

Международный проект «Повышение адаптационного потенциала при управлении городскими водными ресурсами» (RAINMAN KS-1038) Программы трансграничного сотрудничества Юго-Восточной Финляндии и России 2014-2020 гг.

Основные промежуточные выводы и результаты, полученные при разработке рекомендаций по адаптации систем водоотведения Санкт-Петербурга к условиям изменяющегося климата и уровню благоустройства городской среды.

**С. Н. ВОЛКОВ¹, А. И. ЖИТЕНЕВ², О. Н. РУБЛЕВСКАЯ³, В. А. ГВОЗДЕВ⁴,
И. Г. КОСТЕНКО⁵, А. А. БАКУЛИН⁶, В. С. ИГНАТЧИК⁷,
С. Ю. ИГНАТЧИК⁸, Н. В. КУЗНЕЦОВА⁹**

¹ Волков Сергей Николаевич, заместитель генерального директора – директор по производству, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 42, тел.: (812) 326-53-24, e-mail: Volkov_SN@vodokanal.spb.ru

² Житенев Антон Игоревич, директор филиала «Водоотведение Санкт-Петербурга», ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

198184, Россия, Санкт-Петербург, остров Белый, д. 1, тел.: (812) 713-90-06, e-mail: Gitenev_AI@vodokanal.spb.ru

³ Рублевская Ольга Николаевна, директор Департамента анализа и технологического развития систем водоснабжения и водоотведения, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 42, тел.: (812) 428-43-45, e-mail: Rublevskaya_ON@vodokanal.spb.ru

⁴ Гвоздев Владимир Андреевич, заместитель директора Департамента анализа и технологического развития систем водоснабжения и водоотведения, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 42, тел.: (812) 428-43-26, e-mail: Gvozdev_VA@vodokanal.spb.ru

⁵ Костенко Ирина Геннадьевна, начальник управления водного баланса и производственного контроля филиала «Водоотведение Санкт-Петербурга», ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

198184, Россия, Санкт-Петербург, остров Белый, д. 1, тел.: (812) 329-34-60, e-mail: Kostenko_IG@vodokanal.spb.ru

⁶ Бакулин Александр Александрович, начальник службы обследования территорий города филиала «Водоотведение Санкт-Петербурга», ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

198184, Россия, Санкт-Петербург, остров Белый, д. 1, тел.: (812) 329-34-60, e-mail: Bakulin_AA@vodokanal.spb.ru

⁷ Игнатчик Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Военная академия материально-технического обеспечения 191123, Россия, Санкт-Петербург, Захарьевская ул., 22, тел.: (812) 579- 55-71, e-mail: Ign73@yandex.ru

⁸ Игнатчик Светлана Юрьевна, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет 190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, тел.: (812) 316-72-97, e-mail: Ignatchik_SY@yandex.ru

⁹ Кузнецова Наталия Викторовна, кандидат технических наук, ведущий инженер, ООО «Ассоциация инженеров и ученых по водоснабжению и водоотведению» 196105, Санкт-Петербург, ул. Решетникова, д.15, лит. А, п. 58Н оф. 411, тел.: (812) -387-60-88, e-mail: NatalyaKuznetsova.aviv@yandex.ru

1. В результате гидравлического динамического моделирования установлено, что имеет место два механизма затопления территории Санкт-Петербурга:

- первый, когда недостаточна пропускная способность участков сетей. В этом случае вода поднимается на поверхность на «хвостах» участков, см. рис. 1.

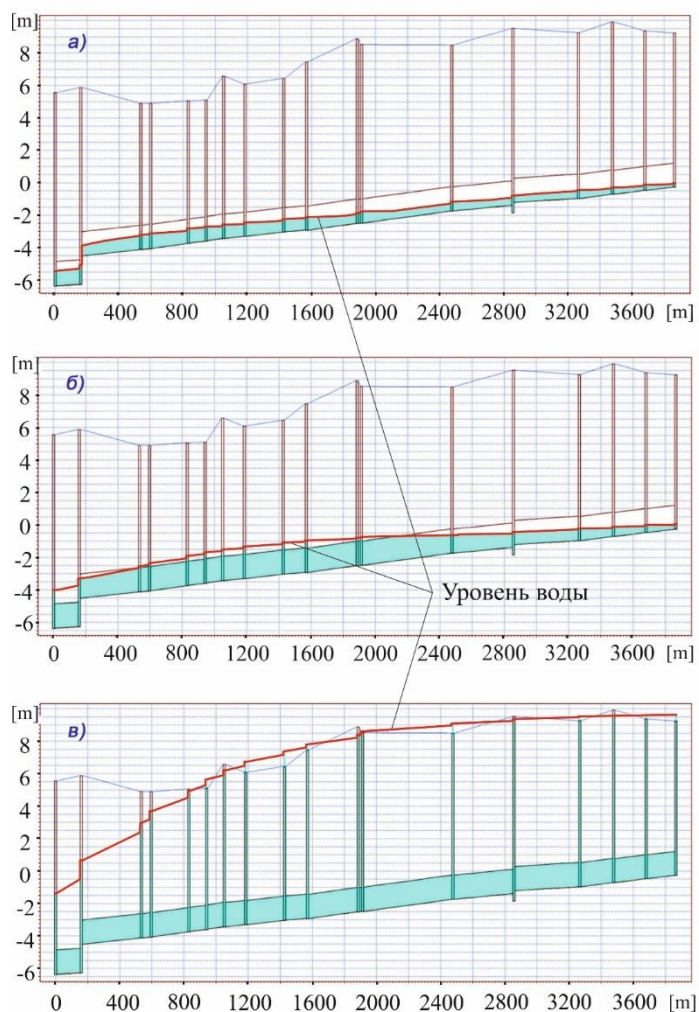


Рис. 1. Механизм подтопления самотечного канализационного коллектора при превышении притока сточных вод над его пропускной способностью в результате поступления сверхрасчетного расхода сточных вод по длине коллектора: *a* – профиль и наполнение коллектора при расчетном q притоке сточных вод; *б* – тоже, при притоке $2q$; *в* – тоже, при притоке $3,5q$ - второй, когда недостаточна откачка насосными станциями. В этом случае вода поднимается на поверхность с «головы» участков, см. рис. 2. Возможно одновременное действие двух механизмов, см. рис. 3.

