

## **Результаты проекта в 2022-2023 гг.**

**Подзадача 1.1 (2022). Систематизация данных о твердом и жидком химическом стоке р. Дон в период 2007-2020 гг. по данным экспедиционных исследований участников проекта на участке Цимлянское водохранилище-Нижний Дон-дельта Дона - восточная часть Таганрогского залива.**

База данных (БД), сформированная участниками проекта А.Клещенковым и В.Герасюк по результатам собственных полевых наблюдений в период с 2006 по 2020 гг. и предоставленная в распоряжение гранта, использована для анализа пространственно-временной изменчивости концентрации общего взвешенного вещества (TSS, мг/л), взвешенного органического вещества (POC, мг/л), хлорофилла-А (Chl-A, мкг/л) и растворенного органического углерода (DOC, мг/л) в водном континууме от Цимлянского водохранилища до Таганрогского залива, разделенного на четыре основных района: 1 – Таганрогский залив, 2 – дельта Дона, 3 – Нижний Дон, 4 – Цимлянское водохранилище.

Результаты опубликованы в статье Клещенков А.В., Герасюк В.В., Кулыгин В.В., Бердников С.В. Взвешенное вещество вод от Цимлянского водохранилища до Таганрогского залива в период длительного маловодья 2006 - 2020 гг. // Наука Юга России. 2022. Т. 19. № 1. С. 29-39. <https://doi.org/10.7868/25000640230104>

**Подзадача 1.2 (2022). Оценка твердого стока р. Дон в периоды повторяющихся сильных нагонных явлений на основе статистического моделирования**

Выполнено статистическое моделирование твердого стока р. Дон на основе данных измерений расхода и мутности воды, полученных на гидрологическом посту в станице 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), осуществлена проверка качества разработанной статистической модели и ее модификации.

Для 50 нагонов воды в дельту Дона с максимальным превышением уровня от 1 до 1,78 м в период 2015-май 2020 гг. выполнена сравнительная оценка вкладов морского и речного факторов в перенос и седиментацию взвешенного материала. 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 в Дону превышал 1400 м<sup>3</sup>/с.

Сопоставление оценок годового 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.

Результаты опубликованы в статье Лихтанская Н.В., Бердников С.В., Клещенко 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. ES4010. <https://doi.org/10.2205/2023ES000856>.

### **Подзадача 1.2 (2023). Оценка стока органического вещества и соединений наиболее опасных тяжелых металлов с рекой Дон в период маловодья**

На основе данных экспедиционных исследований ЮНЦ РАН, выполненных в 2007–2020 гг. на нижнем Дону, с использованием метода статистического моделирования, обеспечивающего одну из самых точных количественных оценок концентраций и потоков веществ на сегодняшний день, WRTDS (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season — Взвешенные регрессии по времени, расходу и сезону) с фильтрацией Калмана, позволившего заполнить пропуски в рядах наблюдаемых величин, получены новые количественные оценки стока растворенного органического углерода, хлорофилла-а, общего взвешенного вещества и взвешенного органического углерода с водами реки Дон в Азовское море (метод WRTDS реализован в программном комплексе EGRET, поскольку его пока нет в арсенале методов запланированного программного комплекса LOADEST).

Сток органических веществ нижнего Дона в современный период составил 357 ( $\pm 56$ ) тыс. тонн/год, при этом доминирует их растворенная форма (DOC). За весь период инструментальных наблюдений величина стока органических веществ мало менялась (за исключением периода повышенной антропогенной нагрузки в 1980–2000-х гг.), но при этом произошла существенная перестройка во внутригодовом распределении — сток DOC равномерно распределен в течение года, во время «высокой воды», вопреки ожиданиям, фиксируются низкие концентрации (половодье 2018 г.), что при расчете стока не дает высоких значений. Сток взвешенного органического вещества (ПОМ) находится в прямой зависимости от твердого стока, который радикально сократился во второй половине XX — начале XXI вв. (на 91 % от величины в условно-естественный период). В последнее время наблюдается увеличение доли органики в составе общей взвеси. Это обстоятельство приводит к тому, что абсолютное значение стока ПОМ на протяжении прошлого столетия и современного периода существенно не изменилось. Значимых статистических зависимостей концентрации Chl-а от водности реки обнаружено не было. Сделана оценка доли легкоокисляемого взвешенного органического вещества, которая может варьироваться от 10 до 100 %, в среднем составляя 30 % от значений ПОМ.

Результаты выполненных исследований оформлены в виде рукописи статьи В.С. Герасюк, Н.В.Лихтанская, В.В.Сорокина, С.В. Бердников. Сток органических веществ с рекой Дон в Азовское море в маловодный период 2007–2020 гг. и направлены в журнал «Водные ресурсы».

Рассматривались следующие соединения тяжелых металлов, относящиеся к группе наиболее опасных – никель, медь, свинец и кадмий. На основе данных о содержании этих тяжелых металлов

в р. Дон в растворенной и взвешенной формах, полученных участниками проекта при выполнении научно-исследовательской работы «Интегральная оценка эколого-геохимического состояния аквальных систем устьевой области Дона» (договор №16/2015/РГО-РФФИ от «04» августа 2016 г.), выполнена оценка стока этих соединений с водами реки Дон в устьевую область в растворенной и взвешенной формах в период 2009-2020 г. (табл.1, рис.1).

**Таблица 1. Сток соединений тяжелых металлов с водами реки Дон в период маловодья 2009-2020 гг.**

Год	Растворенная форма, тонны/год	Взвешенная форма, тонны/год	Валовая форма, тонны/год	Доля взвешенной формы, %	Растворенная форма, тонны/год	Взвешенная форма, тонны/год	Валовая форма, тонны/год	Доля взвешенной формы, %
2009	40,5	1,4	41,9	3,3	135,9	1,1	137,0	0,8
2010	48,6	2,0	50,6	4,0	163,2	1,5	164,7	0,9
2011	36,5	13,7	50,2	27,3	122,6	10,4	133,0	7,8
2012	45,5	6,1	51,5	11,8	152,6	4,7	157,2	3,0
2013	43,8	4,1	47,9	8,6	146,9	3,2	150,1	2,1
2014	40,7	2,9	43,6	6,7	136,6	2,2	138,8	1,6
2015	31,4	2,5	33,9	7,3	105,3	1,9	107,2	1,8
2016	35,5	2,8	38,3	7,2	119,2	2,1	121,4	1,7
2017	41,5	13,6	55,1	24,6	139,3	10,3	149,7	6,9
2018	65,9	12,6	78,5	16,1	221,2	9,6	230,8	4,2
2019	45,0	18,9	63,9	29,5	151,1	14,4	165,5	8,7
2020	28,8	12,1	40,9	29,6	96,6	9,3	105,9	8,7
	Свинец				Кадмий			
2009	1,4	1,1	2,6	44,0	2,02	0,01	2,04	0,5
2010	1,7	1,6	3,4	48,5	2,43	0,02	2,45	0,6
2011	1,3	11,2	12,5	89,5	1,83	0,11	1,93	5,6
2012	1,6	5,0	6,6	75,4	2,27	0,05	2,32	2,1
2013	1,6	3,4	4,9	68,3	2,19	0,03	2,22	1,5
2014	1,5	2,4	3,8	62,2	2,03	0,02	2,06	1,1
2015	1,1	2,0	3,1	64,3	1,57	0,02	1,59	1,2
2016	1,3	2,3	3,5	64,1	1,78	0,02	1,80	1,2
2017	1,5	11,1	12,5	88,2	2,07	0,11	2,18	4,9
2018	2,4	10,3	12,6	81,4	3,29	0,10	3,39	2,9
2019	1,6	15,4	17,0	90,5	2,25	0,15	2,40	6,2
2020	1,0	9,9	10,9	90,6	1,44	0,10	1,54	6,2



**Рисунок 1. Сток соединений тяжелых металлов с водами реки Дон в период маловодья 2009-2020 гг.**

В дельте Дона, для всех исследуемых ТМ установлено повышенное содержание доли растворенных форм, для никеля, меди и кадмия она является ведущей, что связано с равнинным течением реки и низким твердым стоком реки. Лишь для свинца основной формой миграции является взвешенная, но ее доля значительно меньше, чем в реках мира. Главной причиной низкой доли взвешенных форм является малый твердый сток дельты. Чем меньше мутность потока, тем большую роль в соотношении миграционных форм играют растворенные формы. Мировые оценки проводятся для средней мутности рек в 460 мг/л, тогда как максимальная мутность в вершине дельты значительно ниже (23 мг/л), то есть в 20 раз меньше.

Межгодовая изменчивость различных миграционных форм тяжелых металлов (рис. 1) демонстрирует, что в динамике растворенных форм отчетливо прослеживается влияние 2018 года, характеризующегося интенсивным половодьем: возрастает доля растворенных форм элементов, что связано с поступлением в дельту значительных объемов загрязненных сточных вод с прилегающих сельскохозяйственных территорий и сбросов с Цимлянского водохранилища. Кроме того, весной в дельте отмечают повышенные скорости течения и расходы воды, что способствует переносу более крупных взвешенных частиц, которые хуже сорбируют тяжелые металлы.

**Подзадача 2.1 (2022). Анализ условий проникновения соленых вод со стороны моря в дельту Дона при штормовых нагонах по данным наблюдений в период 2007-2020 гг.**

По данным наблюдений за уровнем и соленостью воды на гидрометеопостах ЮНЦ РАН, установленных в дельте Дона, изучено 38 зафиксированных случаев проникновения осолоненных вод в период с марта 2017 по апрель 2021 года. Выявлены два типа процесса проникновения таких

вод в дельту Дона: тип 1 - при высоком начальном уровне стояния воды в дельте от 0,24 м БС до 1,02 м БС и тип 2 - при низком стоянии уровня от - 0,67 м БС до 0,20 м БС. Выделено три характерных типа синоптических процессов, при которых возможно проникновение осолоненных вод в дельту Дона.

Результаты представлены в отчете за 2022 г, частично опубликованы в материалах IV Международной научной конференции «Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии) («Опасные явления – IV») памяти члена- корреспондента РАН Д.Г. Матишова: г. Ростов-на-Дону, 5–9 сентября 2022 г.). – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2022. А.В.Клещенков, В.А. Костюк «К вопросу исследования закономерностей проникновения соленых вод в дельту Дона со стороны моря». По результатам подготовлена рукопись статьи А.В.Клещенков, В.А. Костюк «Анализ условий формирования интрузии соленых вод в дельту Дона» для Морского гидрофизического журнала, находится в стадии завершения оформления по правилам журнала.

**Подзадача 2.2 (2022-2023). Математическое моделирование гидрологического режима устьевой области Дона при различных расходах воды и сгонно-нагонных колебаниях уровня в Таганрогском заливе.**

Разработанная ранее (в период 2016-2020 гг.) участниками проекта гидрологическая модель дельты Дона на основе программного комплекса HEC-RAS 6.2 расширена и применена для математического моделирования гидрологического режима устьевой области Дона при различных расходах воды и сгонно-нагонных колебаниях уровня в Таганрогском заливе.

Гидрологическая модель дельты Дона модифицирована в гидрологическую модель устьевой области Дона: расчётная область продлена от вершины дельты до ст. Раздорской. Здесь расположен пункт гидрологических измерений, так называемый замыкающий створ на р. Дон, поэтому расход воды в р. Дон перед расчётной областью принимается по значениям расходов воды в ст. Раздорской. Кроме этого, расширена расчётная область в Таганрогском заливе.

Проведена работа по настройке параметров модели по данным наблюдений, выполненных 13-15 сентября 2016 г. и последующая проверка по данным наблюдений 22-23 сентября 2014 г.

На втором этапе выполнения проекта (в 2023 г.) для 6 нагонов разной обеспеченности (табл. 2) выполнен анализ гидрологического режима в устьевой области. Для каждого случая нагонов было выбрано время наступления максимального уровня. В сценариях проводились расчёты гидродинамики в течении 2 суток до максимального уровня, и 2 суток после. Таким образом, все сценарии имели одинаковую продолжительность (4 суток), посередине которой (на шаге 288) находился максимальный уровень нагона. Каждый сценарий представлял собой конкретный случай динамики уровня на посту х. Донской и расхода в Дону в ст. Раздорской. Шаг расчёта составлял 10 минут (1/6 часа).

**Таблица 2. Характеристики расчетных сценариев нагонов в дельте Дона**

Номер нагона	Номер нагона из таблицы нагонов (табл. 5)	Максимум уровня от средне многолетнего, м	Дата начала	Дата окончания	Средний расход воды в ст., м <sup>3</sup> /с	Обеспеченность, %	Концентрация взвешенных веществ в водных массах, поступающих в устьевую область из Таганрогского залива, мг/л
1	01	1,77	18/03/2018	22/03/2018	507	27	120
2	02	1,75	14/04/2020	18/04/2020	300	29	120
3	13	1,4	30/03/2016	3/4/2016	407	54	100
4	16	1,36	19/04/2018	23/04/2018	1462	59	70
5	40	1,06	22/02/2019	26/02/2019	525	85	50
6	3,7	3,7	23/09/2014	25/09/2014	541	0,8	160

Примечание 1. Концентрация взвешенного вещества в водных массах, поступающих в устьевую область из Таганрогского залива (мг/л) оценивалась по материалам морских научных исследований в дельте Дона и Таганрогском заливе, в ходе которых определялась концентрация взвешенного вещества турбидиметром и гравиметрическим способом на фильтрах для нагонов-аналогов, а также по описанным в литературе зависимостям взмучивания донных отложений в Таганрогском заливе от силы ветра и волнения моря.

### Сценарий 01 (см. таблицу нагонов 5).

Расчёт сценария 01 проводился между 16:40 19 марта и 16:40 23 марта 2018 г. с максимальным уровнем 1,769 м 16:30 21 марта (рис. 2). Расход в Дону в эти даты сначала снижался с 514 м<sup>3</sup>/с (19 марта) до 432 м<sup>3</sup>/с (21 марта), затем возрастал до 631 м<sup>3</sup>/с 23 марта. Колебания уровня начались уровня ниже обычного (-0,7 м). На графике хода уровня наблюдаются 3 волны роста, сменившихся падениями - первая в ночь на 20 марта примерно на 1 м, вторая в течении 21 марта до максимального нагонного уровня (1,77 м), третья во второй половине 22 марта примерно на 0,5 м. Возможно волны связаны с наложением ветрового нагона на сейшевые колебания на фоне среднего расхода воды в Дону.

