



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра водно-технических изысканий

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(Магистерская диссертация)

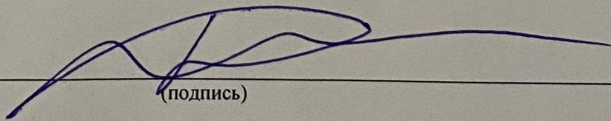
На тему Исследование мутности водотоков

Исполнитель Казанцев Степан Ильич  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Г.Н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

  
(подпись)

К.Г.Н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич  
(фамилия, имя, отчество)

«26» мая 2025 г.

Санкт-Петербург  
2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ НАНОСОВ В ВОДОТОКИ .....	4
1.1 Процесс перемещения наносов в потоке. ....	17
1.2 Связь наносов и мутности водотоков.....	23
Глава 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МУТНОСТИ ВОДЫ .....	28
2.3 Химический метод. ....	37
2.4 Самостоятельная сборка прибора для определения мутности.....	39
Глава 3. НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МУТНОСТИ .....	49
3.1 Объекты исследования. ....	50
3.2 Изучение распределения мутности по вертикале.....	52
3.3 Распределение мутности по длине водотока. ....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	69
Список использованной литературы .....	70

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из важнейших задач гидрологии является изучением речных наносов, так как переносимое количество потоком частиц определяет процессы формирования речного русла. Эти сведения одна из важнейших характеристик гидрологического режима рек. Данные о концентрации взвешенных наносов и их стоке применяются для решения множества практических задач.

Однако получение данных о стоке взвешенных наносов затруднено. В настоящее время, на сети Гидрометеорологической службы для учета взвешенных наносов берут пробы воды приборами, называемыми батометрами. Отбор проб батометром является крайне энергозатратным в подготовке, сборе и обработке информации. В связи с вмешательством деятельности человека в эко-среду появилась надобность в моментальном анализе.

В данной работе основной задачей являлось изучить откуда поступают наносы в водотоки Санкт-Петербурга. Провести исследование значений мутности на Обводном канале, реке Фонтанке и канале Грибоедова и дать предположение отчего мутность в этих водотоках может меняться.

## Глава 1. ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ НАНОСОВ В ВОДОТОКИ

Определение происхождения донных и взвешенных отложений в водотоках Санкт-Петербурга представляет собой весьма сложную задачу. Это обусловлено значительным разнообразием данных наносов как по их химическому и физическому составу, так и по времени их накопления или осаждения. Совокупность этих факторов приводит к неравномерному распределению отложений по дну городских водотоков, делая их изучение многогранным и требующим комплексного подхода.

Формирование донных отложений в водной системе города, включая такие объекты, как река Фонтанка, является результатом сложных и многокомпонентных процессов осаждения как минерального, так и органического вещества. В качестве ключевых факторов, определяющих этот процесс, выступают как природные явления, так и разнообразные виды антропогенного воздействия, что подчеркивает взаимосвязь естественных и человеческих процессов в городской среде.