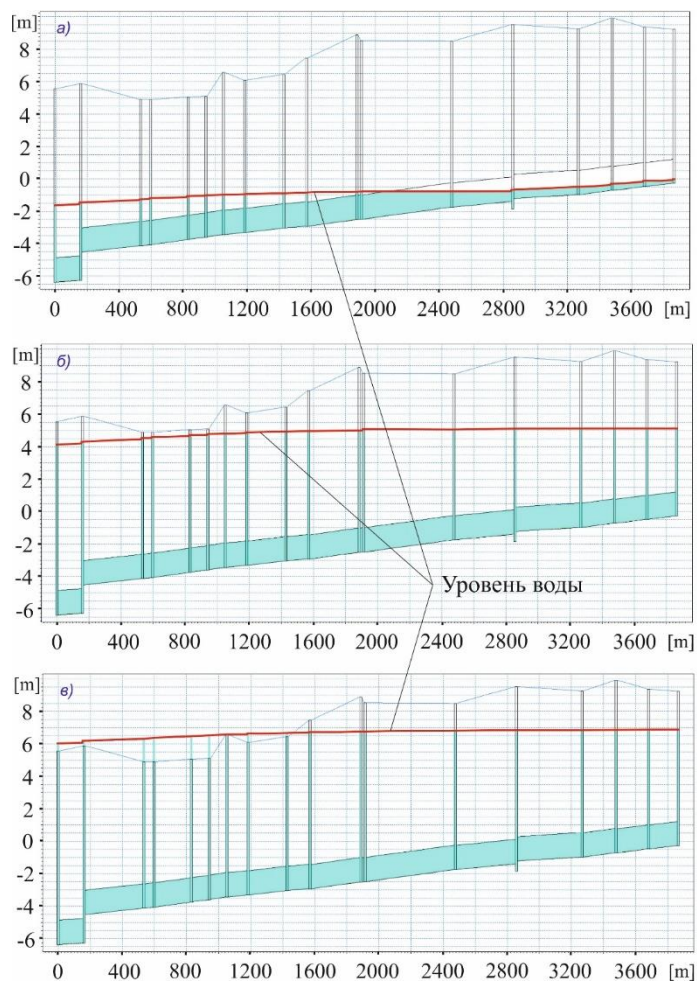


Рис. 2. Механизм подтопления самотечного канализационного коллектора при пьезометрическом подпоре и прикрытии шибера перед КНС в результате поступления сверхрасчетного расхода сточных вод по длине коллектора: а – профиль и наполнение коллектора при подпоре $H_{\text{подп}}=3D_{\text{кол}}$ и степени открытия шибера $H_{\text{шиб}}= 100\%$; б – тоже, при $H_{\text{подп}}=3D_{\text{кол}}$ и $H_{\text{шиб}}= 15\%$; в – тоже, при $H_{\text{подп}}=3D_{\text{кол}}$ и $H_{\text{шиб}}= 10\%$

2. Для определения чувствительности систем водоотведения к условиям текущего изменения климата разработана программа – методика гидравлического моделирования, включающая: обоснование представительных бассейнов для исследования чувствительности систем водоотведения к условиям текущего изменения климата; гидравлический расчет сетей водоотведения представительных бассейнов по действующим на момент их проектирования нормам; обоснование параметров и хода выпадения расчетных дождей для гидравлического моделирования; гидравлическое моделирование представительных бассейнов, см. рис. 4.

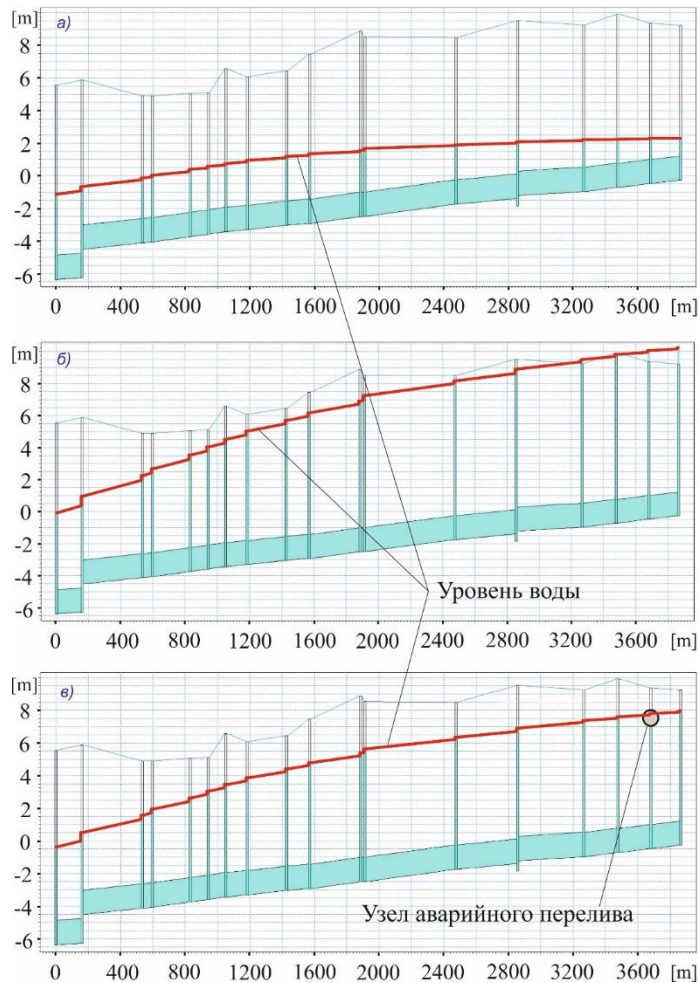


Рис. 3. Механизм подтопления самотечного канализационного коллектора при одновременном превышении притока сточных вод над его пропускной способностью и закрытии шибера перед КНС в результате поступления сверхрасчетного расхода сточных вод: а – профиль и наполнение коллектора при подпоре $H_{\text{подп}}=3D_{\text{кол}}$, степени открытия шибера $H_{\text{шиб}}=75\%$ и при притоке $2q$; б – тоже, при $H_{\text{подп}}=3D_{\text{кол}}$ и $H_{\text{шиб}}=65\%$ и при притоке $2,5q$; в – тоже, при установке узла аварийного перелива

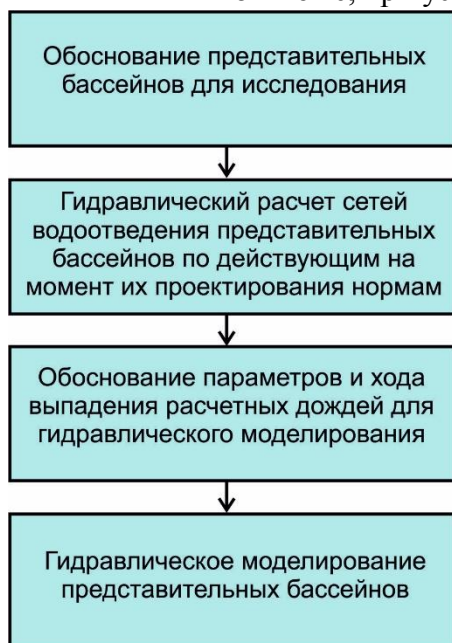


Рис. 4. Программа – методика гидравлического моделирования

3. Произведена оценка распределения всех сетей водоотведения Санкт-Петербурга в зависимости от нормативной базы по их проектированию. Результаты исследования приведены на рис. 5. Из него видно, что большая часть сетей водоотведения запроектированы по ТУиН 1954, СНиП П-Г.6-62, СНиП П-32-74, СНиП 2.04.03-85, СП 32.13330.2012. Поэтому, в гидравлическое моделирование осуществлялось на примерах представительных бассейнов, рассчитанных по этим нормам.