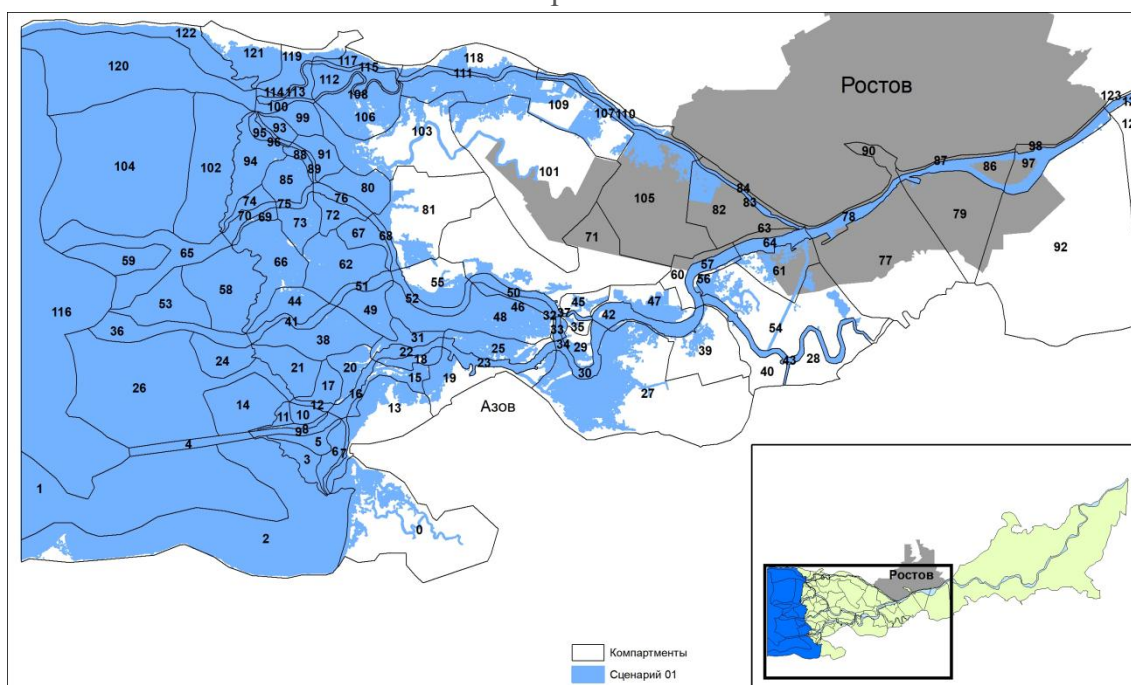
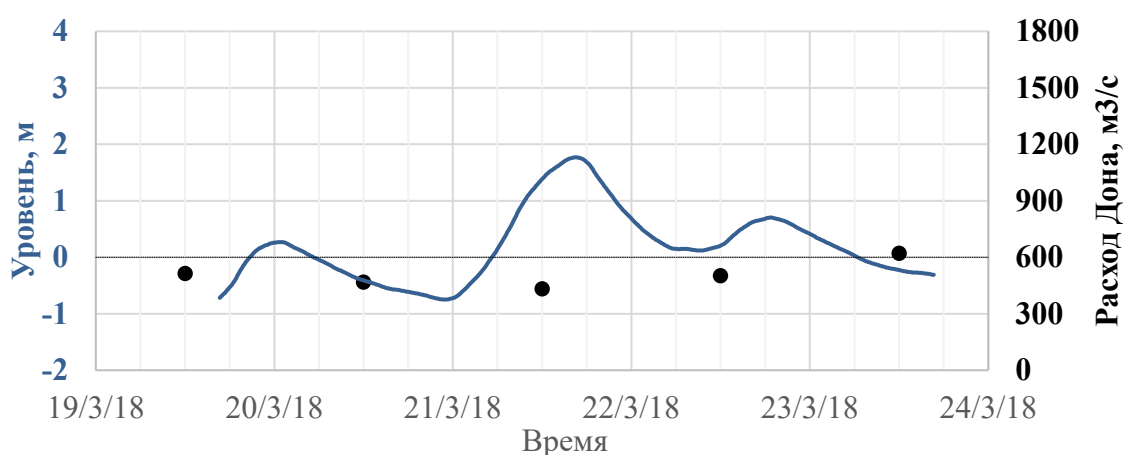


Рисунок 2. Сценарий 01. Динамика уровня в х. Донской и расхода в Дону по ст. Раздорской (вверху), область затопления в пределах расчётной области гидрологической модели (внизу)

### Сценарий 02 (см. таблицу нагонов 5).

Расчёт сценария 02 проводился между 10:00 15 апреля и 10:00 19 апреля 2020 г. с максимальным уровнем 1,75 м в 9:50 17 апреля (рис. 3). Расход в Дону в эти даты был стабильно очень низким - около 300 м<sup>3</sup>/с. Колебания уровня начались с 0,43 м. На графике хода уровня выделяется сначала небольшое падение уровня на 0,5 м, затем примерно 1,5 суток плавного нагонного роста до максимума и небольшой, видимо сейшевый всплеск уровня в конце 18 апреля на 0,3 м. Этот сценарий интересен в сравнении с сценарием 01 - расход в Дону примерно в 2 раза меньше при том же максимальном нагонном уровне, хотя сам нагон длиннее примерно в 2 раза по продолжительности.

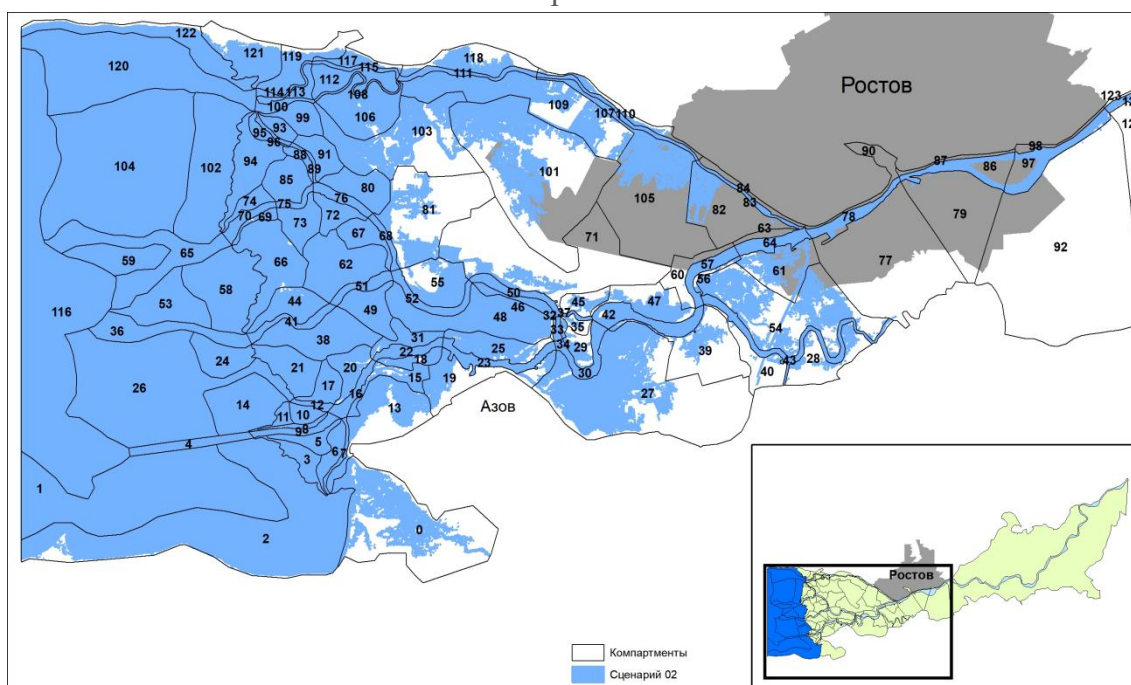
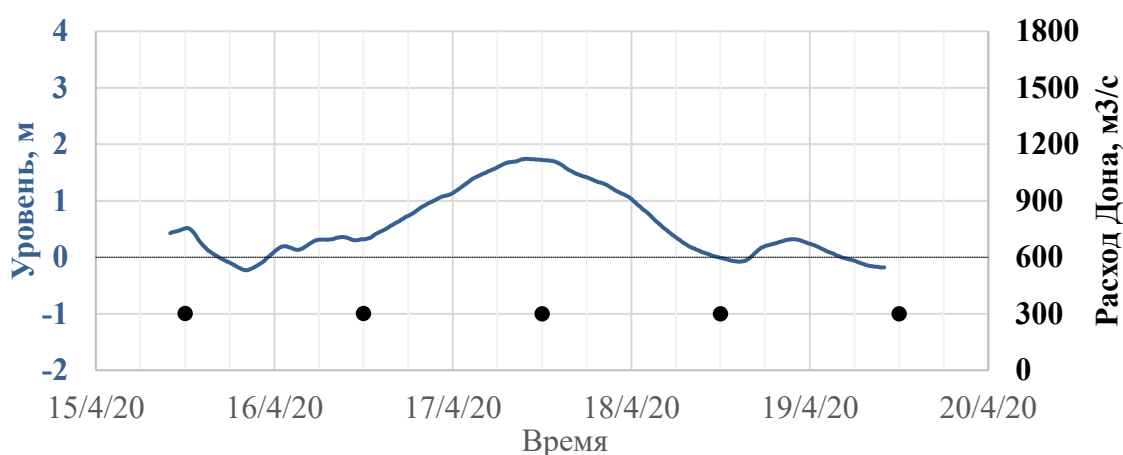
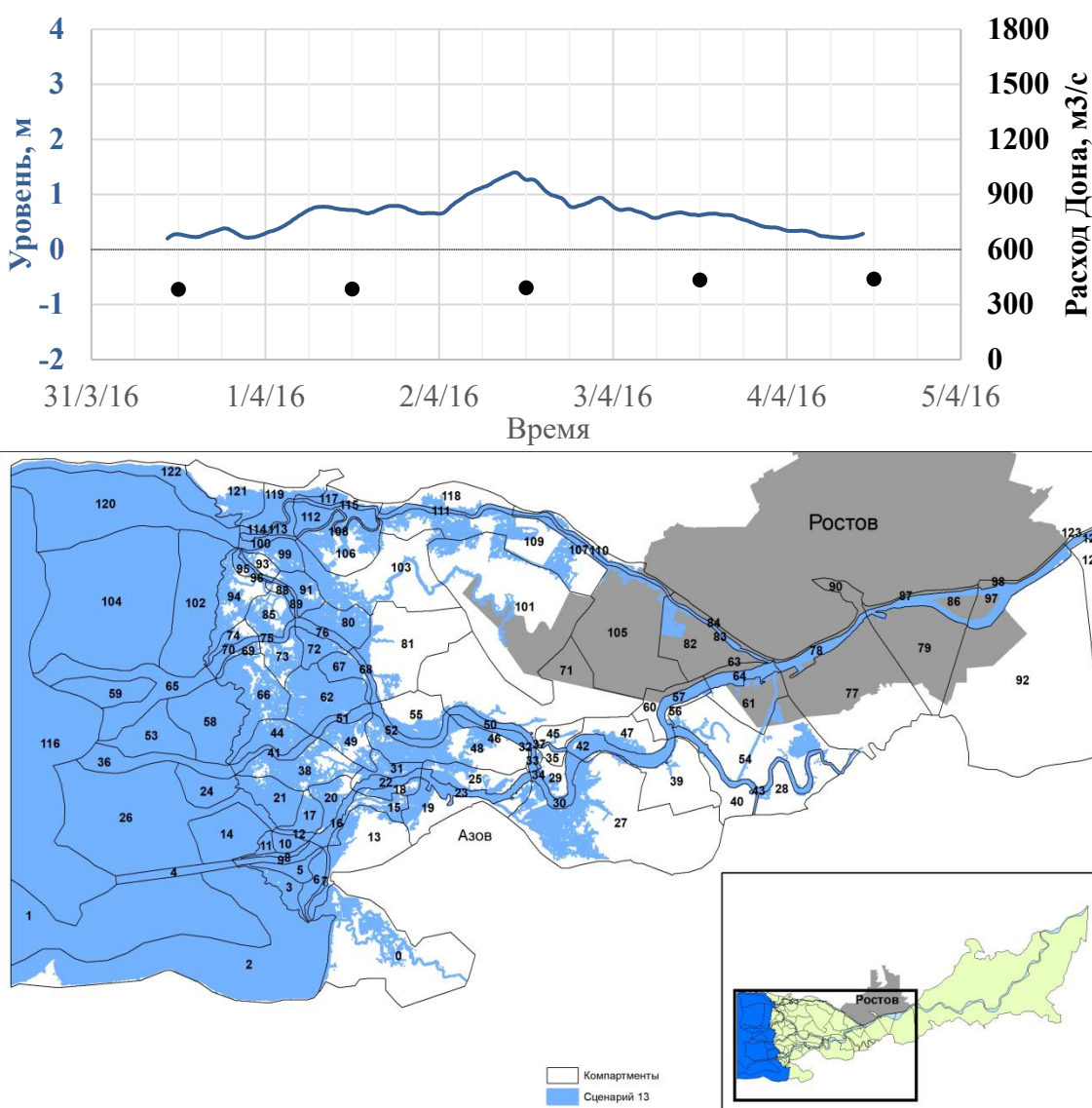


Рисунок 3. Сценарий 02. Динамика уровня в х. Донской и расхода в Дону по ст. Раздорской (вверху), область затопления в пределах расчётной области гидрологической модели (внизу)



Сценарий 13 (см. таблицу нагонов 5).

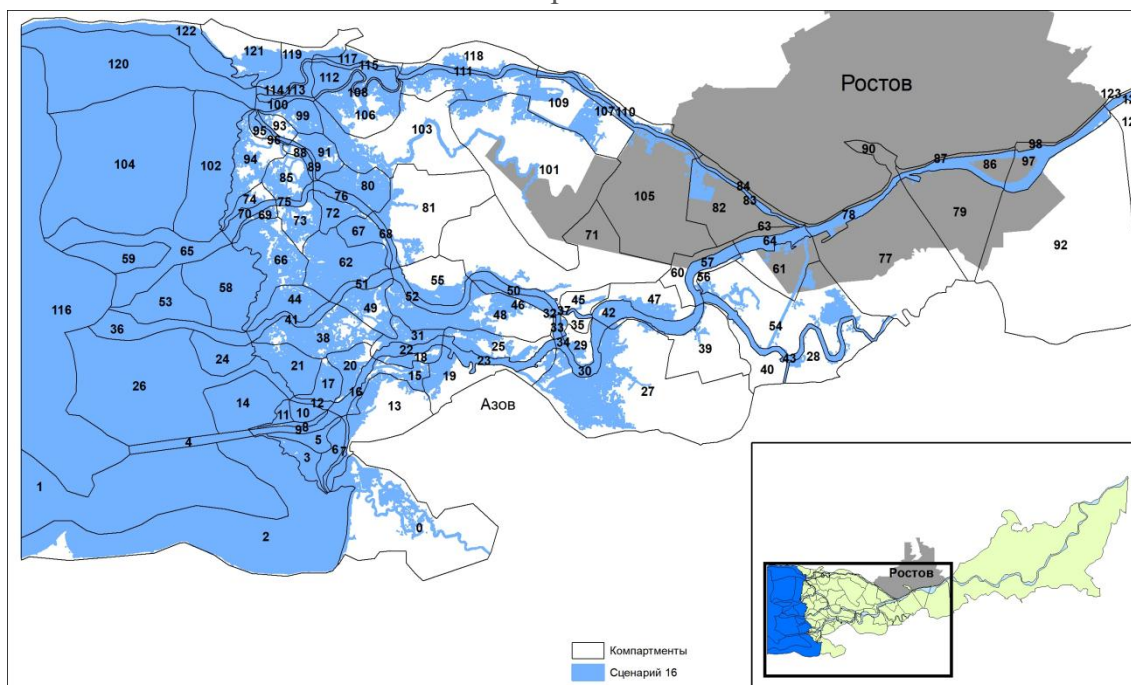
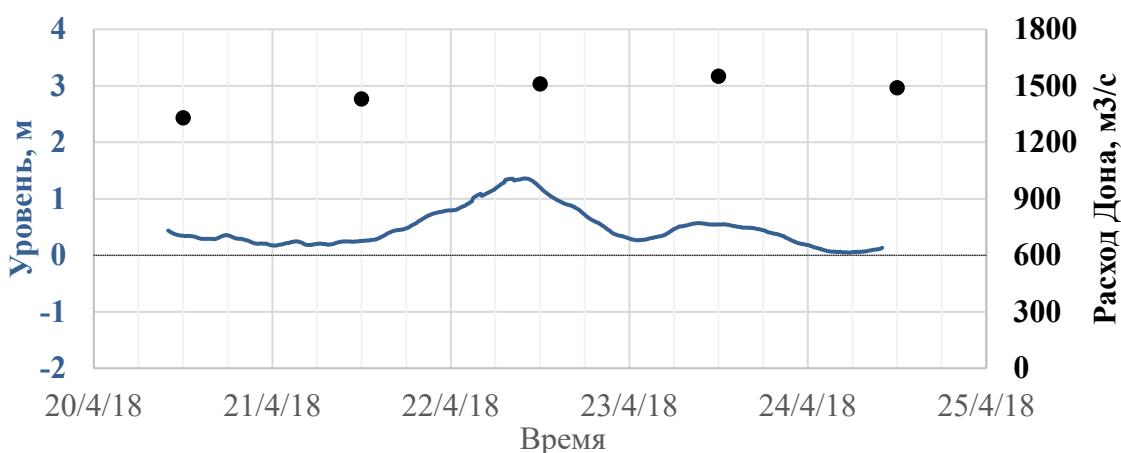
Расчёт сценария 13 проводился между 10:30 31 марта и 10:30 5 апреля 2016 г. с максимальным уровнем 1,4 м в 10:30 2 апреля (рис. 4). Расход в Дону при этом сниженный - около 400 м<sup>3</sup>/с, однако наблюдается условичивый рост по дням с 383 до 440 м<sup>3</sup>/с. На протяжении всего сценария уровень воды выше 0, максимальный нагонный уровень 1,4 м достигнут ростом на 0,7 м примерно за 10 часов, затем примерно за то же время уровень упал до 0,7 м, постепенно падал до 0,2 м, сменившись в конце сценария скачком уровня на 0,4 м. В целом можно сказать, что в этом сценарии имитируется ветровой всплеск уровня на 0,7 м на фоне повышенного уровня и меженного расхода в Дону.