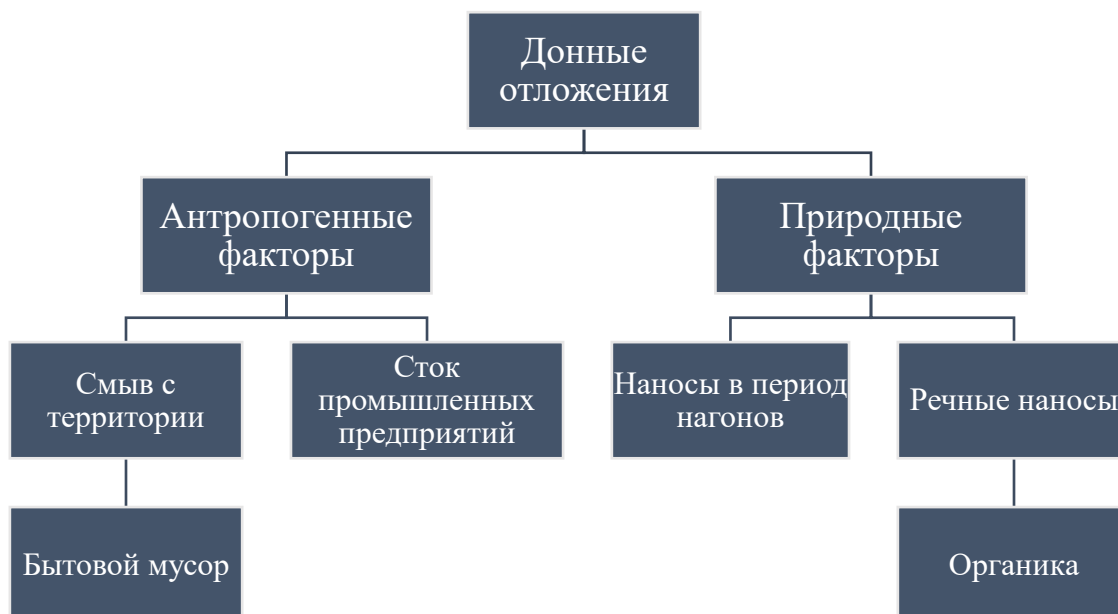


Рисунок 1.1 – Источники формирования донных отложений.



Поступление наносов в водную систему, в частности в реку Фонтанку, происходит несколькими основными путями. Первый маршрут — это приток сверху, через систему каналов, включающую исток Фонтанки, Лебяжий, Зимний и Ново-Адмиралтейский каналы. Эти наносы, по сути, являются частью твердого стока реки Невы, приносимого ее течением.

Второй важный путь поступления наносов наблюдается снизу — из Невской губы. В периоды нагонов воды и наводнений происходит интенсивное волновое взмучивание донных отложений Невской губы, в результате чего эти взвешенные частицы переносятся вверх по течению в городские водотоки.

Третий путь связан с берегами водотоков и представляет собой совокупность различных источников загрязнения. Сюда относятся стоки промышленных предприятий, ливневые стоки, которые смывают с поверхностей разнообразные вещества, а также бытовой мусор, попадающий в воду. Важно отметить, что помимо минеральной составляющей, донные отложения содержат значительную долю органического вещества, которое образуется в результате естественного отмирания водной растительности и микроорганизмов.

Одним из специфических источников минеральных наносов является песок, используемый коммунальными службами для обеспечения безопасности дорожного движения в зимний период, особенно при гололеде. Количество такого песка, поступающего в водотоки с ливневыми стоками, напрямую зависит от интенсивности и частоты проведения этих противогололедных мероприятий. Этот процесс носит эксклюзивный характер, связанный с погодными условиями. Ориентировочно, на один километр автотрассы, проходящей вдоль водотока, может поступать до 0,5 – 1 тонны песка. В среднем, за зимний период такая процедура распыления песка на автотрассу выполняется около десяти раз.

Помимо песка, значительное влияние на процессы заносимости водотоков могут оказывать отдельные виды строительных отходов. Среди них особо выделяются обломки штукатурки и кирпича. Эти материалы, как правило, концентрируются в прибрежных зонах водотоков, особенно в тех местах, где ведутся строительные работы по реконструкции зданий. Кирпичные обломки

обладают высокой устойчивостью к разложению и имеют тенденцию сохраняться и накапливаться в локальных зонах сброса в водоток. В то же время, штукатурка и аналогичные по составу материалы подвергаются постепенной деструкции в водной среде. Продукты их распада затем медленно выносятся течением водотока в его нижние части.

Анализ пространственно-временных характеристик заносимости городских водотоков твердыми бытовыми и строительными отходами позволил выявить несколько ключевых закономерностей. Пик интенсивности поступления твердых бытовых отходов (ТБО) в водотоки приходится на период с мая по август. Эта тенденция особенно выражена в водотоках, расположенных в центральной части города. Подобная сезонность объясняется, прежде всего, максимальным притоком туристов в летние месяцы, которые активно посещают исторические достопримечательности в центре, а также повышенной нагрузкой на рекреационные зоны Санкт-Петербурга. В отличие от ТБО, поступление строительных отходов в водотоки не демонстрирует выраженной сезонной изменчивости и распределяется практически равномерно по всем месяцам года.