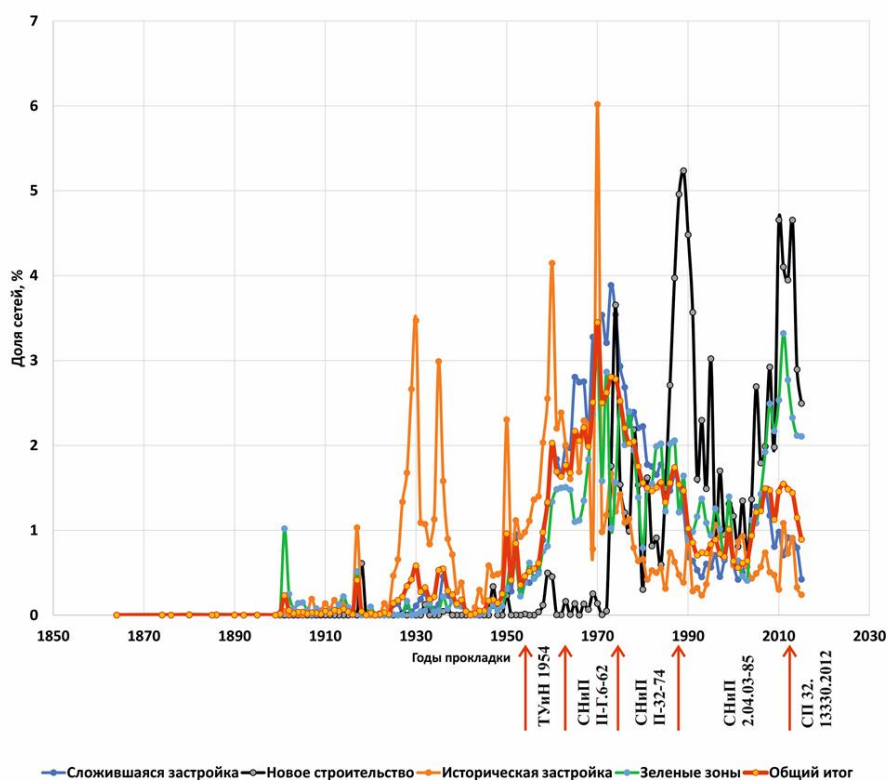


Рис. 5. Результаты исследования распределения сетей водоотведения Санкт-Петербурга в зависимости от нормативной базы по их проектированию

Гидравлические расчеты по всем перечисленным нормативным документам выполнены с применением метода предельных интенсивностей (модификация рационального метода). Отдельные результаты гидравлического моделирования представлены на рис. 6 – 10. В целом анализ полученных результатов свидетельствует о несовершенстве для Санкт – Петербурга всех расчетных климатических параметров (q_{20} , n , m , γ) и подтверждает необходимость их переработки, где: q_{20} - интенсивность дождя для данной местности продолжительностью 20 мин при периоде однократного превышения расчетной интенсивности

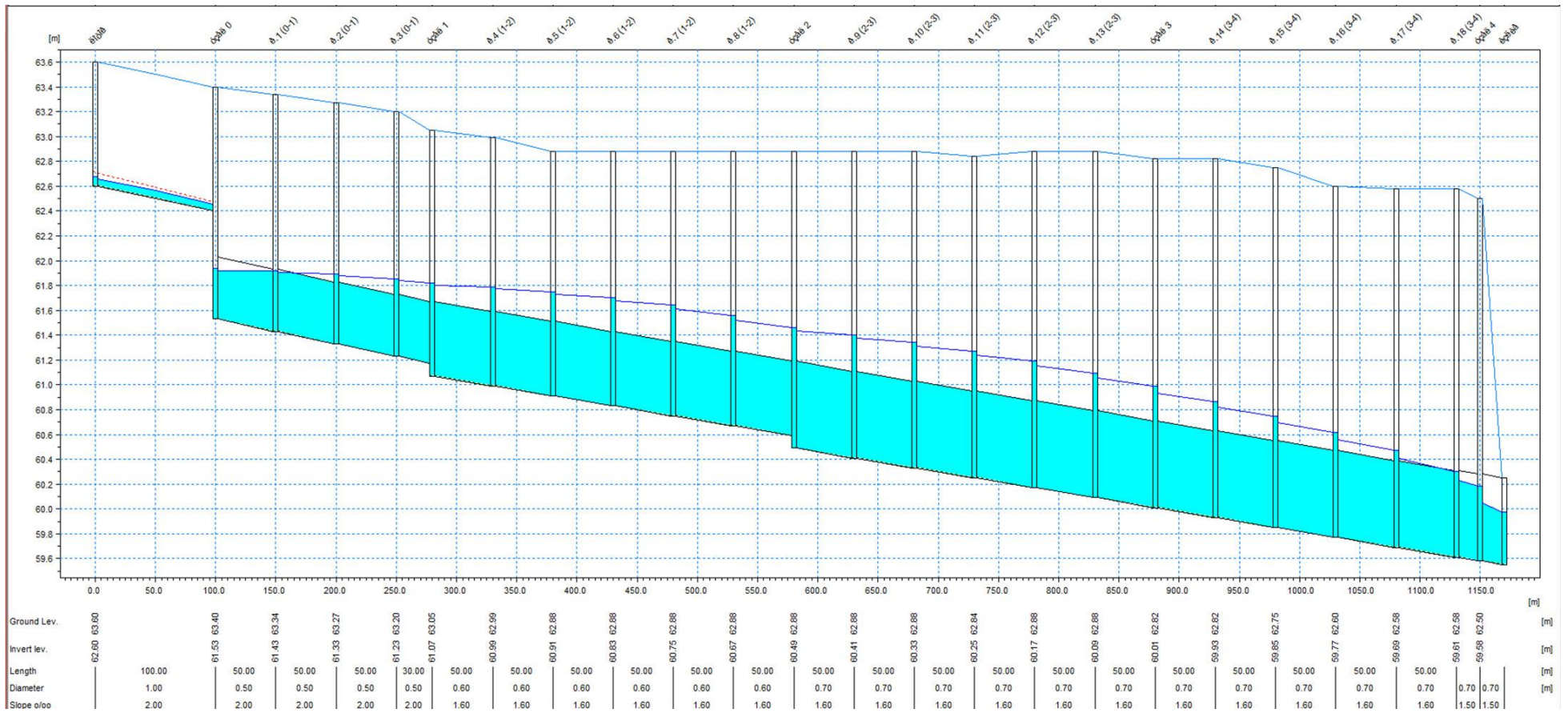


Рис. 6. Результаты гидравлического моделирования сети, рассчитанной на $p=0.33$ по ТУиН 1954, СНиП II-Г.6-62 при расчетном дожде с учетом сопротивлений в колодцах