**Рисунок 4. Сценарий 13. Динамика уровня в х. Донской и расхода в Дону по ст. Раздорской (вверху), область затопления в пределах расчётной области гидрологической модели (внизу)**

Сценарий 16 (см. таблицу нагонов 5).

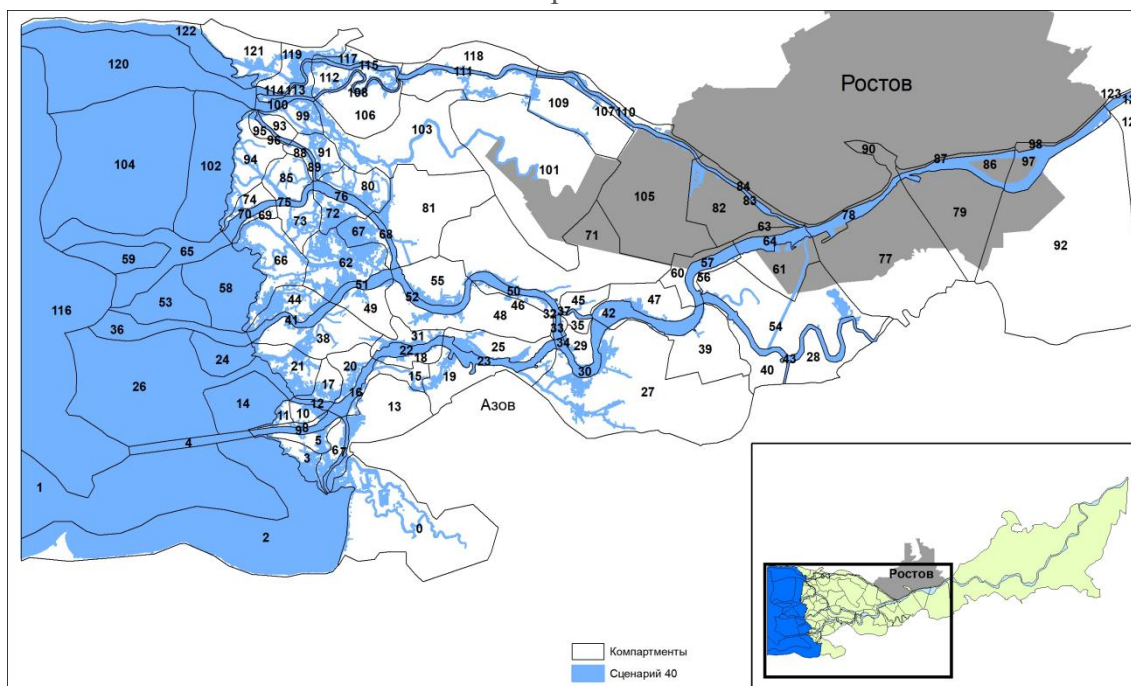
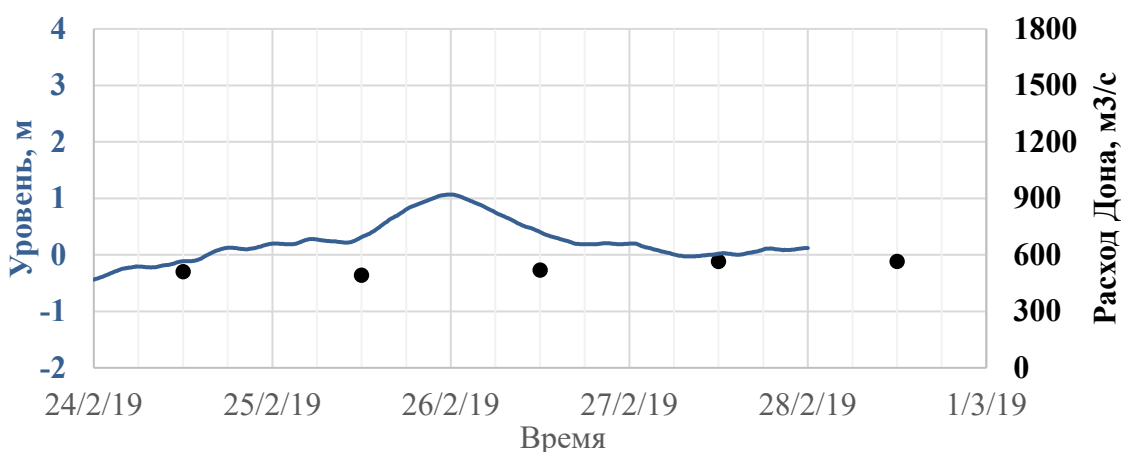
Расчёт сценария 16 проводился между 10:00 20 апреля и 10:00 25 апреля 2018 г. с максимальным уровнем 1,36 м в 10:00 22 апреля (рис. 5). Это сценарий небольшого ветрового нагона на фоне половодного расхода воды в Дону - рост от 1330 до 1550 м<sup>3</sup>/с. Колебания уровня начались с 0,4 м немного снижаясь до 0,2 м. Затем в течение суток наблюдался нагонный рост уровня примерно на 1,2 м до максимального для сценария. 23 апреля наблюдался, видимо, сейшевый всплеск уровня на 0,2 м. Интересно сравнение результатов расчётов сценария 16 со сценарием 13 - как меняется гидродинамика схожего нагона в дельте при меженном или половодном расходе в Дону.



**Рисунок 5. Сценарий 16. Динамика уровня в х. Донской и расхода в Дону по ст. Раздорской (вверху), область затопления в пределах расчётной области гидрологической модели (внизу)**

Сценарий 40 (см. таблицу нагонов 5).

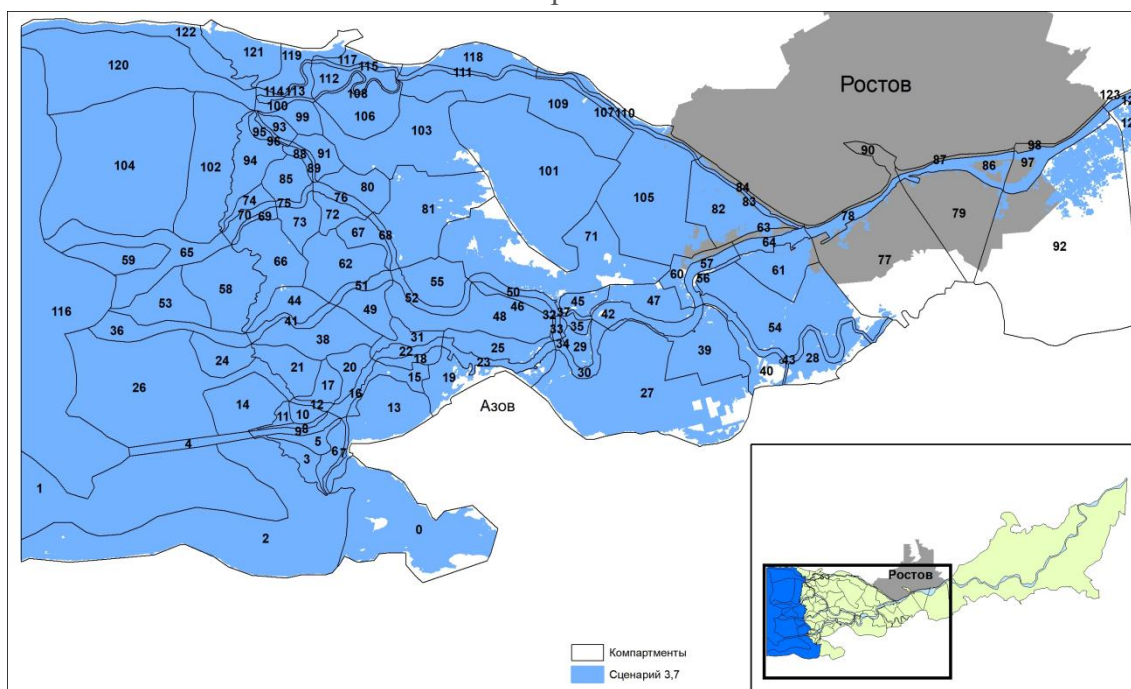
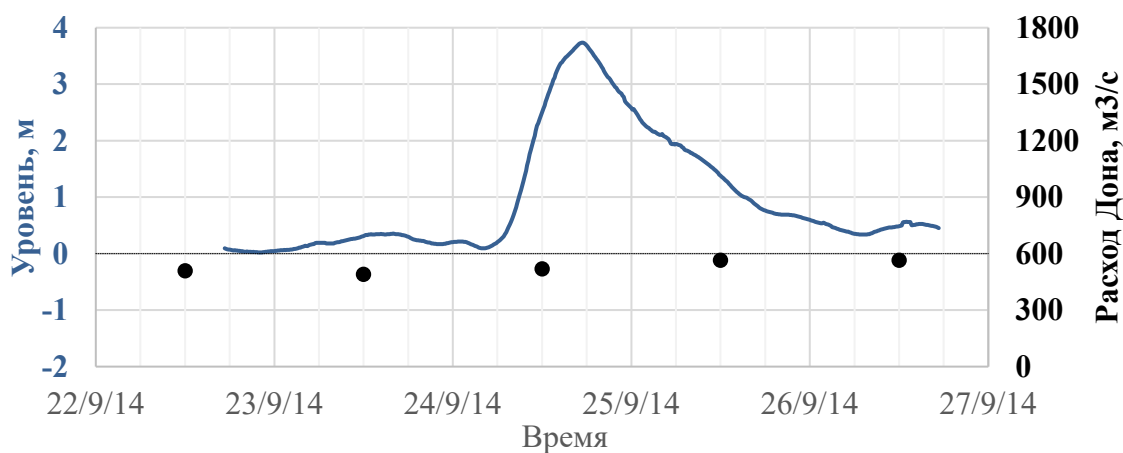
Расчёт сценария 40 проводился между 0:00 24 февраля и 0:00 1 марта 2019 г. с максимальным уровнем 1,06 м в 0:00 26 февраля (рис. 6). Это самый слабый нагон из рассмотренных, развивающийся на фоне среднего расхода в Дону - от 491 до 565 м<sup>3</sup>/с. Возможно, это и не ветровой нагон, а сейшевое колебание, хотя его форма напоминает сценарии 13 и 16, и, скорее, этот нагон близок к сценарию 13, т.к. рост уровня перед максимальным уровнем составил 0,9 м. Этот сценарий интересен тем, что такие низкие нагоны на фоне среднего расхода Дона наиболее часты.



**Рисунок 6. Сценарий 40. Динамика уровня в х. Донской и расхода в Дону по ст. Раздорской (вверху), область затопления в пределах расчётной области гидрологической модели (внизу)**

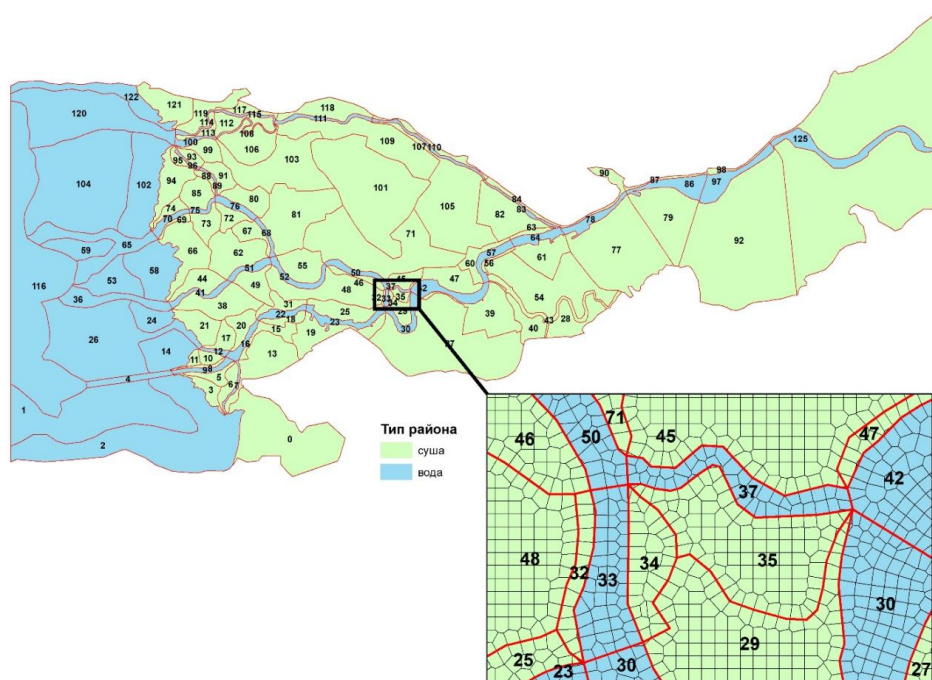
Сценарий 3.7 (экстремальный нагон в сентябре 2014 г, подъем уровня воды на 3,7 м.

Расчёт сценария 3,7 проводился между 17:20 22 сентября и 17:20 27 сентября 2014 г. с максимальным уровнем 3,70 м в 17:20 24 сентября (рис. 7). Это максимальный зафиксированный нагон в дельте Дона в последние годы. Сам рост нагона составил порядка 3,5 м за 12 часов на фоне стабильного меженного расхода в Дону - 430 м<sup>3</sup>/с. За пиком роста наблюдалось падение уровня полтора дня.



**Рисунок 7. Сценарий 3.7. Динамика уровня в х. Донской и расхода в Дону по ст. Раздорской (вверху), область затопления в пределах расчётной области гидрологической модели (внизу)**

Для обобщения результатов моделирования выполнено гидрологическое районирование устьевой области (рис 8). Гидрологическое районирование устьевой области Дона постепенно трансформировалось от 96 районов, на которые была разбита дельта Дона от вершины до морского края дельты и одного района, включающего часть устьевое взморья, до 126 районов, из которых 77 районов в пойме дельты и р. Дон до ст. Раздорская, 33 района являются русловыми сегментами и 16 районов в пределах устьевое взморья (в Таганрогском заливе).