В целом, общую характеристику заносимости водотоков за счет поступления твердых бытовых и строительных отходов можно сформулировать следующим образом. Основная масса ТБО поступает во все водотоки преимущественно в летние месяцы. Пространственное распределение этих отходов также имеет свои особенности: ТБО чаще всего обнаруживаются в верхнем и среднем течении водотоков. Строительные отходы, напротив, преимущественно попадают в водотоки в их нижней части, что объясняется сосредоточением там промышленных предприятий и интенсивными строительными и реставрационными работами.

Исследования, проведенные Российским государственным гидрометеорологическим университетом (РГГМУ) в 2005 году, показали, что состав и мощность донных отложений в водотоках, протекающих через исторический центр Санкт-Петербурга, в значительной степени зависят от уровня антропогенной нагрузки. Эта нагрузка обусловлена наличием большого

количества бытового мусора, попадающего на поверхность водотоков, часть которого, в конечном итоге, оседает на дно рек. Основными точками поступления такого бытового наплавного мусора являются спуски к воде и мосты. Кроме того, значительное количество как бытового, так и строительного мусора постоянно присутствует в составе донных отложений водотоков, что подтверждает системный характер загрязнения.

Характерные зоны скопления бытового мусора отмечаются в застойных участках, например, около стоянок прогулочных судов и на поворотах русел водотоков в центральных районах города. Также повсеместно регистрируются менее выраженные, но стабильные застойные зоны, способствующие аккумулярованию наплавного мусора у крайних опор мостов, преимущественно ниже по течению, как у правого, так и у левого берега. Визуальная оценка поверхностного загрязнения показала, что наплавной мусор на 70-80% состоит из пластмассовой тары от пищевых продуктов. Алюминиевая тара составляет 10-15% от общего объема, а бумага – около 5%. Часть этого мусора выносятся течением в Невскую губу, однако существенная его доля оседает на дно.

В процессе работ было выполнено обследование потенциальных мест захоронения строительного мусора. На момент исследования, наиболее угрожаемым участком, с точки зрения поступления строительных отходов, являлось среднее течение Крюкова канала. Это связано с активным демонтажем старых зданий и сооружением новой сцены Мариинского театра на их месте. Кроме того, в устье канала Грибоедова были обнаружены обломки строительных лесов, представляющие собой крупногабаритные и разнородные фрагменты различных типов и конструкций. Наличие подобных объектов в руслах водотоков существенно снижает скорости придонных течений и, соответственно, увеличивает скорость осадконакопления.

Продолжая анализ источников поступления различных наносов в водные артерии Санкт-Петербурга, следует отметить еще один важный фактор. К нему относятся пескоструйные работы, которые регулярно проводятся на городских набережных, мостах и других гидротехнических сооружениях. В ходе этих работ

мельчайшие частицы абразивных материалов, а также отслоившиеся фрагменты поверхностей неизбежно попадают в акваторию водотоков, увеличивая их взвешенную и донную нагрузку.

Что касается режима поступления твердого стока в верховья водной системы реки Фонтанки, то он напрямую определяется объемом и составом взвешенных наносов реки Невы. Примечательно, что реки, формирующие бассейны Онежского и Ладожского озер и затем впадающие в Неву, характеризуются значительно меньшей мутностью по сравнению со многими другими реками Российской Федерации. Эта особенность объясняется несколькими ключевыми природными факторами. Во-первых, русла этих рек пролегают в устойчивых к размывам горных породах, что минимизирует эрозию берегов. Во-вторых, их водосборы отличаются высокой степенью залесенности и заболоченности, что способствует естественной фильтрации и замедлению поверхностного стока. В-третьих, наличие крупных естественных озер-отстойников, таких как Ладога и Онега, играет роль природных фильтров, эффективно задерживая большую часть взвешенных частиц до их поступления в Неву.