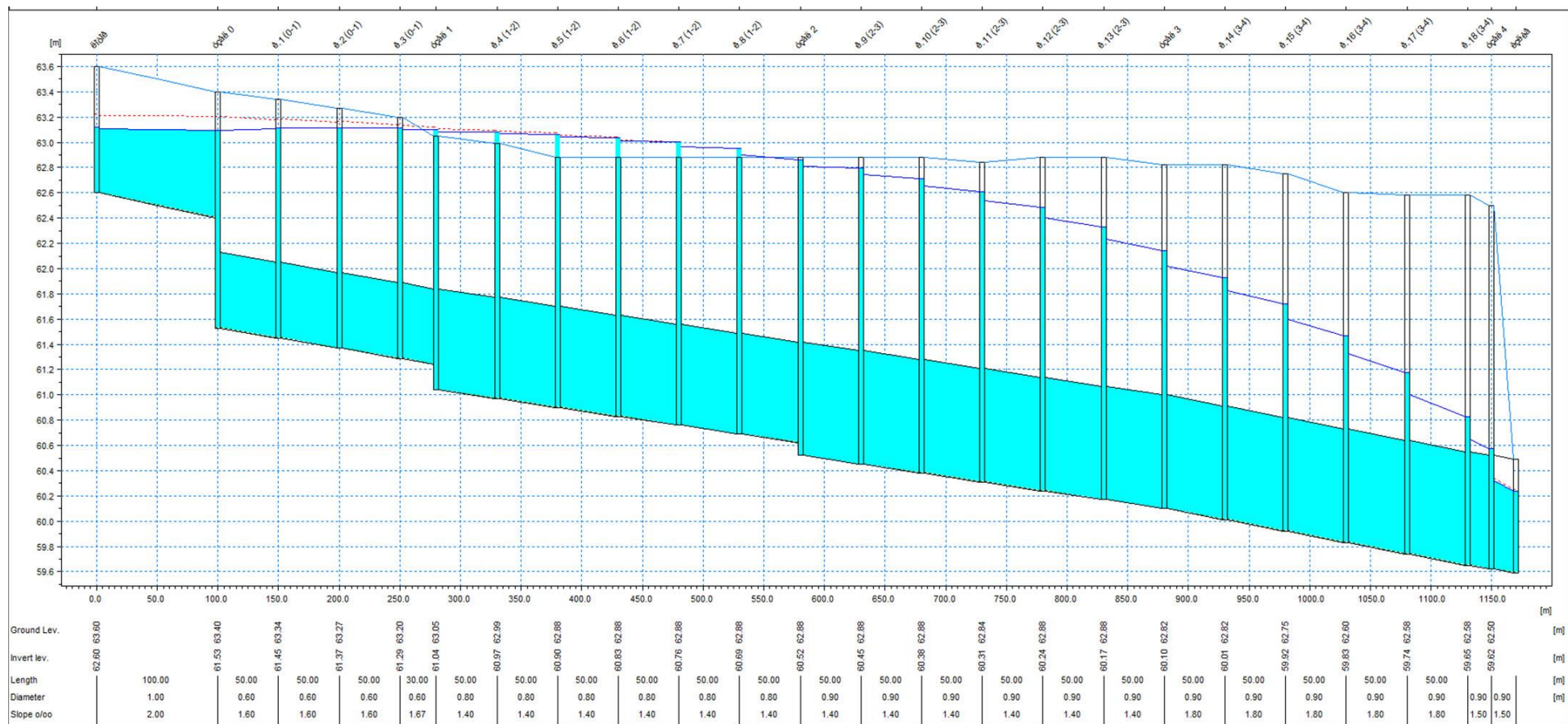


Рис. 7. Результаты гидравлического моделирования сети, рассчитанной на $r=1$ по ТУиН 1954, СНиП II-Г.6-62 при расчетном дожде с учетом сопротивлений в колодцах