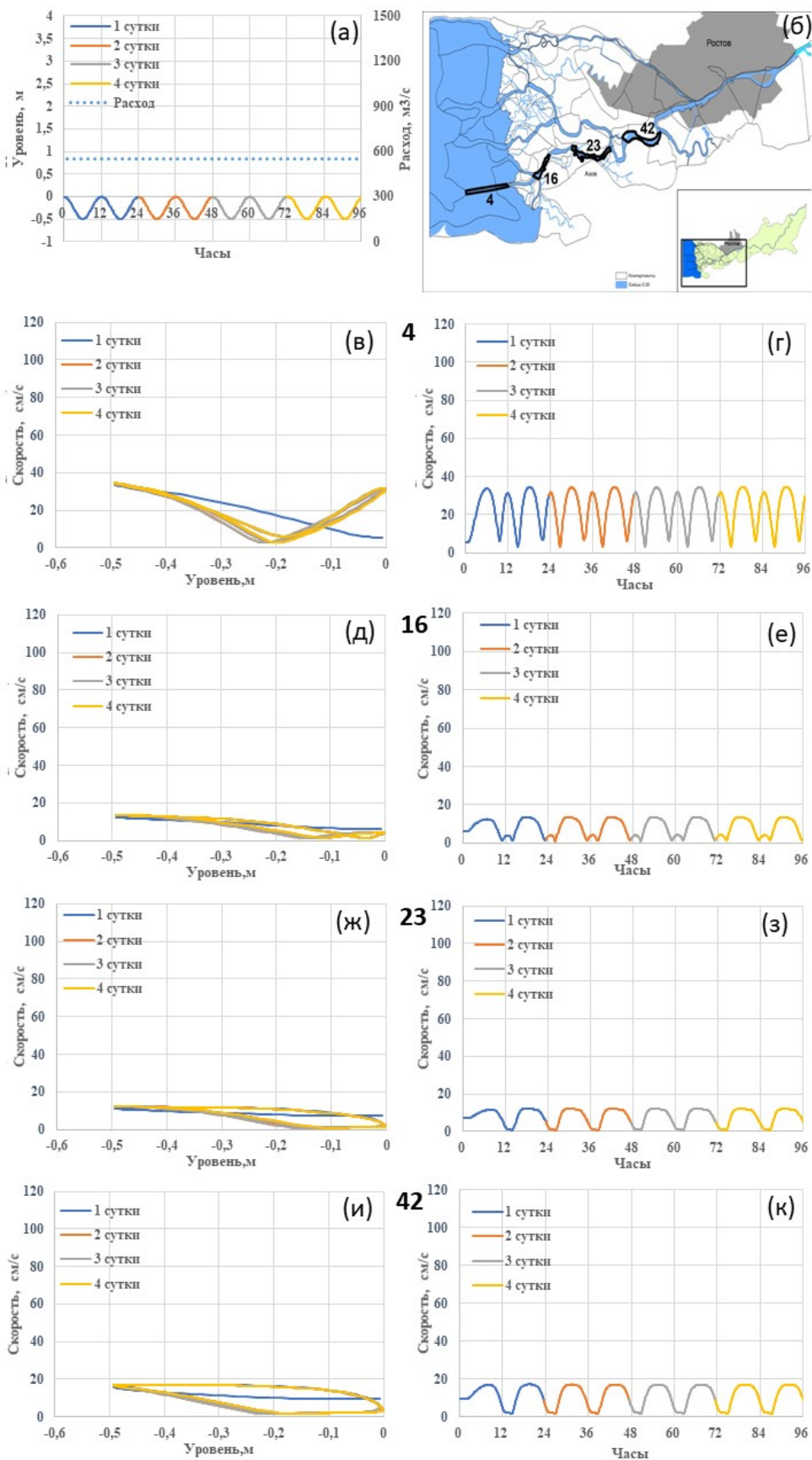


**Рисунок 8. Схема гидрологического районирования устьевой области Дона в модели DonDeltaHEC-RAS**

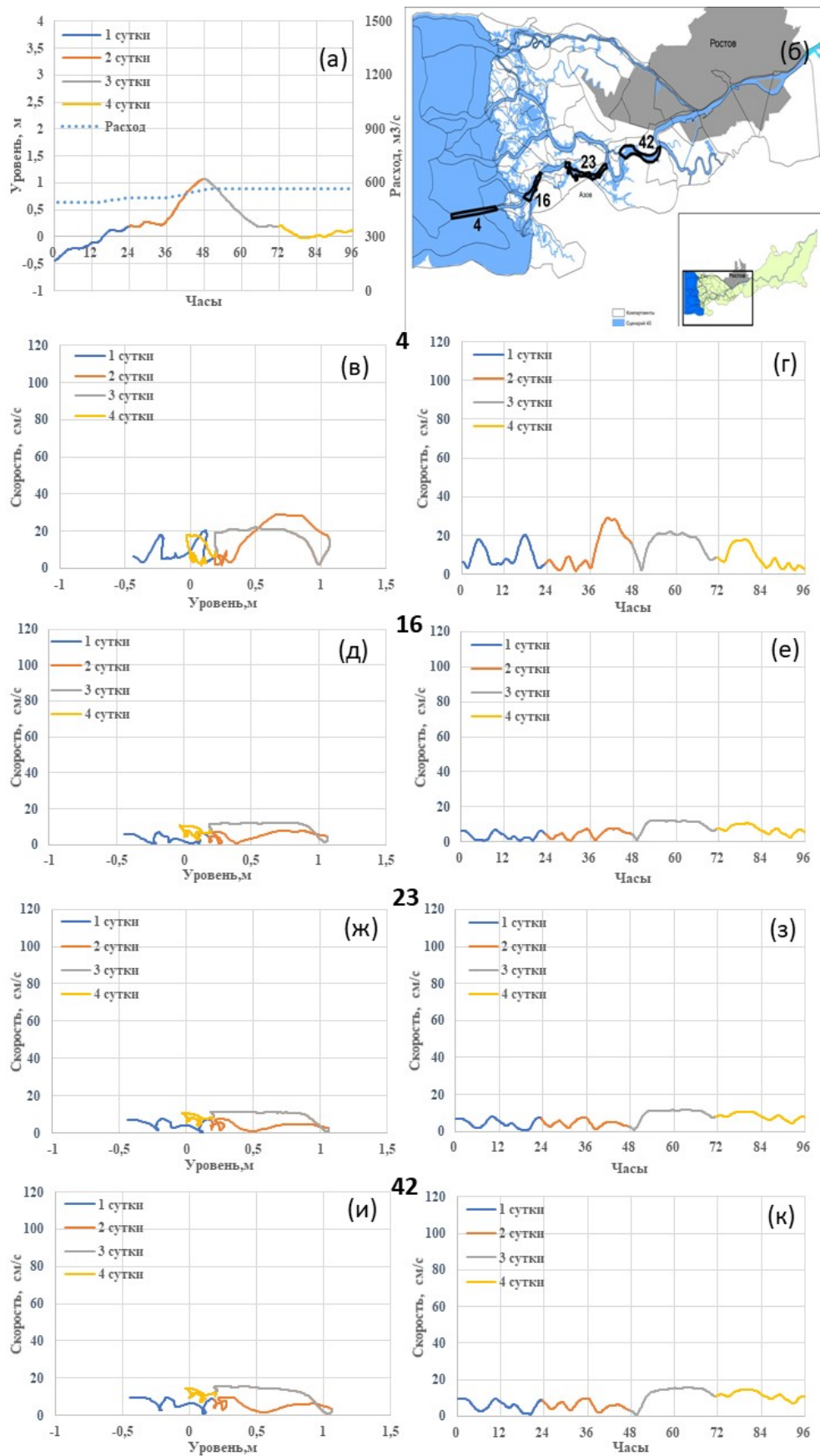
Изучена зависимость скоростей течений от уровня воды для русловых районов, районов поймы дельты и районов устьевого взморья.

Для районов устьевого взморья во время нагонов наблюдается сначала замедление скоростей течения, а затем течения разворачиваются в обратную сторону с увеличением скоростей вплоть до достижения пика уровня, который наступает раньше пика скорости. Затем скорости течения быстро падают до нуля, разворачиваются в направлении от реки к морю и восстанавливаются обычные значения. Для русловых районов динамика скоростей схожая, однако амплитуды обратных скоростей при удалении от морского края дельты затухают. Течения в русловых районах вдали от моря только замедляются под воздействием нагонов без разворачивания направления течений. Чем более интенсивный нагон (выше максимальный уровень) и ниже речной расход, тем дальше от морского края дельты формируются обратные течения. Для районов поймы при нагонах характерны скорости подобные ближайшим русловым районам, однако могут быть пониженными из-за влияния растительного покрова.

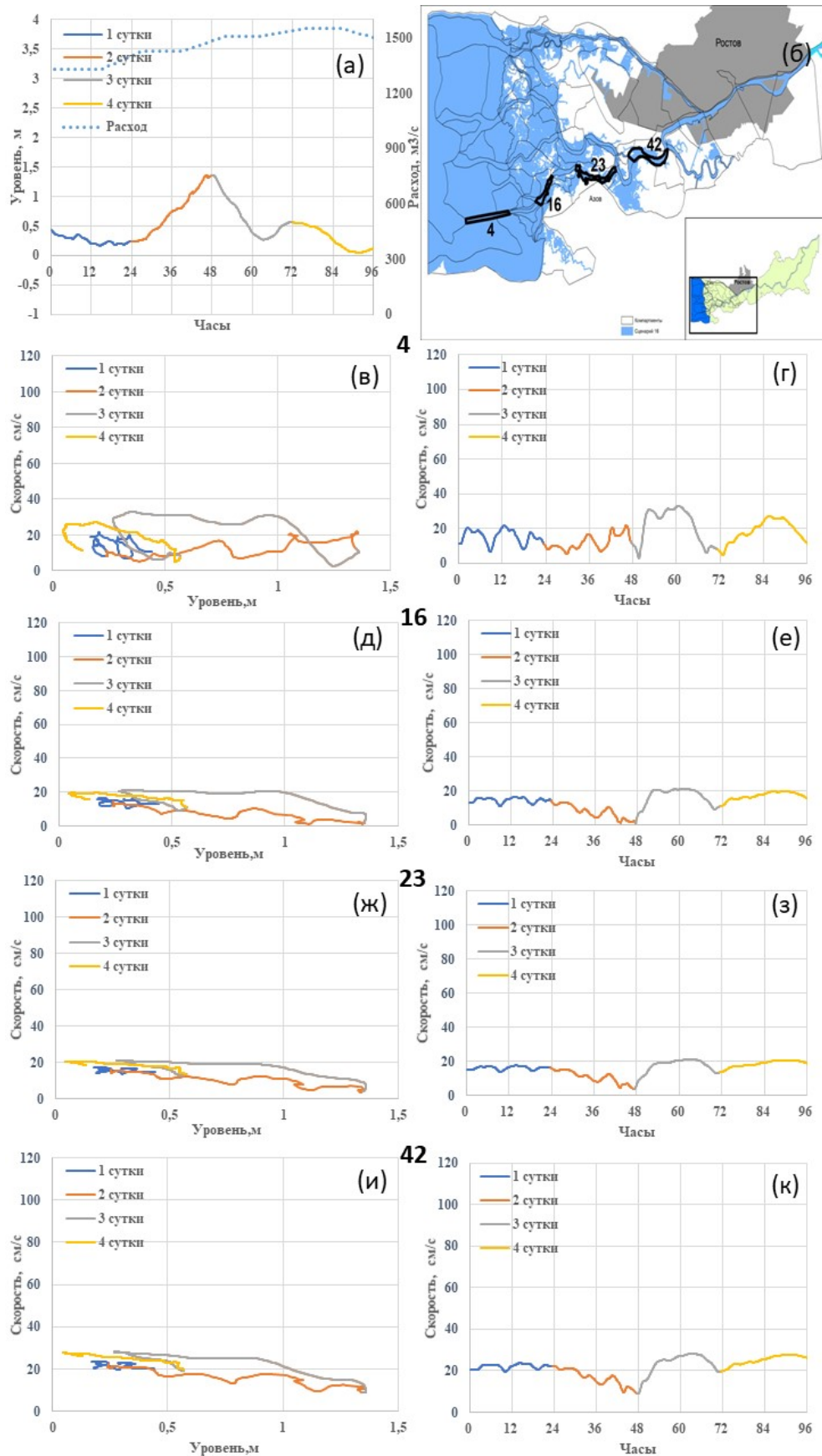
Результаты представлены на рис. 9-15, озвучены А.В.Клещенковым в виде устного доклада на тему «Численное исследование условий осаждения взвеси в дельте Дона при нагонах» 9 октября 2023 г. на Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б.Виноградова «Пятое Виноградовские чтения "Гидрология в эпоху перемен"» (г. Санкт-Петербург, 9-14 октября 2023 г.) и опубликованы в трудах этой конференции: Клещенков А.В., Шевердяев И.В. Численное исследование условий осаждения взвеси в дельте Дона при нагонах // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б.Виноградова «Пятое Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен». СПб.: Изд-во ВВМ, 2023. С 211-216.



**Рисунок 9.** Ход уровня сейшевых колебаний амплитудой 0,5 м (а), расчётная зона затопления сценария (б), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 4 по суткам (в), динамика средней скорости в районе 4 (г), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 16 по суткам (д), динамика средней скорости в районе 16 (е), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 23 по суткам (ж), динамика средней скорости в районе 23 (з), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 42 по суткам (и), динамика средней скорости в районе 42 (к)

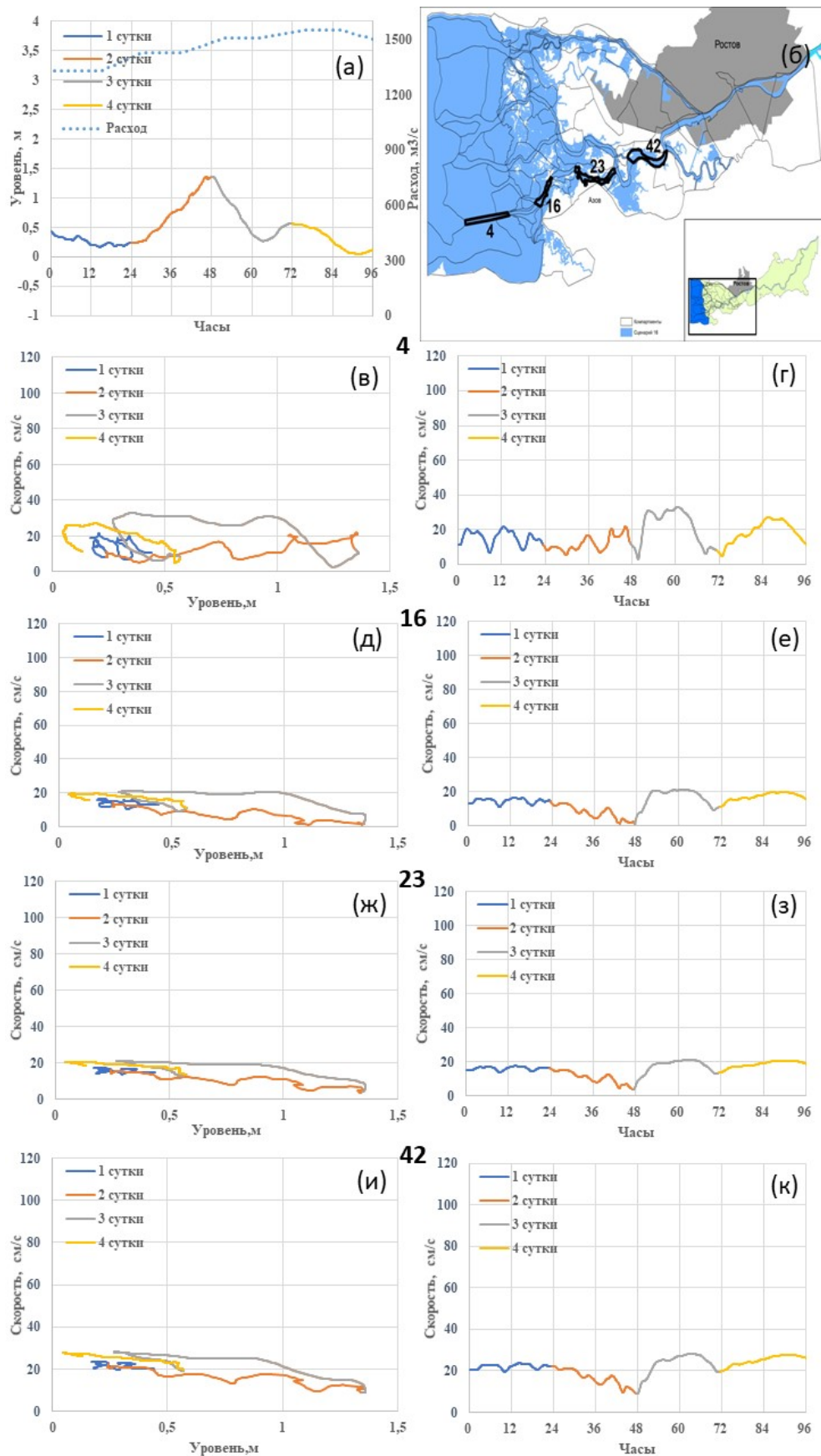


**Рисунок 10. Ход уровня сценария 40 (а), расчётная зона затопления сценария (б), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 4 по суткам (в), динамика средней скорости в районе 4 (г), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 16 по суткам (д), динамика средней скорости в районе 16 (е), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 23 по суткам (ж), динамика средней скорости в районе 23 (з), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 42 по суткам (и), динамика средней скорости в районе 42 (к)**