Для понимания динамики твердого стока в Неве проводились систематические наблюдения за мутностью и расходом взвешенных наносов. Доступные данные охватывают периоды 1948-1950, 1952-1956 и 1958 годов. Согласно этим наблюдениям, среднее значение мутности воды в Неве за указанный период составляло  $2.3 \text{ г/м}^3$ . При этом были зафиксированы моменты, когда максимальное значение мутности достигало  $15 \text{ г/м}^3$ , что свидетельствует о значительных колебаниях. Долгосрочные среднегодовые значения мутности воды в реке Неве составляют  $7 \text{ г/м}^3$ , что подчеркивает относительно низкий уровень её естественной загрязнённости взвешенными частицами.

Сезонный ход взвешенных наносов в Неве характеризуется четко выраженными минимумами и максимумами. Минимальные расходы взвешенных наносов традиционно наблюдаются в феврале и марте. Это совпадает с периодом минимального стока воды в реке. Дополнительным



фактором, способствующим этому минимуму, является наличие устойчивого ледяного покрова в Шлиссельбургской губе. Лед полностью исключает влияние ветра и волнового воздействия на взмучивание донных отложений и их вынос в Неву, что существенно снижает концентрацию взвешенных веществ.

Максимальные расходы взвешенных наносов в Неве отмечаются дважды в году. Первый максимум приходится на июнь, что совпадает по времени с периодом максимальных расходов воды. Второй пик, по своим абсолютным значениям, часто несколько превосходит первый и наблюдается в октябре. Такой характер внутригодового распределения мутности воды и объемов взвешенных наносов тесно связан с режимом ветров в регионе. Осенний максимум обусловлен усилением ветровой активности, которая приводит к более интенсивному взмучиванию донных отложений в Невской губе и их последующему выносу в реку Неву.

Что касается реки Фонтанки, то существует график, отражающий среднемесячные значения мутности её воды, который позволяет отслеживать и анализировать динамику содержания взвешенных веществ в этом городском водотоке.

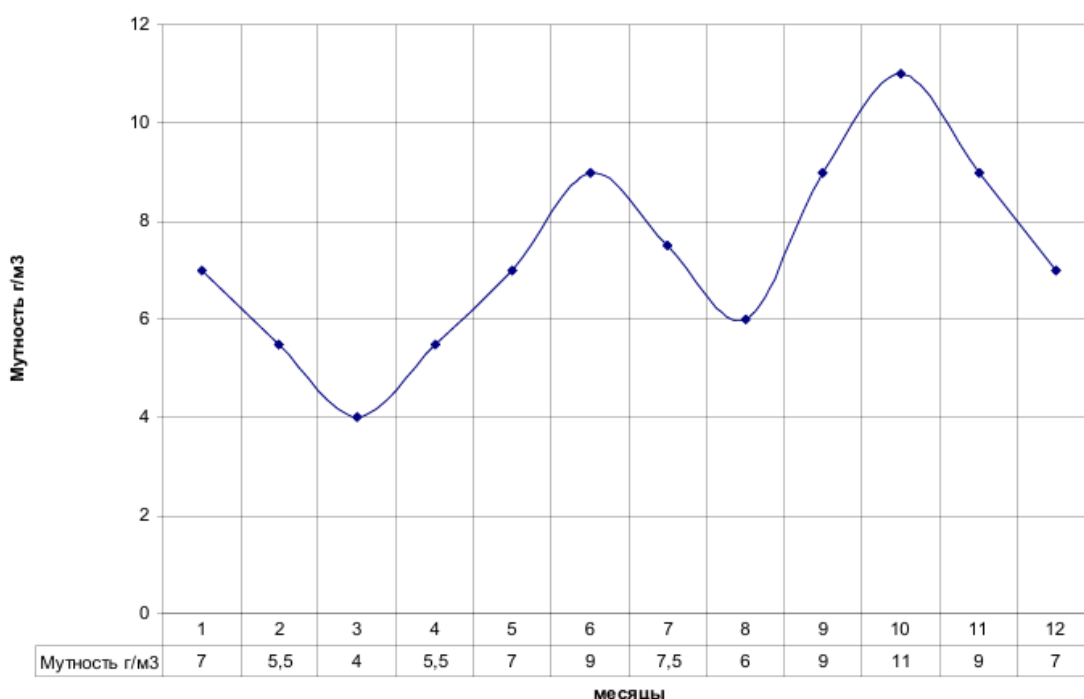


Рисунок 1.2 – Среднемесячные значения мутности реки Фонтанки

Максимальные срочные значения мутности воды в реке Неве могут значительно превышать её средние показатели.