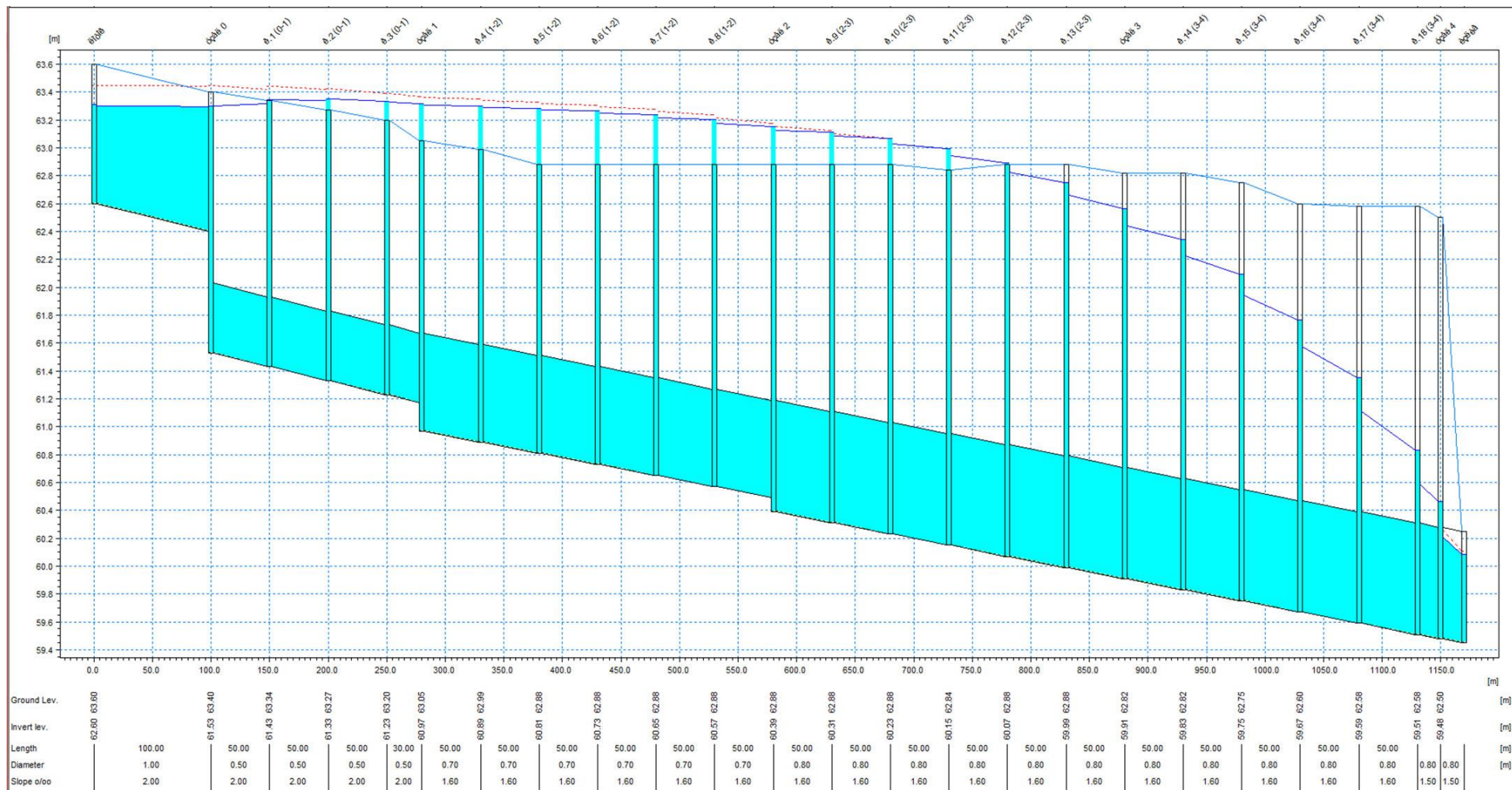


Рис. 8. Результаты гидравлического моделирования сети, рассчитанной на $p=0.33$ по СП 32.13330.2012 при сверхрасчетном дожде ($p=1$) с учетом сопротивлений в колодцах

дождя $P = 1$ год; m - среднее количество дождей за год; n, γ - эмпирические параметры.

4. Проведена оценка достоверности применения в качестве базы данных первичной информации о выпадении дождей в Санкт-Петербурге, накопленной в Росгидромете за пять лет (с 2015 по 2020 г.) при помощи 34 самопишущих дождемеров с интервалом 5 минут, для актуализации местных климатических параметров, применяемых в действующих сводах правил для проектирования систем водоотведения поверхностного стока. Установлено, что выявленные закономерности выпадения дождей за 5 лет не противоречат классической теории. При этом они, в отличие от результатов обработки многолетних данных в одной точке, более полно отображают особенности неравномерного распределения осадков по территории мегаполиса, см. рис. 9;

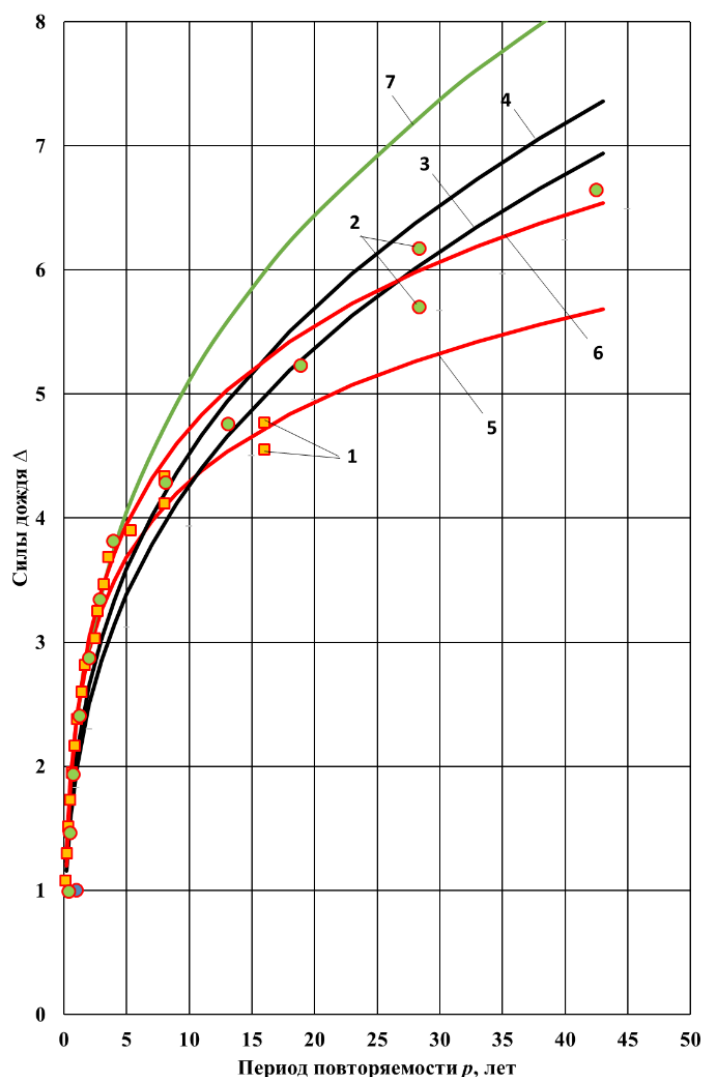


Рис. 9. Результаты сравнения различных методов оценки климатических зависимостей и их параметров: 1 – данные Белова Н. Н. в одной точке за период с 1897 по 1928 год; 2 – усредненные данные Росгидромета в 34 точках за период с 2015 по 2020 год; 3 – результаты аппроксимации данных Белова Н. Н.; 4 – то же, данных Росгидромета; 5- результаты аппроксимации данных Белова Н. Н. по логарифмической зависимости; 6 – то же, данных Росгидромета; 7 - по формуле проф. Горбачева П. Ф. в зависимости от суммарных годовых осадков

5. Проанализирована динамика изменения суммарных суточных осадков H в Санкт-Петербурге с 1881 по 2019 г, см. рис. 10. С учетом этих данных определены силы дождей. Их анализ показал, что при $p=0.33$ - рост сил дождя Δ составляет примерно 0,19% в год. Поэтому, для сетей, запроектированных и проложенных 50 лет назад фактическое изменение этого показателя составит 9 – 9,5%.

6. В результате исследований, выполненных с применением верифицированной гидравлической динамической модели представительной системы водоотведения поверхностного стока установлено, что в результате изменения климата расходы воды в расчетные периоды увеличились примерно на 26% при увеличении общего ее объема на 9 – 10%, см. рис. 11.

7. Сформулированы характеристики 4-х типовых зон застройки,

учитывающие средние значения коэффициентов стока, площади стока, удельного регулирующего объема и коэффициента использования регулирующего объема, см. табл. 1.