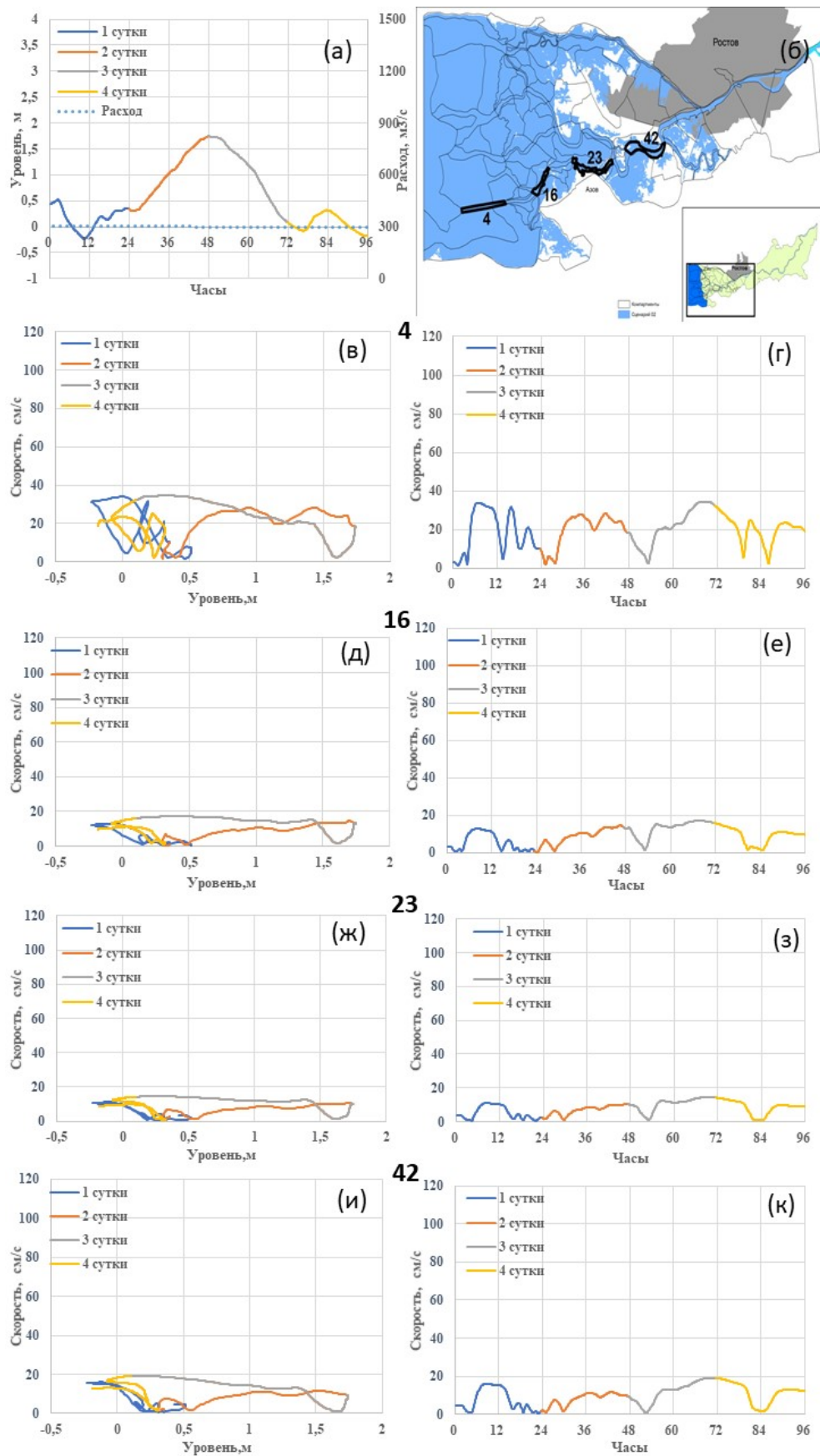


**Рисунок 11.** Ход уровня сценария 16 (а), расчётная зона затопления сценария (б), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 4 по суткам (в), динамика средней скорости в районе 4 (г), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 16 по суткам (д), динамика средней скорости в районе 16 (е), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 23 по суткам (ж), динамика средней скорости в районе 23 (з), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 42 по суткам (и), динамика средней скорости в районе 42 (к)





**Рисунок 12.** Ход уровня сценария 13 (а), расчётная зона затопления сценария (б), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 4 по суткам (в), динамика средней скорости в районе 4 (г), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 16 по суткам (д), динамика средней скорости в районе 16 (е), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 23 по суткам (ж), динамика средней скорости в районе 23 (з), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 42 по суткам (и), динамика средней скорости в районе 42 (к)



**Рисунок 13.** Ход уровня сценария 02 (а), расчётная зона затопления сценария (б), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 4 по суткам (в), динамика средней скорости в районе 4 (г), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 16 по суткам (д), динамика средней скорости в районе 16 (е), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 23 по суткам (ж), динамика средней скорости в районе 23 (з), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 42 по суткам (и), динамика средней скорости в районе 42 (к)

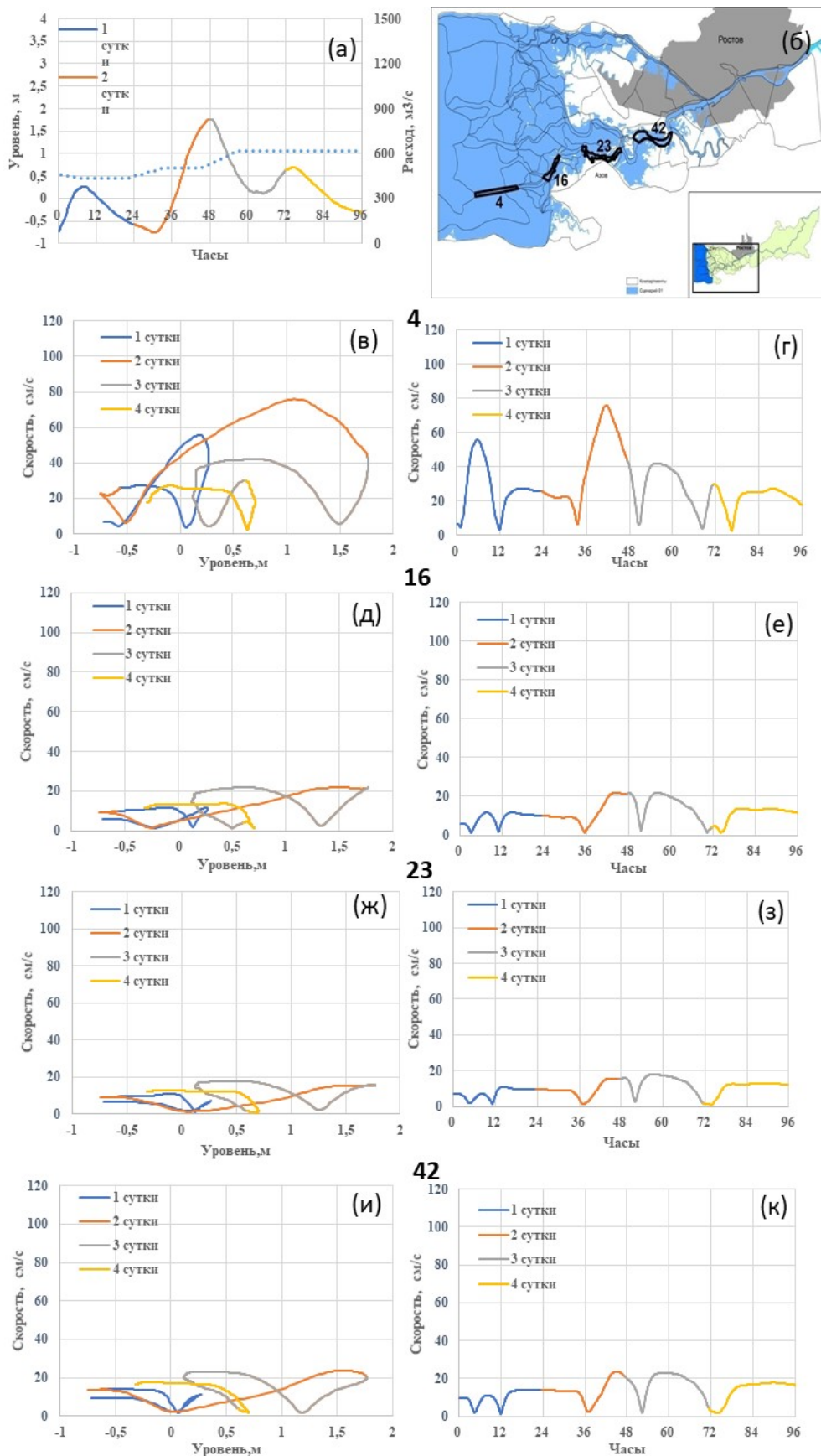
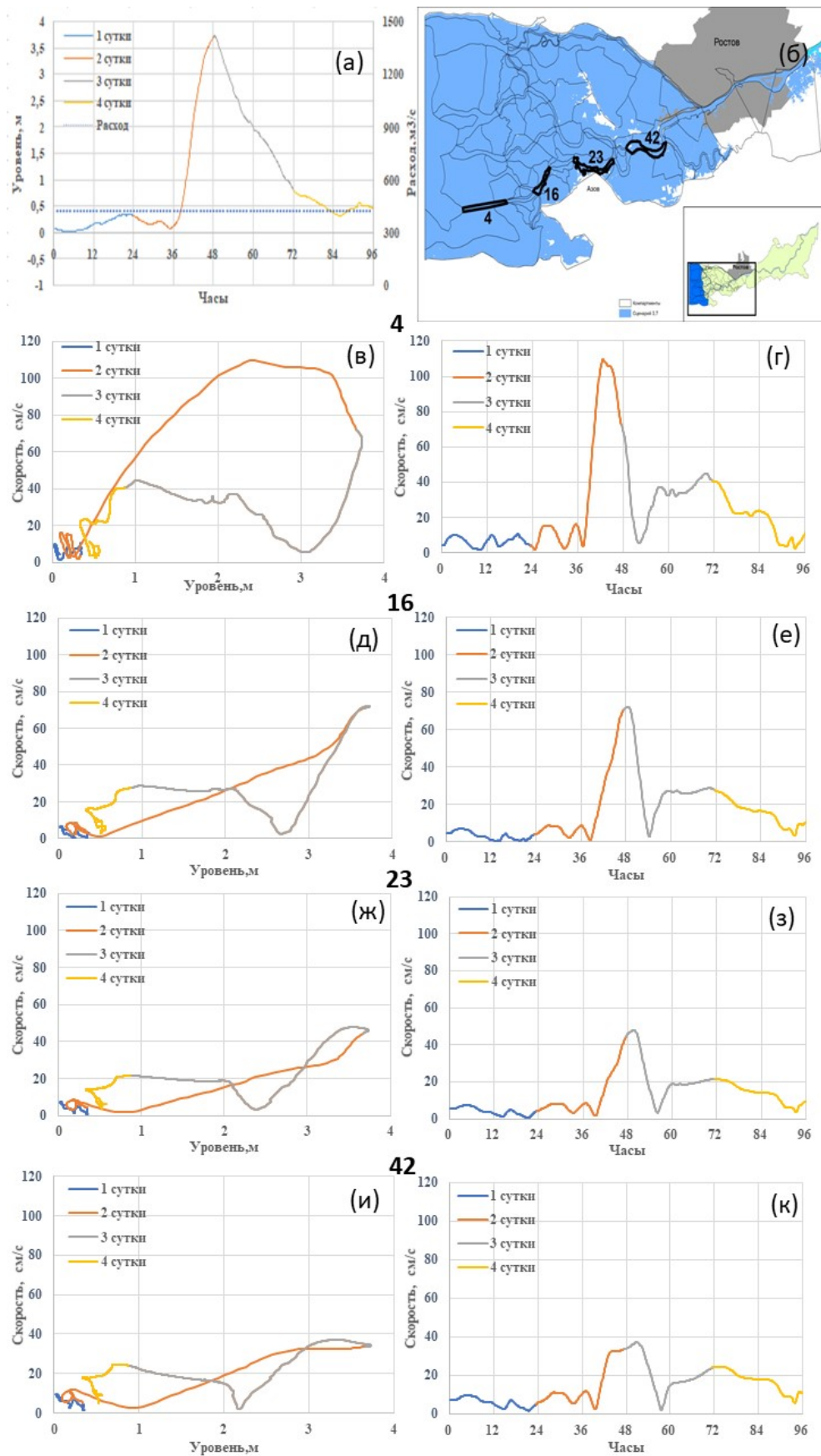


Рисунок 14. Ход уровня сценария 01 (а), расчётная зона затопления сценария (б), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 4 по суткам (в), динамика средней скорости в районе 4 (г), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 16 по суткам (д), динамика средней скорости в районе 16 (е), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 23 по суткам (ж), динамика средней скорости в районе 23 (з), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 42 по суткам (и), динамика средней скорости в районе 42 (к)



**Рисунок 15. Ход уровня сценария 3,7 (а), расчётная зона затопления сценария (б), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 4 по суткам (в), динамика средней скорости в районе 4 (г), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 16 по суткам (д), динамика средней скорости в районе 16 (е), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 23 по суткам (ж), динамика средней скорости в районе 23 (з), изменение соотношения средней скорости и уровня в районе 42 по суткам (и), динамика средней скорости в районе 42 (к)**

### **Подзадача 3.1 (2022 - 2023). Дополнение гидрологической модели устьевой области Дона (на базе программного комплекса HEC-RAS) модулем для расчета переноса и седиментации взвешенных веществ**

На первом этапе выполнения проекта (2022 г.) была сформулирована идея применить программный комплекс HEC-RAS с той-же пространственной детализацией (на квазирегулярной сетке с ячейками размером 100 на 100 м) не только для расчета гидрологических параметров, но и для расчета динамики взвешенного вещества. Два технических момента заставили отказаться от этого подхода. Во-первых, технические трудности адаптации модуля расчета переноса и седиментации взвешенных наносов (временные и вычислительные), во-вторых, отсутствие в соответствующем модуле HEC-RAS возможности учесть процессы флокуляции, образования хлопьев в зоне смешения соленых и пресных вод.