Так, согласно экспедиционным исследованиям, проведенным Российским государственным гидрометеорологическим университетом (РГГМУ), в периоды осенних штормов мутность воды выше Ивановских порогов способна возрастать до 250 мг/л. Это демонстрирует высокую изменчивость водной среды в условиях экстремальных погодных явлений, несмотря на общую низкую мутность Невы в обычное время. Примечательно, что состав наносов, поступающих из Невы в систему реки Фонтанки, характеризуется достаточной однородностью. Процентное распределение фракций, установленное при анализе проб, отобранных в истоке Фонтанки, подтверждает стабильный и предсказуемый источник этих отложений.

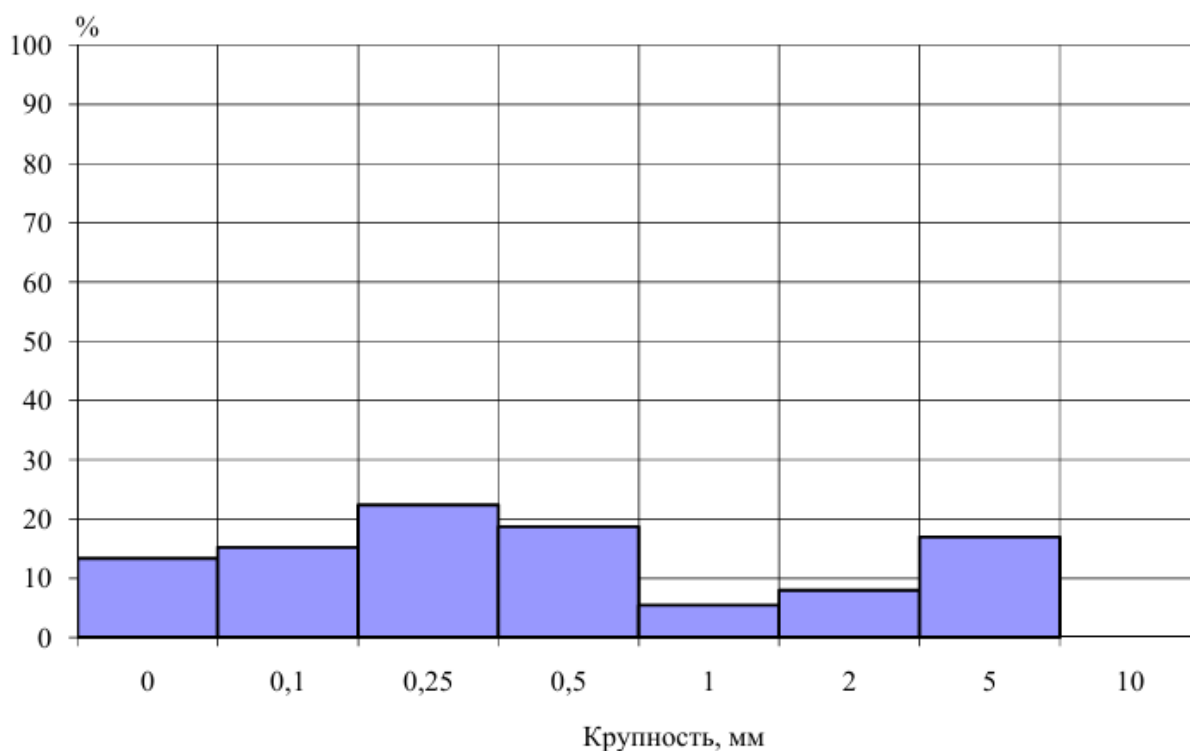


Рисунок 1.3 – Гранулометрический состав наносов

Формирование донных отложений в Обводном канале происходит в результате сложного комплекса процессов, включающих осаждение как

минеральных, так и органических веществ. Это свидетельствует о том, что дно канала не просто аккумулирует механические частицы, но и является местом активных биогеохимических процессов.