Таблица 1. Общая характеристика по 4 типовым зонам застройки Санкт-Петербурга

№ зоны	Названия зон	Коэффициент стока	Площади стока, га	Коэффициент k_v использования регулирующего объема	Удельный регулирующий объем $V_{уд}$, м ³ /га
1	Новое строительство	0,27	1126	0,5	21,7
1.1	Часть 1	0,22	471	0,5	20
1.2	Часть 2	0,38	655	0,5	25
2	Сложившаяся застройка	0,42	1157	0,8	30
3	Зеленые зоны	0,21	509	0,6	18
4	Историческая застройка	0,67	121	0,8	36

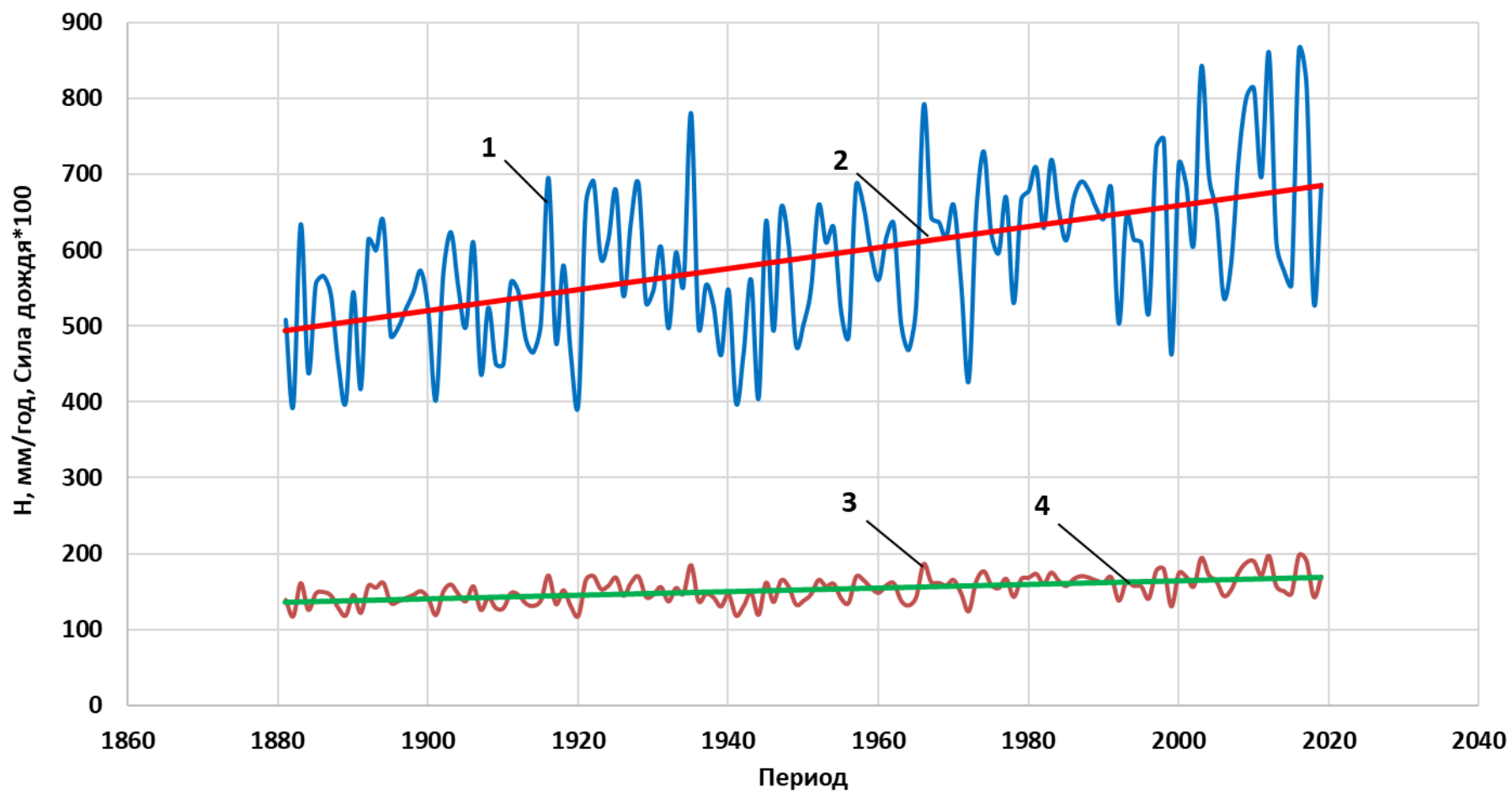


Рис. 10. Динамика изменения суммарных годовых осадков H и сил дождя Δ в Санкт-Петербурге с 1886 по 2019 г.: 1 – результаты обработки данных ФБГУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» и Росгидромета по изменению годовых осадков H ; 2 – результаты линейной аппроксимации данных H ; 3 – расчетные значения изменений сил дождя Δ ; 4 – результаты линейной аппроксимации данных Δ

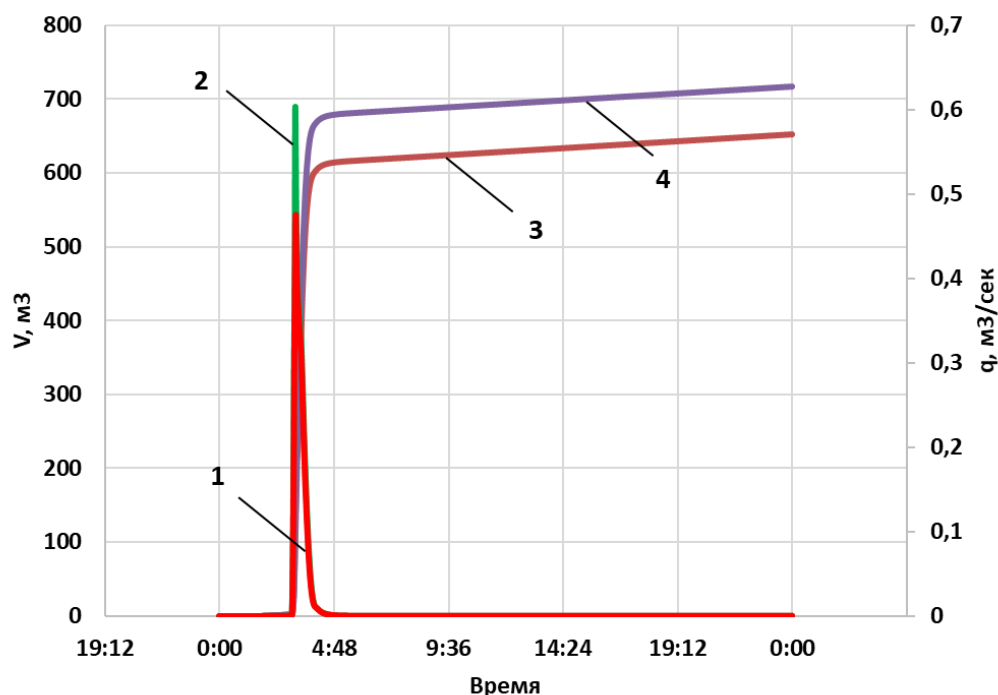


Рис. 11. Результаты изменения гидравлических режимов поступления стока: 1 – расход стока на период проектирования в результате выпадения расчетного дождя; 2– то же фактического расчетного, через 50 лет; 3 – объем стока при выпадении расчетного дождя на период проектирования; 4– то же, через 50 лет

8. Проведена оценка среднегодового расчетного количества затоплений территорий Санкт – Петербурга в результате возникновения напорных режимов в системах водоотведения для сформулированных характеристики 4-х типовых зон застройки. Результаты приведены в табл. 2. Здесь под подтоплением учитывалось события, происходящие исключительно по причине выпадения сверхрасчетных дождей с широким диапазоном продолжительности выхода воды на поверхность. Поэтому, самые непродолжительные из них, как правило, не фиксируются и не попадают в официальную статистику.