Поэтому на втором этапе выполнения проекта (2023 г.) за основу была взята модель динамики взвешенных веществ, разработанная в рамках выполнения госзаданий ЮНЦ РАН (С.В. Бердников, И.В. Шевердяев, А.В. Клещенко, В.В. Кулыгин. Совместное применение гидрологической модели HEC RAS и мультикомпарментальной балансовой модели для описания переноса и трансформации взвешенных веществ в речной дельте: случай устьевой области р. Дон – Доступно на PREPRINTS.RU: <https://preprints.ru/article/1073>), согласованная с моделью HEC-RAS.

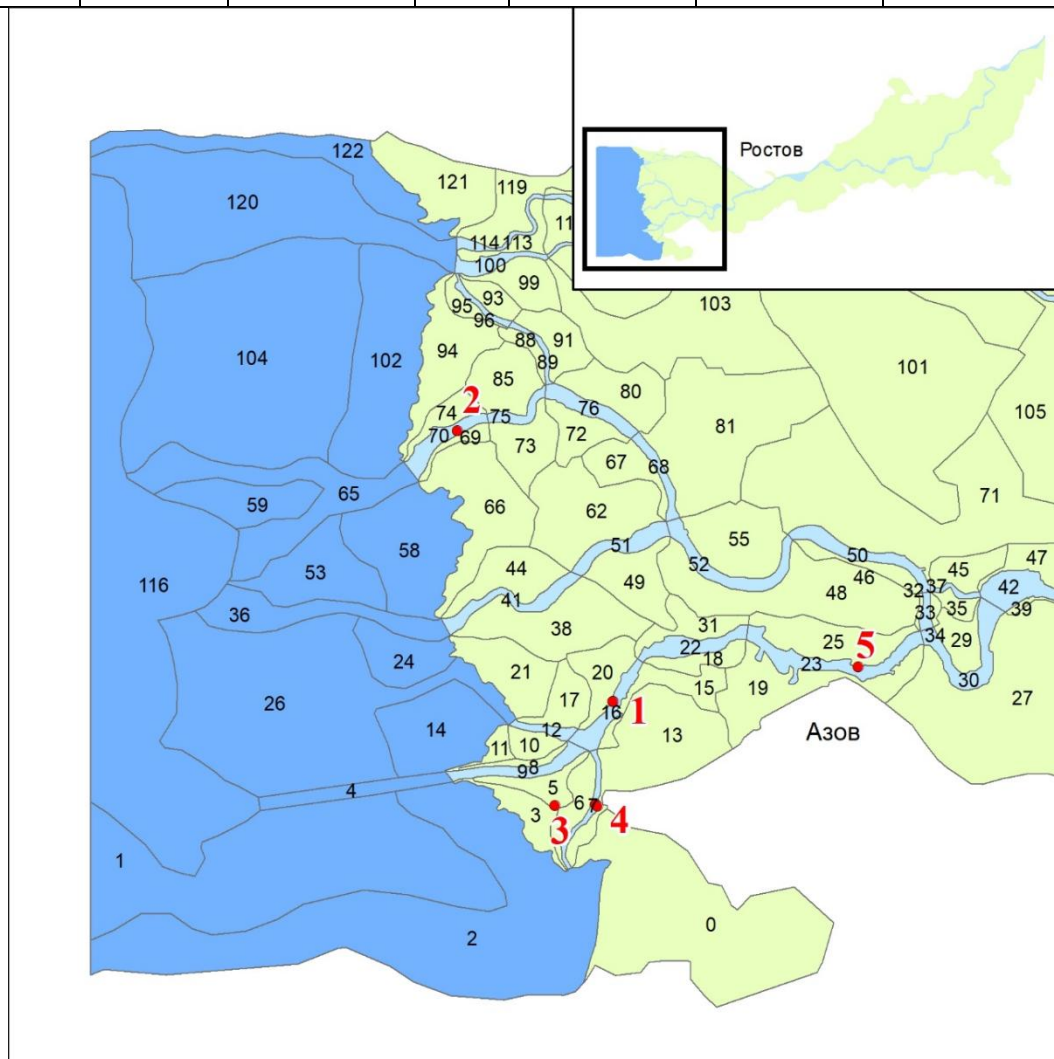
Ее основные положения следующие. Взвесь делится на три группы по размерам: пелитовая фракция (глина, clay), частицы размером меньше 0,01 мм; алевритовая фракция (ил, silt), частицы размером 0,1–0,01 мм и песчаная фракция (песок, sand), частицы размером более 0,1 мм. Введена параметризация процесса взмучивания донных отложений и осаждения взвеси, которая определяется разницей между текущей концентрацией взвеси в водном потоке и концентрацией взвеси, обусловленная взвесенесущей способностью потока. Последняя является эмпирической функцией средней по вертикали скоростью потока, гидравлического радиуса и двух эмпирических параметров. При этом обмен взвесью с донными отложениями реализован только для русловых сегментов и районов устьевого взморья. Для пойменных районов дельты он не предусмотрен.

### **Подзадача 3.2 (2022-2023). Натурные экспериментальные исследования седиментации взвешенного материала в дельте Дона с применением седиментационных ловушек**

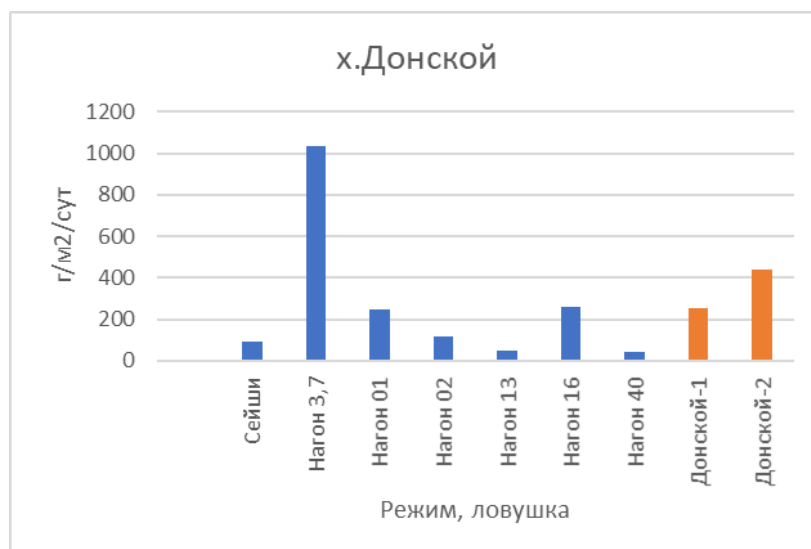
Взвесь, накопленная в седиментационных ловушках (описание которых приведено в отчете 2022 г.), установленных в приустьевой части рукавов Старый Дон, Свиное и Бирючее во время нагона в сентябре 2021 г., была обработана А.Клещенковым (табл. 3, рис. 16, 17, 18, 19, 20, 21), а полученные оценки скоростей седиментации использованы для сопоставления с результатами моделирования (см. далее).

**Таблица 3 – Данные седиментационных ловушек**

№ п/п	Место установки				Дата и время начала экспозиции	Дата и время окончания экспозиции	Вес осадка, г	Скорость осадко-накопления, г/м <sup>2</sup> сут
	широта, с.ш.	долгота, в.д.	Локация / позиция	Номер района				
1	47,110091	39,312183	х.Донской_1 / русло	16	23.10.2020 17:29	12.01.2021 14:03	194,50	252,63
2	47,110091	39,312183	х.Донской_2 / русло	16	07.12.2021 10:45	26.04.2022 12:00	578,13	441,05
3	47,195254	39,241247	рук.Каланча / русло	70	23.10.2020 13:00	27.09.2021 12:54	659,70	204,84
4	47,077596	39,285489	гир. Бирючье / пойма	5	26.09.2021 7:30	26.09.2021 23:00	1,22	203,21
5	47,077902	39,304168	гир. Свиное / русло	7	26.09.2021 6:20	26.09.2021 23:00	2,78	292,63
6	47,077393	39,304758	гир. Свиное / пойма	13	26.09.2021 8:00	26.09.2021 22:40	1,42	250,53
7	47,120782	39,425001	Азов /пойма	25	26.09.2021 17:10	26.09.2021 20:00	0,06	53,89



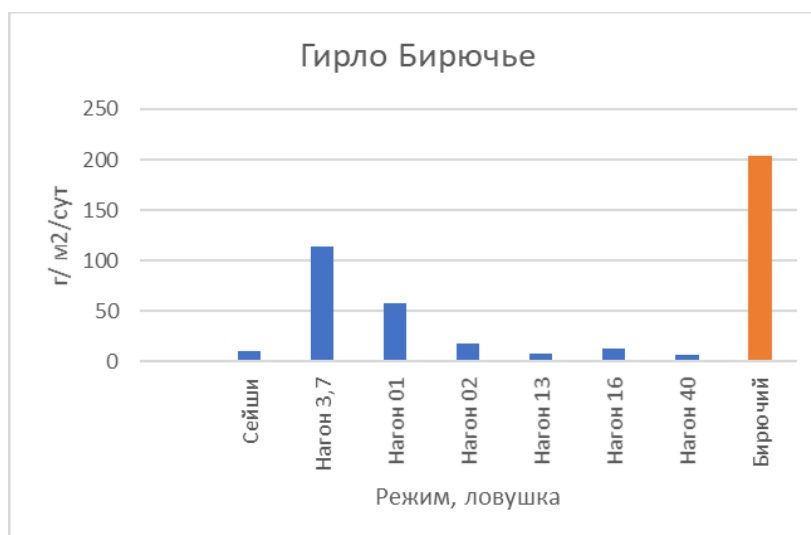
**Рисунок 16. Места установки седиментационных ловушек. На карте цифрами обозначены: 1 – р.Дон (х.Донской); 2 – рук. Каланча; 3 – гирло Бирючье; 4 – гирло Свиное (БНЭБ «Кагальник»); 5 – р.Дон (г.Азов)**



**Рисунок 17. Сопоставление расчетных величин седиментации взвешенного вещества с данными седиментационных ловушек в русловой части Дона в районе х. Донской**



**Рисунок 18. Сопоставление расчетных величин седиментации взвешенного вещества (по сценариям) с данными седиментационной ловушки в русловой части рукава Каланча**



**Рисунок 19. Сопоставление расчетных величин седиментации взвешенного вещества (по сценариям) с данными седиментационной ловушки в пойменной части гирла Бирючье во время нагона 26.09.2021 г**



**Рисунок 20. Сопоставление расчетных величин седиментации взвешенного вещества (по сценариям) с данными седиментационных ловушек в русловой (Свиное-1) и пойменной (Свиное-2) частях гирла Свиное во время нагона 26.09.2021 г**



**Рисунок 21. Сопоставление расчетных величин седиментации взвешенного вещества (по сценариям) с данными седиментационной ловушки в пойменной части Дона (г.Азов) во время нагона 26.09.2021 г**

Рассматриваемый на рисунках 19-21 нагон 26.09.2021 по обеспеченности уровня воды наиболее близок нагону 40 (89% и 85% соответственно). Наилучшие результаты сопоставления расчетных и наблюдаемых значений наблюдаются на участке экспозиции в районе г.Азов (рисунок 21), в то время как возможный недоучет в модели интенсивного взмучивания донных отложений рукавов южной части дельты во время нагона дает заниженные модельные значения по сравнению с наблюдаемыми, что видно на рисунках 19 и 20.

### **Подзадача 3.3 (2022-2023). Лабораторные исследования седиментации взвеси при смешении морских и речных вод**

Разработанный на первом этапе выполнения проекта прототип прибора для проведения



экспериментальных работ на основе метода лазерного светорассеивания был доработан, но не удалось полностью устранить паразитные эффекты (влияние внешней освещенности) на результаты экспериментов. Не все из 32 каналов удалось отладить. Основная идея была понять не изменяются ли размеры частиц при смешении соленых и речных вод, но однозначно интерпретировать это не удалось. В целом на длине волны 450 нм (один канал) удалось получить эффект увеличения интенсивности осаждения взвеси в диапазоне 2-6 г/л (как и в работе (Герасюк, Бердников, 2021)), но это скорее всего связано с присутствием органического вещества в речной воде и на взвеси. В любом случае эти работы будут продолжены и по завершении проекта. Вместе с тем результаты экспериментальных исследований использованы далее при выполнении оценок влияния солености на седиментацию взвешенного вещества в устьевой области Дона.

**Подзадача 3.4 (2023). Математическое моделирование динамики взвешенного вещества в устьевой области Дона при различных расходах воды в ее вершине и сгонно-нагонных колебаниях уровня в Таганрогском заливе. Оценки потоков взвешенного вещества, оседающего в дельте Дона при нагонах разной обеспеченности, сравнение с твердым током в период маловодья. Оценки влияния гидродинамических факторов на размыв морского края дельты**

Для математического моделирования динамики взвешенного вещества в устьевой области Дона разработан программный интерфейс между моделью DonDeltaHECRAS и моделью динамики растворенных и взвешенных веществ (DonDeltaBalanceModel), которая реализована для принятого гидрологического районирования. Интерфейс был разработан сотрудником из числа вспомогательного персонала В.В.Кулыгиным. При этом при изменении гидрологического районирования нет необходимости выполнять дополнительные расчеты с применением DonDeltaHECRAS. В результате устранены ошибки в передаче данных от модели DonDeltaHECRAS к модели DonDeltaBalanceModel, что ранее приводило к нарушению баланса воды и, как следствие, к ошибочным расчетам в концентрациях компонентов, переносимых водными массами.

Блок DonDeltaHECRAS в каждый момент времени (расчетный шаг 10 минут) передает следующие наборы данных: объемы воды в каждом компартменте гидрологического районирования, потоки воды через границы между районами, площадь, которая занята водой, среднюю скорость течения в пределах района. Блок DonDeltaBalanceModel контролирует выполнение водного баланса, выполняет расчет солености воды, затем перенос взвешенного вещества (три размерные фракции) с учетом (или без учета) влияния солености на скорость осаждения частиц взвеси, выдает в качестве результатов средние для районов значения солености воды, концентрации пелитовых, алевритовых и песчаных частиц, потоки взвешенных веществ через границы районов, величину осевшей взвеси и величину взвеси, вовлеченную в воду при ресуспензии донных отложений.

С применением модели DonDeltaHECRAS выполнены расчеты гидрологического режима для 6 типов нагонов разной обеспеченности (табл. 2, рис. 2-7). Кроме этого, рассматривался режим без нагона, но в котором уровень колеблется от нулевого значения до минус 0,5 м в течение суток с периодом 12 часов. Такой режим характерен для дельты Дона.

С применением модели DonDeltaBalanceModel получен комплект сценарных расчётов динамики взвешенного вещества в устьевой области Дона при различных расходах воды на гидрологическом посту в ст. Раздорская (в пределах 300-600 м<sup>3</sup>/с, характерных для периода маловодья, в интервале от 1330 до 1550 м<sup>3</sup>/с в 2018 г.) и сгонно-нагонных колебаниях уровня в Таганрогском заливе с максимальным уровнем нагона 1,06 м (обеспеченность 85%), 1,36 -1,4 м (обеспеченность 37-29%), 1,75-1,77 м (обеспеченность 54-59%) и 3,7 м (обеспеченность 0,8%).