В литологическом отношении донные отложения рек и каналов Санкт-Петербурга представлены широким спектром гранулометрических типов, варьирующихся от крупнозернистых (гравийных) до мельчайших (глинистых). Например, русловые отложения относительно крупных рек, расположенных на периферии города, таких как Тосно, Ижора и Славянка, преимущественно состоят из кварц-полевошпатовых песков от крупнозернистого до среднезернистого размера, со средней степенью сортировки. Это указывает на их формирование в условиях относительно динамичного водного потока и преобладания минералов, характерных для региональных геологических пород. В устьевых же частях этих рек донные отложения приобретают характер водонасыщенных илов алевритового состава, содержащих до 10-15% примеси песчаного материала, что свидетельствует о замедлении течения и преобладании осаждения более тонких фракций.

Донные осадки рек, расположенных в пределах центральных частей Санкт-Петербурга, в гранулометрическом отношении отличаются более тонким составом. Например, предшествующий анализ физико-механических свойств донных отложений Обводного канала выявил, что в его поверхностном слое преобладают алевритистые и среднезернистые пески. Более детальное исследование показало пространственную изменчивость состава дна: в начале Обводного канала преобладают алевритистые пески и песчаный алеврит. Далее, в районе реки Волковка, от Лиговского проспекта до Рыбинской улицы и от Ново-Московского моста до Варшавского вокзала, появляются прослойки среднезернистых песков. В зоне Варшавского вокзала и вплоть до улицы Циолковского дно вновь сложено алевритистыми песками и алевритами, под которыми залегают среднезернистые пески. Эти более крупные фракции затем снова сменяются алевритистыми песками в районе Бумажной улицы. Такая

детализация указывает на сложную гидродинамику и множественные источники поступления осадочного материала в центральных водных артериях.

В последние несколько десятилетий городские реки и каналы в черте Санкт-Петербурга претерпели фундаментальные изменения: природные условия осадконакопления постепенно уступили место техноседиментогенезу. Этот процесс вызван стремительным ростом численности населения города и интенсивным развитием промышленного производства, которые значительно увеличили антропогенное воздействие на водные объекты. В настоящее время для большинства городских водотоков характерен техногенный режим развития. Он определяется, в первую очередь, тем, что уровень химического воздействия и загрязнения превышает естественную самоочищающуюся способность водотоков. Следствием этого является активное накопление техногенных илов – донных отложений, обогащенных промышленными и бытовыми загрязнителями, а также деградация биоценозов (природных сообществ организмов) водных объектов, что свидетельствует о существенном нарушении их экологического равновесия.

На урбанизированных территориях, таких как Санкт-Петербург, происходит существенная трансформация факторов, влияющих на русловые процессы рек. Это преобразование, прежде всего, проявляется в активном регулировании стока воды и наносов посредством строительства и эксплуатации разнообразных гидротехнических сооружений. Одновременно с этим, любой населенный пункт сам по себе является источником дополнительного количества наносов. По мере укрупнения города и развития его промышленного сектора, эти наносы приобретают исключительно техногенный характер. На объём и динамику стока воды и наносов также значительно влияют особенности городской застройки, широкое распространение твердых покрытий (таких как асфальт и бетон) на улицах и площадях, а также развитая система ливневой канализации.

Особенно сильному антропогенному воздействию в городах подвергаются русла малых рек. Эти водные артерии либо полностью уничтожаются в

результате строительной деятельности, либо трансформируются в загрязненные сточные канавы, облицованные бетонные лотки и тому подобные объекты. Механическое изменение русел малых рек и их превращение в места стихийных свалок бытового мусора и промышленных отходов является типичным явлением и для Санкт-Петербурга. Загрязнение воды, а также специфический химический состав донных отложений и илистых осадков в городских реках приводят к появлению совершенно новых характеристик в динамике водных потоков и движении наносов в руслах рек. Как следствие, изменяются и формы проявления русловых процессов.