Таблица 2. Общие результаты оценки периодичности затоплений территорий Санкт - Петербурга

Название видов типовой застройки	Коэф. стока	$V_{уд}$	k_v	$k_v * V_{уд}$	Период подтоплений при p		Доля сетей, %	Среднее кол- во подтоплений в год при p		Общее
					0,33	1		0,33	1	
Новое строительство 1	0,22	20	0,5	10	2	11	5	3	1	4
Новое строительство 2	0,38	25	0,5	12,5	1	7	2	2	0	2

Сложившаяся	0,42	30	0,8	24	3	15	58	22	4	26
Зеленые зоны	0,21	18	0,6	10,8	3	10	21	8	2	10
Историческая застройка	0,67	36	0,8	28,8	2	8	14	8	2	10
Сумма							100	43	9	52

9. Для выработки рекомендаций по устранению подтоплений на наиболее уязвимых территориях с централизованными системами водоотведения разработана классификация механизмов устранения подтоплений территорий в Санкт-Петербурге. В нее дополнительно включены два новых механизма из проекта рекомендаций ХЕЛКОМ 23/5: отвод ливневой воды в низменные районы и проектирование систем с учетом будущих сценариев изменения климата, см. рис. 12.

10. Анализ нормативных и законодательных документов показал, что механизм, связанный с отводом воды в низменные районы, в Российской Федерации практически невозможен, т.к. сброс сточных вод на рельеф местности, в том числе и очищенных, в нашей стране законодательно не урегулирован. Явного запрета нет, но и разрешения Росприроднадзор на это не дает. Вопрос открытый. Сбрасывать поверхностные сточные воды можно только в водные объекты или централизованные системы водоотведения.

11. Для внедрения в Российской Федерации механизма проектирования систем с учетом будущих сценариев изменения климата требуется доработка нормативной базы, поскольку в действующих сводах Правил климатические параметры, с применением которых определяют расчетную интенсивность дождей, не только не учитывают будущие сценарии изменений климата, но и настоящие определяют по данным 35-ти летней давности. Поскольку в масштабах всей страны, как делалось раньше, это сделать невозможно, то в Санкт – Петербурге целесообразно этот механизм разработать и утвердить на уровне регионального методического документа.

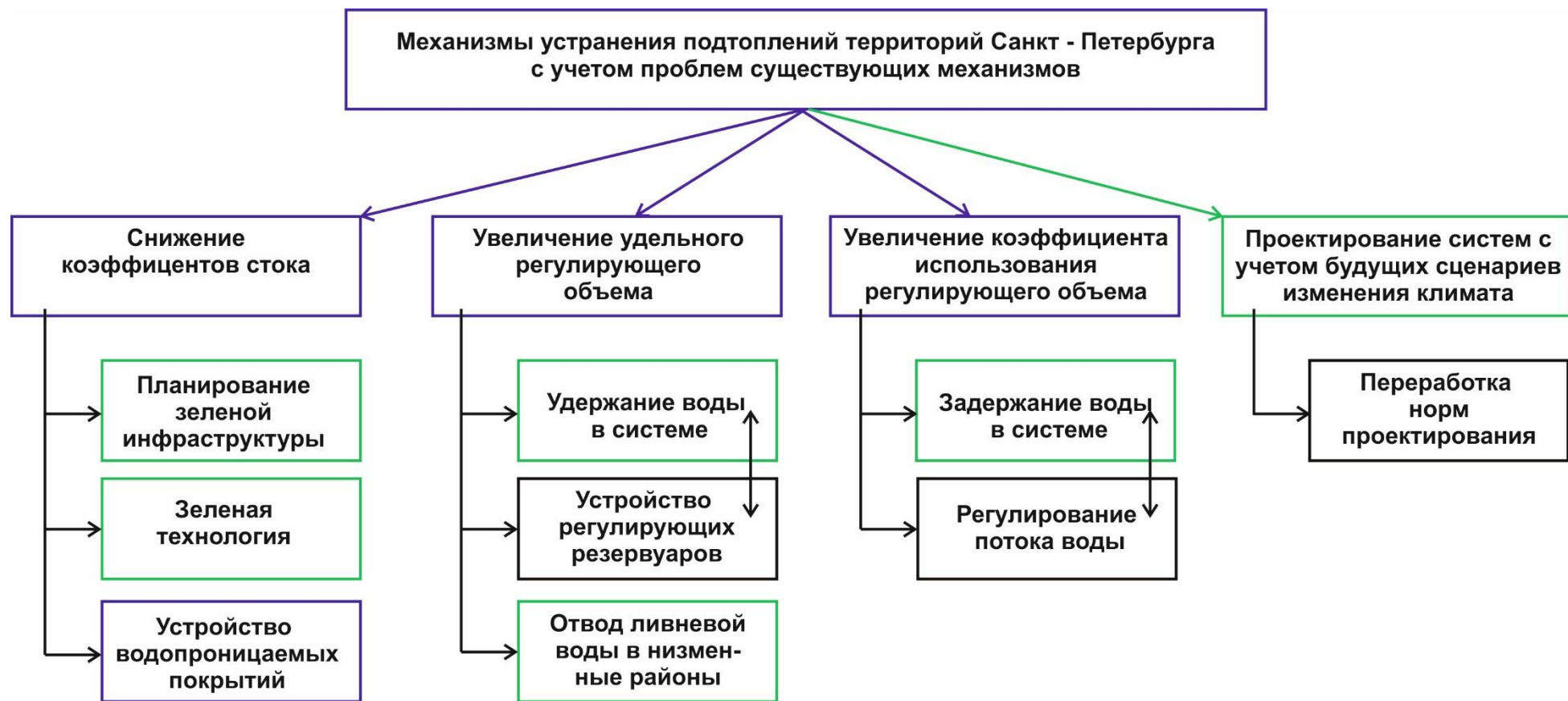


Рис. 12. Классификация механизмов устранения подтоплений территорий в Санкт-Петербурге

12. Проанализирована эффективность увеличения коэффициента k_v объемного использования регулирующего объема для зон нового строительства и зеленых зон. Итоговые результаты приведены в табл. 3. Из них следует, что, эта мера позволяет снизить среднегодовое количество затоплений с 43 до 37.

