1752-1688.2010.00482.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00482.x).
- Hydrometeorological reference book of the Sea of Azov / ed. by A. A. *Aksenova*. — Leningrad : Hydrometeoizdat, 1962. — P. 856. — (in Russian).
- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Volume 5. Sea of Azov / ed. by N. P. *Goptareva*, A. I. *Simonova*. — St. Petersburg : Hydrometeoizdat, 1991. — (in Russian).
- Kleshchenkov A. V. Features of the solid runoff of the river. Don in the modern dry period // THIRD VINOGRADOV READINGS. FACETS OF HYDROLOGY. Collection of reports of the international scientific conference in memory of the outstanding Russian hydrologist Yuri Borisovich Vinogradov. — SPb : High technology, 2018. — P. 591–594. — (in Russian).
- Kleshchenkov A. V., Gerasyuk V. S., Kulygin V. V., *et al.* Suspended matter of waters from the Tsimlyansk Reservoir to the Taganrog Bay during the period of prolonged low water in 2006–2020 // Science of the South of Russia. — 2023. — Vol. 19, no. 1. — P. 29–39. — DOI: [10.7868/25000640230104](https://doi.org/10.7868/25000640230104). — (in Russian).
- Lee C. J., Hirsch R. M., Crawford C. G. An evaluation of methods for computing annual water-quality loads. — US Geological Survey, 2019. — P. 58. — DOI: [10.3133/sir20195084](https://doi.org/10.3133/sir20195084).
- Likhtanskaya N. V., Berdnikov S. V. EGRET software application to evaluation of suspended solids flows with river flow // Ecology. Economy. Informatics. System analysis and mathematical modeling of ecological and economic systems. — 2022. — Vol. 1, no. 7. — P. 32–37. — DOI: [10.23885/2500-395X-2022-1-7-32-37](https://doi.org/10.23885/2500-395X-2022-1-7-32-37). — (in Russian).
- Matishov G. G. Climate, water resources and reconstruction of hydraulic structures taking into account the interests of the population, fisheries and agriculture, shipping and energy: Report at an extended meeting of the Presidium of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. — SSC RAS, 2016. — P. 64. — (in Russian).
- Matishov G. G., Gargopa Y. M., Berdnikov S. V., *et al.* Regularities of ecosystem processes in the Sea of Azov. — Moscow : Nauka, 2006. — P. 304. — (in Russian).
- Meter K. J. V., Basu N. B., Cappellen P. V. Two centuries of nitrogen dynamics: Legacy sources and sinks in the Mississippi and Susquehanna River Basins // Global Biogeochemical Cycles. — 2017. — Vol. 31, no. 1. — P. 2–23. — DOI: [10.1002/2016gb005498](https://doi.org/10.1002/2016gb005498).
- Mikhailov V. N., Mikhailova M. V. Influence of long-term changes in marine factors on river mouths // Water resources. — 2015. — Vol. 42, no. 4. — P. 367–379. — DOI: [10.7868/s0321059615040082](https://doi.org/10.7868/s0321059615040082). — (in Russian).

- Rankinen K., Keinänen H., Bernal J. E. C. Influence of climate and land use changes on nutrient fluxes from Finnish rivers to the Baltic Sea // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. — 2016. — Vol. 216. — P. 100–115. — DOI: [10.1016/j.agee.2015.09.010](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.010).
- Rodionov N. A. Hydrology of the mouth area of the Don. — Moscow : Hydrometeoizdat, 1958. — P. 95. — (in Russian).
- Sheverdyayev I. V., Kleshchenkov A. V. Revealing the Surge Phenomena Contribution of the Heavy Metals Inflow to the River Don Delta // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. — 2020. — Vol. 36, no. 5. — P. 582–594. — DOI: [10.22449/0233-7584-2020-5-582-594](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-5-582-594). — (in Russian).
- Sorokina V. V. Features of terrigenous sedimentation in the Sea of Azov in the second half of the 20th century. — 2006. — P. 216. — (in Russian).
- Sorokina V. V., Berdnikov S. V. Mathematical modeling of terrigenous sedimentation in the Sea of Azov // *Oceanology*. — 2008. — Vol. 48, no. 3. — P. 456–466. — (in Russian).
- Sorokina V. V., Ivlieva O. V., Lurie P. M. River flow alteration in the Don and the Kuban mouths, the second part of XX century // *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. — 2006. — Vol. 2, no. 2. — P. 58–67. — DOI: [10.23885/1813-4289-2006-2-2-58-67](https://doi.org/10.23885/1813-4289-2006-2-2-58-67). — (in Russian).
- Stackpoole S. M., Stets E. G., Clow D. W., *et al.* Spatial and temporal patterns of dissolved organic matter quantity and quality in the Mississippi River Basin, 1997–2013 // *Hydrological Processes*. — 2016. — Vol. 31, no. 4. — P. 902–915. — DOI: [10.1002/hyp.11072](https://doi.org/10.1002/hyp.11072).
- Strickling H. L., Obenour D. R. Leveraging Spatial and Temporal Variability to Probabilistically Characterize Nutrient Sources and Export Rates in a Developing Watershed // *Water Resources Research*. — 2018. — Vol. 54, no. 7. — P. 5143–5162. — DOI: [10.1029/2017wr022220](https://doi.org/10.1029/2017wr022220).
- Varentsova N. A., Kireeva M. B., Frolova N. L., *et al.* Forecasting water inflow into the Tsimlyansk reservoir during spring flood under current climate conditions: Problems and Reproducibility // *Water resources*. — 2020. — Vol. 47, no. 6. — P. 694–709. — DOI: [10.31857/S0321059620060152](https://doi.org/10.31857/S0321059620060152). — (in Russian).
- Volovik C. P., Korpakova I. G., Lavrenova E. A., *et al.* Ecosystem of the Sea of Azov: regime, productivity, management problems. Part 1: Regime and productivity in the period before river flow regulation. — Krasnodar : Kuban State University, 2008. — P. 347. — (in Russian).
- Volovik C. P., Korpakova I. G., Lavrenova E. A., *et al.* Ecosystem of the Sea of Azov: regime, productivity, management problems. Part 2: Climate and water resources of the basin in the second half of the 20th century. — Krasnodar : Kuban State University, 2010. — P. 393. — (in Russian).
- Zhang Q., Blomquist J. D. Watershed export of fine sediment, organic carbon, and chlorophyll-a to Chesapeake Bay: Spatial and temporal patterns in 1984–2016 // *Science of The Total Environment*. — 2018. — Vol. 619/620. — P. 1066–1078. — DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.10.279](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.279).
- Zhang Q., Hirsch R. M. River Water-Quality Concentration and Flux Estimation Can be Improved by Accounting for Serial Correlation Through an Autoregressive Model // *Water Resources Research*. — 2019. — Vol. 55, no. 11. — P. 9705–9723. — DOI: [10.1029/2019wr025338](https://doi.org/10.1029/2019wr025338).
- Zhang Q., Hirsch R. M., Ball W. P. Long-Term Changes in Sediment and Nutrient Delivery from Conowingo Dam to Chesapeake Bay: Effects of Reservoir Sedimentation // *Environmental Science & Technology*. — 2016. — Vol. 50, no. 4. — P. 1877–1886. — DOI: [10.1021/acs.est.5b04073](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04073).
- Zolkos S., Zhulidov A. V., Gurtovaya T. Y., *et al.* Multidecadal declines in particulate mercury and sediment export from Russian rivers in the pan-Arctic basin // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2022. — Vol. 119, no. 14. — DOI: [10.1073/pnas.2119857119](https://doi.org/10.1073/pnas.2119857119).