Под влиянием различных загрязнений в руслах рек происходит значительное физико-химическое преобразование руслообразующих наносов и речных отложений, в результате чего они трансформируются в тяжёлые техногенные илы. Эти явления характерны для всех рек, даже для крупных, особенно в тех местах, где они протекают через крупные градопромышленные агломерации. Впоследствии, из-за русловых деформаций, процессов размыва и техногенных нарушений слоев донных отложений, возможно и часто наблюдается вторичное загрязнение речной воды. Это означает, что уже осевшие загрязнители вновь поступают в водную толщу, усугубляя экологическую ситуацию.

Применяя теорию русловых процессов и используя имеющуюся фактическую информацию, можно утверждать, что Обводный канал является боковым отводом реки Невы. Исходя из этого, логично предположить, что донные и взвешенные наносы из Невы захватываются каналом с площади, превышающей его собственную ширину, и затем поступают непосредственно в русло канала. Поскольку Обводный канал почти на всём своём протяжении облицован гранитными набережными, он практически не имеет собственного естественного водосборного бассейна. Исключение составляет лишь водосбор реки Волковки, однако её вклад в общий сток Обводного канала крайне мал по сравнению с объёмом стока, поступающего из Невы. Таким образом, единственный естественный источник твердого стока для Обводного канала —

это часть твердого стока реки Невы, что подчеркивает её ключевую роль в формировании донных отложений канала.

Реки, которые протекают по территориям бассейнов Онежского и Ладожского озер, демонстрируют меньшую мутность по сравнению с большинством других рек Российской Федерации. Это объясняется несколькими природными факторами: их русла расположены в геологически устойчивых к разрывам породах; водосборы этих рек характеризуются значительной залесенностью и заболоченностью, что способствует естественной фильтрации; а также наличие крупных естественных озер-отстойников, таких как Ладога и Онега, которые эффективно задерживают взвешенные частицы. Наблюдения за мутностью и расходом взвешенных наносов в Неве проводились в различные периоды: в 1948-1950, 1952-1956 и в 1958 годах. В настоящее время систематические наблюдения за мутностью воды осуществляются на водозаборных сооружениях ГУП "Водоканал". Сведения о суточном изменении мутности воды в черте Санкт-Петербурга за 2004 год представлены на рисунке.