Таблица 3. Общие результаты оценки изменений периодичности затоплений территорий Санкт – Петербурга в результате увеличения коэффициента k_v объемного использования регулирующего объема

Название видов типовой застройки	Коэф. стока	$V_{уд}$	k_v	$k_v * V_{уд}$	Период подтоплений при p		Доля сетей, %	Среднее кол-во подтоплений в год при p		Общее
					0,33	1		0,33	1	
Новое строительство 1	0,22	20	0,8	16	5	30	5	1	0,19	1,19
Новое строительство 2	0,38	25	0,8	20	2,1	12	2	1	0,19	1,19
Сложившаяся	0,42	30	0,8	24	3	15	58	22	4,41	26,41
Зеленые зоны	0,21	18	0,8	14,4	5	24	21	5	0,99	5,99
Историческая застройка	0,67	36	0,8	28,8	2	8	14	8	1,99	9,99
Сумма							100	37	7,77	46,37

13. Проанализирована эффективность увеличения коэффициента k_v объемного использования регулирующего объема и удельного регулирующего объема для зон нового строительства и зеленых зон. Итоговые результаты приведены в табл. 4. Из них следует, что, эта мера позволяет снизить среднегодовое количество затоплений с 43 до 32.

Таблица 4 – Общие результаты оценки изменений периодичности затоплений территорий Санкт – Петербурга в результате увеличения коэффициента k_v объемного использования регулирующего объема и удельного регулирующего объема

Название видов типовой застройки	Коэф. стока	$V_{уд}$	k_v	$k_v * V_{уд}$	Период подтоплений при p		Доля сетей, %	Среднее кол-во подтоплений в год при p		Общее
					0,33	1		0,33	1	
Новое строительство 1	0,22	30	0,8	24	21	70	5	0	0,08	0,08
Новое строительство 2	0,38	30	0,8	24	3,8	21	2	1	0,11	1,11
Сложившаяся	0,42	30	0,8	24	3	15	58	22	4,41	26,41
Зеленые зоны	0,21	30	0,8	24	30	70	21	1	0,34	1,34

Историческая застройка	0,67	36	0,8	28,8	2	8	14	8	1,99	9,99
Сумма							100	32	6,93	38,93

14. Проанализирована эффективность увеличения коэффициента k_v объемного использования регулирующего объема, удельного регулирующего объема и уменьшения коэффициента стока для зон нового строительства, сложившейся и исторической застройки. Итоговые результаты приведены в табл. 5. Из них следует, что, эта мера позволяет снизить среднегодовое количество затоплений с 43 до 27.

Таблица 4 – Общие результаты оценки изменений периодичности затоплений территорий Санкт – Петербурга в результате увеличения коэффициента k_v объемного использования регулирующего объема, удельного регулирующего объема и уменьшения коэффициента стока

Название видов типовой застройки	Коэф. стока	$V_{уд}$	k_v	$k_v * V_{уд}$	Период подтоплений при p		Доля сетей, %	Среднее кол-во подтоплений в год при p		Общее
					0,33	1		0,33	1	
Новое строительство 1	0,22	30	0,8	24	21	70	5	0	0,08	0,08
Новое строительство 2	0,3	30	0,8	24	6,5	41	2	0	0,056	0,056
Сложившаяся	0,3	30	0,8	24	3	15	58	22	4,41	26,41
Зеленые зоны	0,21	30	0,8	24	30	70	21	1	0,34	1,34
Историческая застройка	0,4	36	0,8	28,8	5	25	14	3	0,64	3,64
Сумма							100	27	5,53	32,53

В целом, выполненный анализ показывает, что применение рассмотренных мероприятий позволяет в масштабах мегаполисов снизить среднее количество подтоплений примерно на 35-40 %. Из них наибольшую эффективность имеют мероприятия, связанные с увеличением регулирующих объемов. Поэтому, если требуется более значительное снижение количества подтоплений, то появляется необходимость в реконструкции эксплуатируемых систем отведения поверхностного стока в целом. Однако, ее сочетание с оцененными инженерными мерами позволит сократить стоимость, продолжительность строительства и расчетную производительность очистных сооружений.

15. Установлено, что внедрение механизма по дополнительному уве-

личению удельного регулирующего объема в основном целесообразно осуществлять путем строительства регулирующих емкостей. Но, после обоснования размеров резервуаров, в соответствии с нормативными методиками необходимо осуществлять проверочное динамическое моделирование для оценки фактических коэффициентов регулирования. Необходимость этого мероприятия следует из того, что нормативные методики расчета резервуаров несовершенны, а расчетные параметры дождей устарели.

16. Установлено, что внедрение механизма по увеличению коэффициента использования регулирующего объема целесообразно осуществлять с использованием узлов аварийного перелива, отводящих воду в нижележащие участки. При этом, для повышения эффективности регулирования целесообразно строить не один регулирующий резервуар, а несколько, уменьшенного объема, расположенных в разных точках бассейна водоотведения. Это позволит свести к минимуму возникающие проблемы этого механизма.

17. Для анализа эффективности результатов применения механизмов адаптации систем водоотведения в условиях изменения климата и с учетом перспектив территориального развития Санкт-Петербурга проведено моделирование работы бассейнов системы водоотведения на наиболее уязвимых территориях Санкт-Петербурга.

18. Калибровка расчетных гидравлических моделей осуществлялась путем проведения полевых измерений скоростей потока, расходов и уровней воды в периоды сухой погоды и в периоды выпадения атмосферных осадков с применением 3-х радарных бесконтактных расходомеров (№ №14220431410, 14220431412, 14220431413), электромагнитного скоростемера (№14220431411) и расходомера для безнапорных потоков (№ 14220431422), приобретенных ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» на средства гранта в рамках реализации международного проекта Rainman KS-1038, см. рис. 13 – 15.



Рис. 13. Скоростемер



Рис. 14. Расходомер



Рис. 15. Расходомер-уровнемер

19. Результаты калибровки показывают, что в «сухую» погоду значения расходов по модели несколько меньше фактических, что подтверждает наличие инфильтрата в сетях, а в период дождей – наоборот, т.к. вероятно продолжительность поверхностной концентрации отличается от расчетной.

20. Результаты моделирования показывают, что наряду с изменением климата в напорных режимах важную роль играют сопротивления в узлах, что не учитывается Российскими нормами проектирования.

21. Результаты моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- увеличение удельного регулирующего объема и увеличения коэффициента использования регулирующего объема при системном подходе являются эффективными механизмами устранения подтоплений;

- их применение позволяет на отдельных бассейнах водоотведения уменьшить в среднем на 60% максимальные расходы воды и увеличить на 80 - 100% продолжительность вытекания воды.