Получены количественные оценки взвешенного вещества, оседающего в дельте Дона при нагонах разной обеспеченности (табл. 4). Выполнено сравнение с твердым стоком для каждого нагона (табл. 5, рис. 22, табл. 6).

**Таблица 4. Динамика взвешенного вещества в устьевой области Дона за период нагона, тыс т**

Статья (приход, расход) расхода	Без нагона, колебание уровня от - минус 50 см до 0 см	Параметры нагонов					
		40	16	13	02	01	-
Номер нагона из таблицы нагонов	-	40	16	13	02	01	-
Максимальное изменение уровня при нагоне, см	50	106	136	140	175	177	370
Средний расход воды, м <sup>3</sup> /с	550	540	1450	540	300	540	430
<b>Без учета влияния солености на процессы осаждения взвешенного вещества, тыс тонн</b>							
Поступило всего, в том числе:	45,69	39,64	48,98	82,84	133,24	204,61	332,77
Из Таганрогского залива	41,21	35,32	37,13	79,61	130,84	200,27	329,31
С речными водами, ст. Раздорская	4,48	4,33	11,85	3,22	2,41	4,35	3,46
Осело всего, в том числе:	7,77	18,12	5,37	36,56	56,48	69,96	114,29
В пойменных районах дельты	0,21	0,28	1,28	0,49	2,42	3,99	37,18
В русловых районах дельты	-0,65	0,87	-15,67	1,88	1,21	0,20	-8,92
В районах авандельты	8,21	16,97	19,76	34,18	52,85	65,77	86,03
Изменение запаса всего, в том числе:	6,50	6,41	14,18	9,37	10,88	22,90	47,43
В пойменных районах дельты	0,04	0,05	0,10	0,05	-0,02	-0,09	0,95
В русловых районах дельты	0,39	0,86	10,13	-0,79	-1,14	3,09	5,67
В районах авандельты	6,07	5,50	3,95	10,12	12,04	19,90	40,81
Вынос за пределы устьевой области	31,42	15,12	29,42	36,91	65,88	111,75	171,05
<b>С учетом влияния солености на процессы осаждения взвешенного вещества, тыс тонн</b>							
Поступило всего, в том числе:	45,69	39,64	48,98	82,84	133,24	204,61	332,77
Из Таганрогского залива	41,21	35,32	37,13	79,61	130,84	200,27	329,31
С речными водами, ст. Раздорская	4,48	4,33	11,85	3,22	2,41	4,35	3,46
Осело всего, в том числе:	7,77	18,12	5,37	36,56	56,48	69,96	114,29
В пойменных районах дельты	0,21	0,28	1,28	0,49	2,42	3,99	37,18
В русловых районах дельты	-0,65	0,87	-15,67	1,88	1,21	0,20	-8,92
В районах авандельты	8,21	16,97	19,76	34,18	52,85	65,77	86,03
Изменение запаса всего, в том	6,50	6,41	14,18	9,37	10,88	22,90	47,43

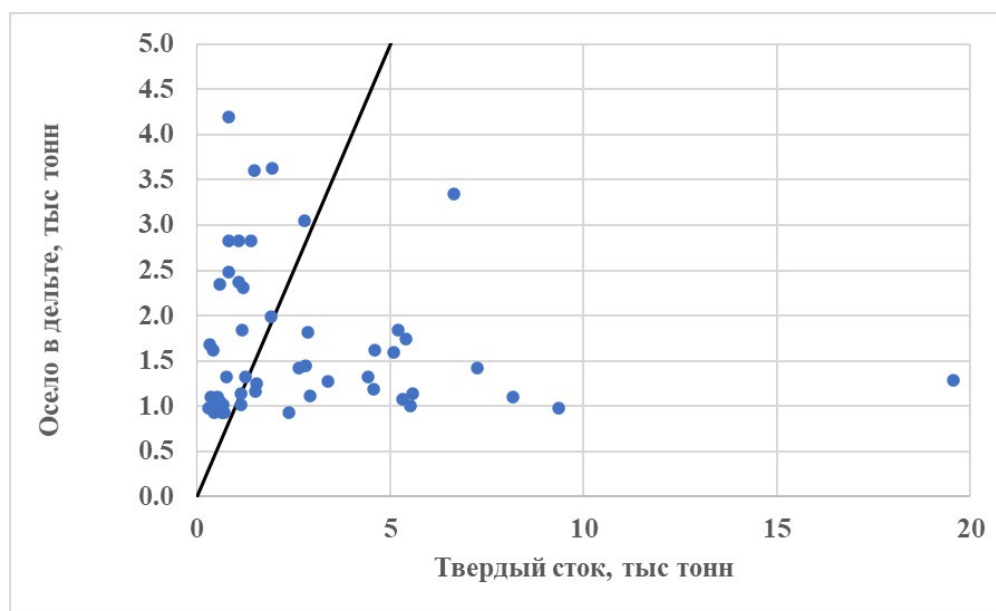
Статья (приход, расход) расхода	Без нагона, колебание уровня от - минус 50 см до 0 см	Параметры нагонов					
		числе:					
В пойменных районах дельты	0,04	0,05	0,10	0,05	-0,02	-0,09	0,95
В русловых районах дельты	0,39	0,86	10,13	-0,79	-1,14	3,09	5,67
В районах авандельты	6,07	5,50	3,95	10,12	12,04	19,90	40,81
Вынос за пределы устьевой области	31,42	15,12	29,42	36,91	65,88	111,75	171,05
<b>Изменения в осадении взвешенного вещества, тыс тонн</b>							
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	1,11	0,11	3,33	0,03	0,21	-0,49	-0,92
<b>Изменения в осадении взвешенного вещества, %</b>							
Осело всего, в том числе:	15,79	1,40	62,68	0,88	1,77	2,00	3,31
В пойменных районах дельты	1,65	8,55	1,39	10,89	7,92	1,83	4,77
В русловых районах дельты	-16,67	13,64	-0,12	12,57	49,73	903,08	-32,91
В районах авандельты	13,58	0,66	16,85	0,09	0,40	-0,75	-1,07

**Таблица 5. Штормовые нагоны в дельте Дона в 2015–2020 гг. Сопоставление величины твердого стока и оседания взвеси в дельте за период нагона для двух вариантов модели динамики взвешенного вещества**

Номер нагона	Даты нагона	Максимальный уровень нагона, м	Средний расход воды, м <sup>3</sup> /с	Средняя концентрация взвеси, мг/л	Средний расход наносов, кг/с	Твердый сток за период нагона, тыс. тонн	Объем взвеси, осевшей в дельте в результате нагона, тыс. тонн	
							А	Б
01	18/03/2018–21/03/2018	1,77	473	5,14	2,41	0,83	22,09	4,19
02	15/04/2020–18/04/2020	1,75	300	18,87	5,66	1,96	21,73	3,63
03	06/12/2016–09/12/2016	1,73	589	7,3	4,3	1,49	21,29	3,60
04	28/10/2017–31/10/2017	1,69	537	37,76	19,23	6,65	20,54	3,34
05	25/03/2017–28/03/2017	1,64	435	18,37	8,06	2,79	19,63	3,05
06	19/03/2016–22/03/2016	1,6	394	10,13	4,03	1,39	18,92	2,83
07	01/12/2016–04/12/2016	1,6	562	5,6	3,16	1,09	18,86	2,83
08	21/12/2017–24/12/2017	1,6	468	5,12	2,4	0,83	18,89	2,83
09	18/04/2015–21/04/2015	1,53	473	4,98	2,4	0,83	17,64	2,48
10	15/04/2015–17/04/2015	1,5	447	5,3	2,37	0,61	17,13	2,35
11	21/04/2016–24/04/2016	1,49	413	8,89	3,47	1,2	16,97	2,31
12	23/12/2018–26/12/2018	1,41	474	11,31	5,57	1,92	15,59	1,99
13	31/03/2016–03/04/2016	1,4	413	7,74	3,12	1,08	15,45	2,37
14	30/11/2015–03/12/2015	1,37	456	7,4	3,42	1,18	14,94	1,85
15	21/06/2017–24/06/2017	1,37	481	31,04	15,12	5,22	14,93	1,85
16	19/04/2018–22/04/2018	1,36	1440	38,47	56,61	19,56	14,28	1,28
17	23/01/2020–26/01/2020	1,36	342	24,4	8,28	2,86	14,84	1,81
18	23/02/2020–26/02/2020	1,34	361	43,4	15,65	5,41	14,5	1,75
19	26/04/2016–29/04/2016	1,32	382	2,55	0,97	0,34	14,17	1,68
20	25/12/2015–28/12/2015	1,3	381	3,13	1,19	0,41	13,86	1,62
21	10/02/2020–13/02/2020	1,3	343	38,91	13,35	4,61	13,88	1,62
22	29/12/2019–01/01/2019	1,29	460	31,53	14,76	5,1	13,66	1,59
23	21/04/2017–24/04/2017	1,24	506	15,93	8,14	2,81	12,86	1,45
24	16/04/2017–19/04/2017	1,23	486	15,8	7,62	2,63	12,72	1,42
25	20/09/2019–23/09/2019	1,23	521	40,51	21,01	7,26	12,7	1,42
26	19/11/2015–22/11/2015	1,19	344	6,43	2,22	0,77	12,2	1,32
27	05/12/2015–08/12/2015	1,19	421	8,7	3,61	1,25	12,15	1,32

Номер нагона	Даты нагона	Максимальный уровень нагона, м	Средний расход воды, м <sup>3</sup> /с	Средняя концентрация взвеси, мг/л	Средний расход наносов, кг/с	Твердый сток за период нагона, тыс. тонн	Объем взвеси, осевшей в дельте в результате нагона, тыс. тонн	
							А	Б
28	27/02/2020–29/02/2020	1,19	367	46,67	17,11	4,43	12,19	1,32
29	01/11/2017–02/11/2017	1,17	658	29,89	19,64	3,39	11,72	1,27
30	29/03/2017–30/03/2017	1,16	482	18,35	8,89	1,54	11,67	1,25
31	26/02/2019–01/03/2019	1,13	546	23,53	13,25	4,58	11,2	1,18
32	27/07/2017–30/07/2017	1,12	441	9,74	4,36	1,51	11,12	1,16
33	08/11/2016–11/11/2016	1,11	445	7,32	3,27	1,13	10,97	1,14
34	20/03/2019–23/03/2019	1,1	570	14,8	8,5	2,94	10,76	1,12
35	03/04/2015–06/04/2015	1,09	377	2,98	1,11	0,38	11,65	1,10
36	13/05/2015–16/05/2015	1,09	425	3,65	1,53	0,53	10,7	1,10
37	16/09/2019–19/09/2019	1,09	500	47,17	23,63	8,17	10,66	1,10
38	09/01/2019–12/01/2019	1,08	470	33,11	15,41	5,33	10,54	1,08
39	18/01/2016–21/01/2016	1,07	364	5	1,74	0,6	10,46	1,06
40	22/02/2019–25/02/2019	1,06	517	31,28	16,19	5,59	10,23	1,14
41	11/05/2016–14/05/2016	1,05	404	4,8	2	0,69	10,16	1,02
42	19/07/2016–22/07/2016	1,05	399	4,2	1,67	0,58	10,16	1,02
43	12/11/2016–14/11/2016	1,05	445	10,06	4,45	1,15	10,13	1,02
44	03/08/2019–06/08/2019	1,04	521	30,4	16	5,53	9,95	1,00
45	17/05/2015–18/05/2015	1,03	444	4	1,78	0,31	9,86	0,98
46	24/05/2019–27/05/2019	1,03	588	46,19	27,08	9,36	9,77	0,98
47	22/04/2015–25/04/2015	1,0	457	4,32	2,01	0,7	9,45	0,93
48	18/05/2016–21/05/2016	1,0	440	4,33	1,88	0,65	9,46	0,93
49	18/09/2016–21/09/2016	1,0	394	3,18	1,27	0,44	9,49	0,93
50	12/04/2017–15/04/2017	1,0	476	14,59	6,91	2,39	9,44	0,93

Примечание: А) по (Лихтанская и др., 2023); Б) расчет по новой версии модели DonDeltaBalanceModel.



**Рисунок 22. Сопоставление твердого стока в ст. Раздорская с объемом взвешенных наносов, которые потенциально осаждаются в дельте в период нагона, рассчитанных по новой версии модели DonDeltaBalanceModel**

**Таблица 6. Твердый сток р. Дон (ст. Раздорская) и осаждение взвешенных наносов в дельте Дона при штормовых нагонах**

Год	Число дней с нагоном	(Лихтанская и др., 2023)		Новая версия модели DonDeltaBalanceModel		
		Сток наносов, тыс. тонн	Осаждение взвешенных наносов в дельте Дона, тыс. тонн			
			Без учета влияния солености	С учетом влияния солености	Изменение, %	
2015	37	65,2	129,6	15,04	16,79	11,6
2016	51	72,9	176,5	22,72	26,17	15,2
2017	36	356,8	143,5	18,54	21,59	16,4
2018	12	331,6	52,0	7,46	9,68	29,8
2019	35	496,6	99,5	10,61	11,13	4,9
2020	19	318,3	77,1	10,13	11,70	15,5

Сравнение с результатами, опубликованными в статье (Лихтанская и др., 2023), показали существенное отличие в оценках соотношения твердого стока и объема взвешенного материала, оседающего в дельте Дона.

Сделаны следующие выводы, объясняющие различия, обусловленные разными подходами к оценке динамики взвешенного материала при нагонных явлениях.

Новая версия модели, предусматривающая процессы седиментации взвешенного вещества и ресуспензии донных отложений, демонстрирует следующий механизм, определяющий разную динамику взвешенных наносов в различных районах устьевой области. Выявлено, что скорость течения при спаде уровня воды после прохождения пика нагона в русловых становится существенно выше, чем при подъеме уровня (рис. 9-15). В результате взвешенное вещество, поступившее в дельту при подъеме уровня и оседающее на участках с околонулевыми скоростями затем опять выносится за пределы морского края дельты. В целом при нагонах с небольшими расходами воды (300-600 м<sup>3</sup>/с) в русловых ячейках взвешенное вещество накапливается, но с ростом расходов до 1400 м<sup>3</sup>/с баланс смещается в сторону ресуспензии донных отложений (табл. 4). Тот же эффект характерен и для экстремального нагона 3,7 м при средних расходах воды (450 м<sup>3</sup>/с). Оценки, представленные в статье (Лихтанская и др., 2023), опирались на расчеты, выполненные в работе (Шевердяев, Клещенков, 2020). По-видимому, в ней были завышены скорости седиментации взвешенного вещества за счет наличия растительности в пойменных участках дельты. Отсутствие данных по накоплению взвеси в седиментационных ловушках в тот период не позволили провести верификацию параметров модели. В новой версии модели DonDeltaBalanceModel есть различия в скорости осадконакопления в пойменных участках, сильно заросших тростником и рогозом (рисунки 16-21, гирло Свиное, остров Бирючий). По-видимому, этот фактор необходимо принимать во внимание. В новой версии модели наибольшее накопление взвешенного вещества отмечается для районов, расположенных на устьевом взморье. Фактически взвесь, поднятая волнением со дна в период развития нагона, возвращается обратно, за исключением той части, которая оседает в пойменных участках и в отдельных рукавах дельты.

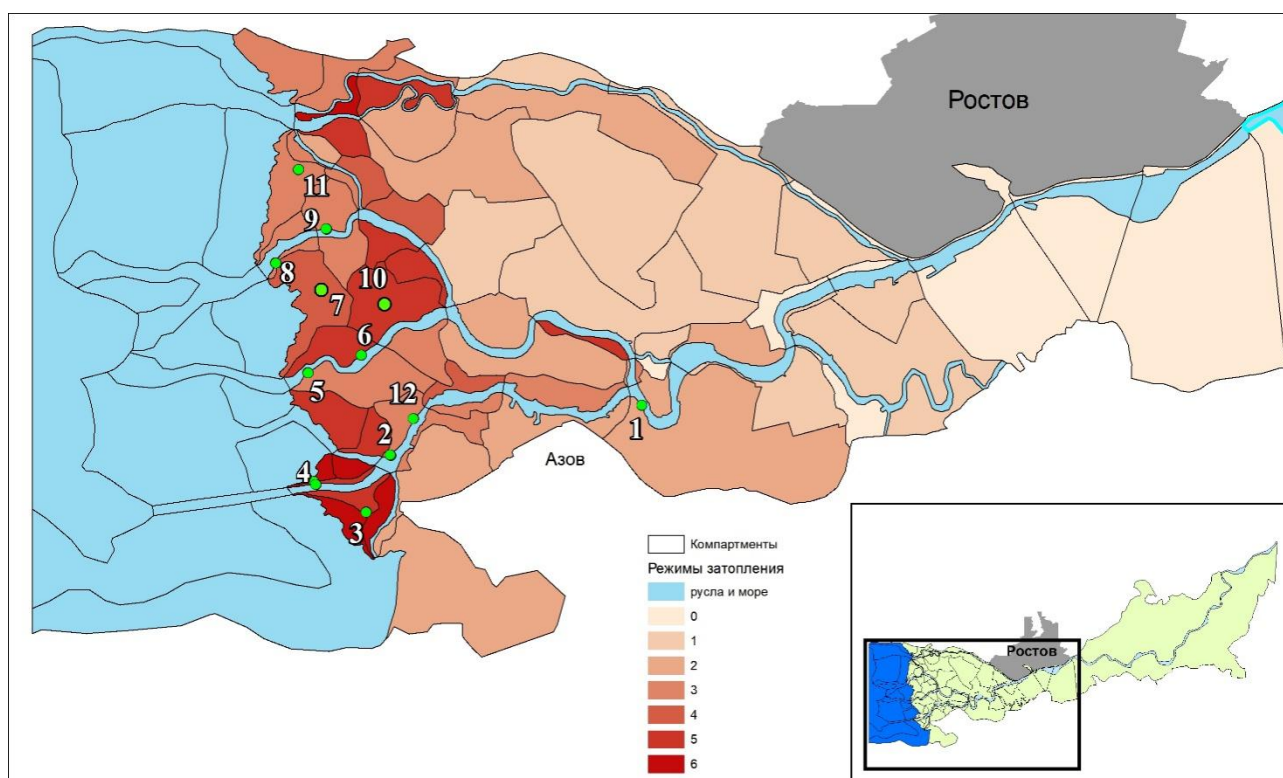
Число дней с нагонами в 2015-2020 гг. изменялось от 12 до 51 дня. В остальное время взвесь, переносимая речными водами, могла накапливаться в русловых сегментах дельты (в условиях маловодья при расходах воды 300-600 м<sup>3</sup>/с вода на пойму не выходит). Но периодические нагоны могут способствовать в дальнейшем выносу этого материала за пределы морского края дельты. Вместе с тем, чтобы это проверить, необходимо выполнить расчет на всем годовом интервале времени (что в рамках проекта технически оказалось трудно осуществить из-за значительного времени, которое требует модель DonDeltaHECRAS, это перспектива на будущее).

Предположение о том, что осолоненные воды, проникающие в дельту при нагоне, вместе с эффектом снижения скоростей течений, когда нагонные воды встречаются с речными, может существенно повлиять на седиментацию взвеси в дельте, не подтвердилось. Увеличение скорости осаждения взвеси в диапазоне солёности 1-4 г/л в два раза (как показали лабораторные эксперименты в работе (Герасюк, Бердников, 2021)) привели к увеличению накапливаемого материала в пойменных сегментах не более чем на 10%, хотя для отдельных гидрологических режимов наблюдается и более значительный эффект, прежде всего для районов, расположенных на устьевом взморье (таблица 4). Для периода 2015-2020 гг. на годовом интервале времени увеличение накопленного в пойменных и русловых районах взвешенного материала изменяется от 5 до 30 %, но в основном в пределах 15% (таблица 6). Таким образом, гипотеза о том, что проникновение осолоненных (из-за роста солёности Азовского моря) вод в дельту при нагонах существенно влияет на процессы седиментации взвешенного материала в рамках принятого модельного подхода не находит подтверждения.

**Подзадача 4 (2023). Математическое моделирование динамики соединений тяжелых металлов в устьевой области Дона при различных расходах воды в ее вершине и сгонно-нагонных колебаниях уровня в Таганрогском заливе. Оценка влияния гидрологического режима в дельте Дона в период маловодья на накопление соединений тяжелых металлов в затапливаемых почвах на основе математического моделирования и данных наблюдений, проверка гипотезы, что основным механизмом загрязнения почв дельты Дона соединениями тяжелых металлов является их перенос из Таганрогского залива с взвешенным веществом при штормовых нагонах.**

С применением математического моделирования получен комплект сценарных расчётов динамики тяжёлых металлов в устьевой области Дона при различных расходах воды в ее вершине и сгонно-нагонных колебаниях уровня в Таганрогском заливе.

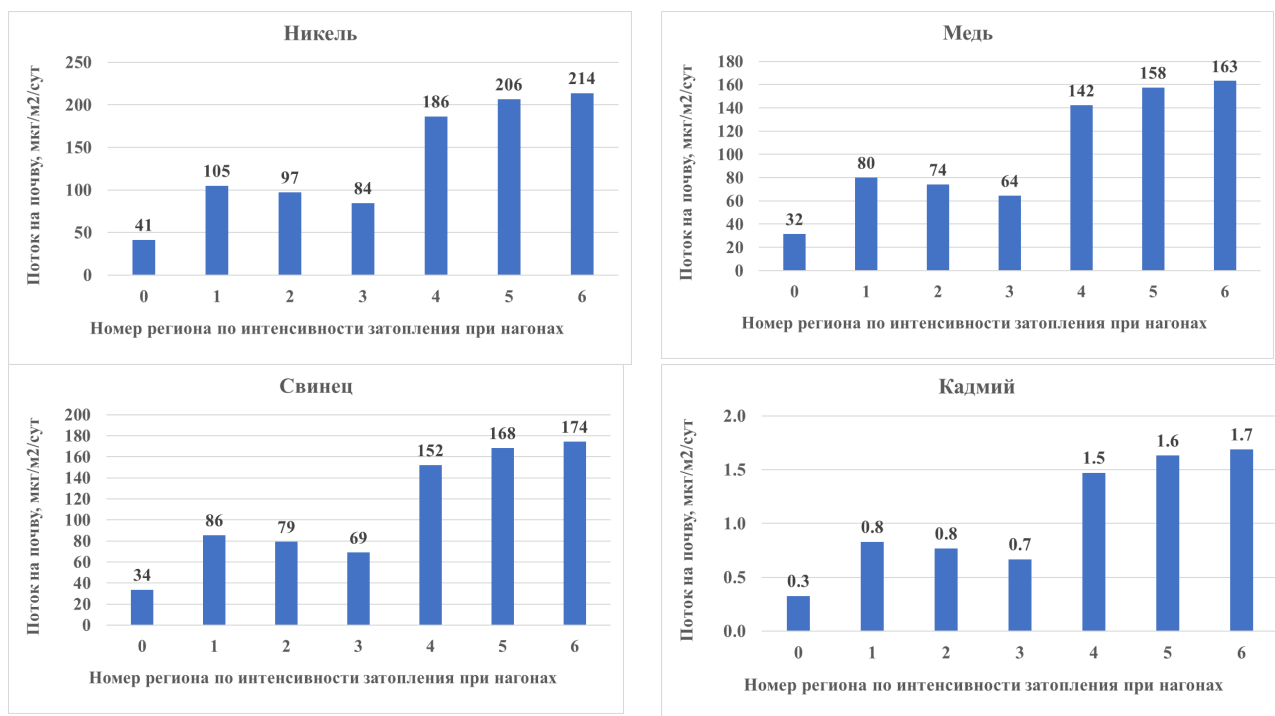
В основу расчетов положены результаты моделирования гидрологического режима в устьевой области Дон для 6 нагонов различной обеспеченности (см Подзадачу 2.2) и динамики взвешенного вещества (см. подзадачу 3.4). Используются также данные экспедиционных исследований, выполненных в дельте Дона в 2021 г. исполнителем проекта В.В.Клещенковым и предоставленные для использования в гранте (рис. 23). Определения содержания ТМ в образцах почв выполнены в Южном федеральном университете научной группой под руководством проф. Т.М.Минкиной.



**Рисунок 23. Компарменты (регионы) модели DonDeltaBalanceModel с разной интенсивностью затопления и расположение точек отбора почвенных проб**

По результатам гидрологического моделирования устьевая область районирована по интенсивности затопления (сводный индекс, объединяющий долю площади каждого района гидрологического районирования, которая затапливается водой при нагонах и число дней в году, с учетом обеспеченности нагонов, когда вода заливаает пойму дельты) (рис. 23).

По результатам моделирования динамики взвеси с учетом содержания в ней ТМ и органического углерода впервые получены оценки поступления ТМ и углерода в верхний слой почвы дельты Дона при нагонах (рис. 24 и 25).



**Рисунок 24. Средняя суточная интенсивность поступления соединений ТМ на почвы дельты Дона в дни ее затопления при нагонах для регионов с разной интенсивностью затопления**



**Рисунок 25. Средняя суточная интенсивность поступления Сорг на почвы дельты Дона в дни ее затопления при нагонах для регионов с разной интенсивностью затопления**

Результаты моделирования демонстрируют, что в современный период маловодья, в отсутствие затопления поймы дельты при паводках, морской фактор может быть основным механизмом загрязнения почв дельты Дона соединениями ТМ в результате их переноса с взвесью из Таганрогского залива.

Сделаны предварительные оценки возможного влияния поступления ТМ с взвесью на загрязнение почвы дельты (табл. 7).



**Таблица 7. Оценка влияния нагонов на поступление соединений ТМ в почвы дельты Дона для регионов с разной интенсивностью затопления в течение года**

Номер региона по интенсивности затопления	Среднее содержание ТМ в верхнем (20 см) слое почвы, мг/кг			Поступление ТМ в дельту в течение года с нагонами, мг/м <sup>2</sup> /год			Изменение содержания металлов в верхнем слое почвы (1 см) за год из-за нагонов, %		
	Ni	Cu	Pb	Ni	Cu	Pb	Ni	Cu	Pb
0	-	-	-	2,1	1,6	1,8	-	-	-
1	-	-	-	5,5	4,2	4,5	-	-	-
2	31,6	36,4	27,0	5,1	3,9	4,1	0,61	0,41	0,59
3	31,3	36,7	26,5	4,4	3,4	3,6	0,54	0,35	0,52
4	36,2	34,0	21,8	9,7	7,4	7,9	1,03	0,84	1,39
5	36,3	37,3	24,5	10,7	8,2	8,8	1,14	0,85	1,37
6	-	-	-	11,1	8,5	9,1			

**Подзадача 5 (2023). Количественная оценка роли устьевой области Дона в качестве фильтра на пути миграции химических соединений в растворенной и взвешенной формах из реки в море**

В результате обобщения полученных в ходе выполнения оценок по динамике взвешенного вещества в устьевой области Дона в период маловодья под влиянием нагона воды со стороны моря, получены количественные оценки вклада дельты Дона и устьевого взморья в качестве фильтра на пути миграции химических соединений с речными водами в Азовское море табл. 8).

**Таблица 8. Роль устьевой области Дона в качестве фильтра на пути миграции химических соединений в Азовское море**

Год	Сток наносов <sup>1</sup> , р. Дон, тыс. т	Осело в устьевой области, тыс тонн			РОС, тыс тонн/год		Поступило с рекой, т в год				Осело в устьевой области, т в год			
		При нагонах	Без учета нагонов	Всего	Поступило с рекой	Осело в устьевой области	Ni	Cu	Pb	Cd	Ni	Cu	Pb	Cd
2015	65,2	2,85	10,0	12,81	3,80	0,75	2,5	1,9	2,0	0,020	0,49	0,37	0,39	0,004
2016	72,9	4,77	10,7	15,43	3,95	0,84	2,8	2,1	2,3	0,020	0,59	0,44	0,49	0,004
2017	356,8	11,48	54,7	66,16	19,45	3,61	13,6	10,3	11,1	0,110	2,52	1,91	2,06	0,020
2018	331,6	3,41	54,5	57,93	18,10	3,16	12,6	9,6	10,3	0,100	2,20	1,68	1,80	0,017
2019	496,6	20,57	76,3	96,90	27,45	5,36	18,9	14,4	15,4	0,150	3,69	2,81	3,00	0,029
2020	318,3	8,32	51,3	59,62	17,35	3,25	12,1	9,3	9,9	0,100	2,27	1,74	1,85	0,019

Примечание: 1- по (Лихтанская и др., 2023)

**Сформулировано следующее положение о механизме влияния устьевой области на транспорт химических элементов в условиях действия морского фактора (нагоны разной обеспеченности) в отсутствии ярко выраженных половодий, существенной трансформации**

## твёрдого стока из-за зарегулирования рек и в условиях роста солёности Азовского моря

1. В отсутствии нагонных явлений и незначительны расходов воды взвешенные вещества и мигрирующие в их составе химические соединения практически транзитом проходят дельту, незначительно осаждаюсь в рукавах со слабыми скоростями, но в основном осаждаются на устьевом взморье за пределами морского края дельты.

2. При нагоне любой обеспеченности взвешенные вещества вместе с химическими соединениями в их составе, накопленные на устьевом взморье, под воздействием волнения насыщают воду и поступают на этапе подъема уровня в дельту, осаждаюсь частично в рукавах, и частично на залитых водой пойменных участках дельты. При снижении уровня нагона, вещества, осевшие на пойменных участках дельты в основном там и остаются, а вещества, накопленные в русловых сегментах, 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. частоты нагонных явлений, при отсутствии паводков, устьевая область Дона задерживает в среднем 20% взвешенных и мигрирующих в их составе химических соединений, поступающих со стоком р.Дон.

4. Рост солёности Азовского моря и проникновение солёных вод в дельту увеличивают условия седиментогенеза в устьевой области не более чем на 15%. Большее значение может иметь пленка растворенного органического вещества на поверхности взвешенных частиц и наличие органического вещества в составе взвеси. Но здесь необходимы дополнительные исследования.

### Список литературы

Клещенков А.В., Герасюк В.В., Кулыгин В.В., Бердников С.В. Взвешенное вещество вод от Цимлянского водохранилища до Таганрогского залива в период длительного маловодья 2006 - 2020 гг. // Наука Юга России. 2022. Т. 19. № 1. С. 29-39. <https://doi.org/10.7868/25000640230104>

Лихтанская Н.В., Бердников С.В., Клещенков А.В. Твёрдый 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. ES4010. <https://doi.org/10.2205/2023ES000856>.

Клещенков А.В., Шевурдяев И.В. Численное исследование условий осаждения взвеси в дельте Дона при нагонах // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б.Виноградова «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен». СПб.: Изд-во ВВМ, 2023. С 211-216.

Герасюк В.С., Бердников С.В. Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе // Океанология. 2021. Т. 61. № 5. С. 780-790. <https://doi.org/10.31857/S0030157421040055>

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