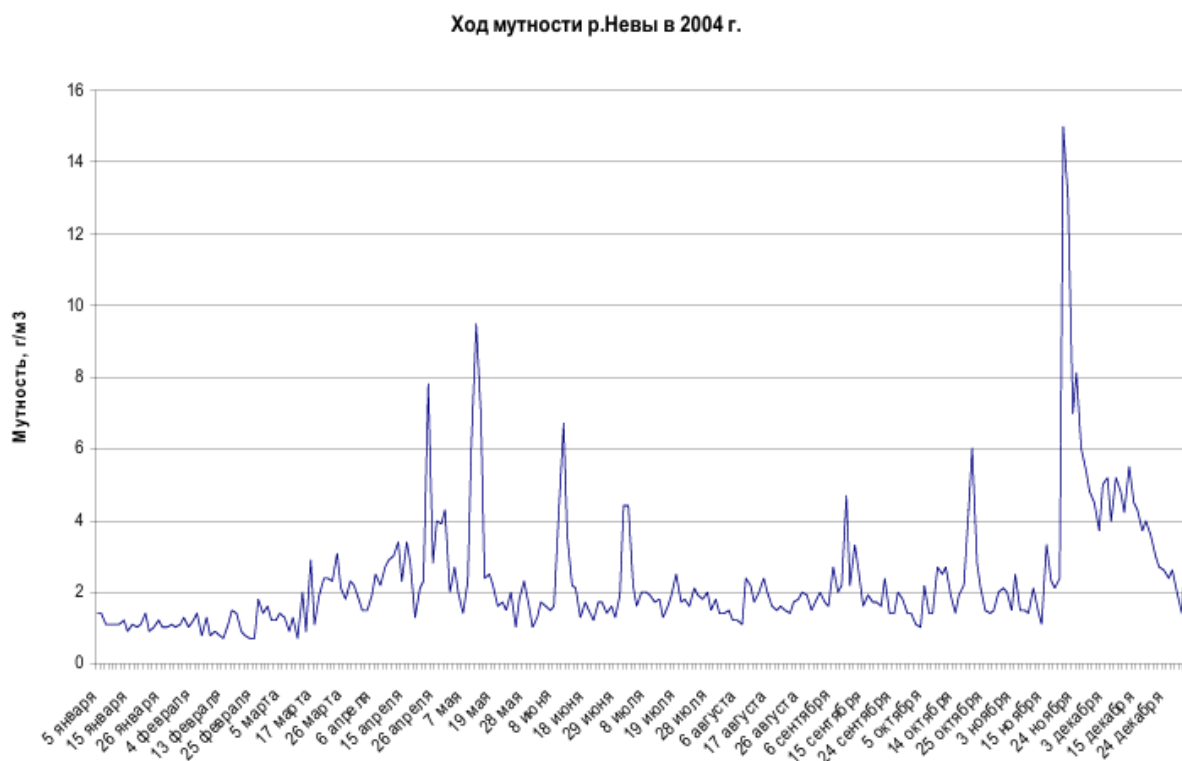


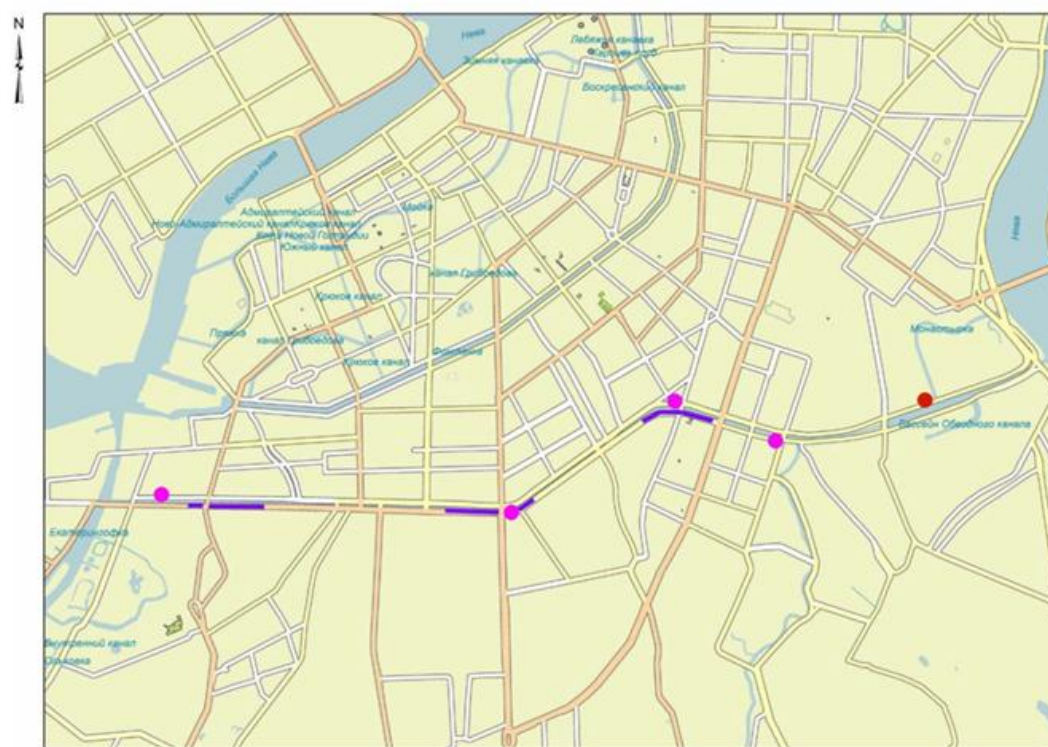
Рисунок 1.4 – Сведения о мутности в черте Санкт-Петербурга



Среднее значение мутности за указанный период составляло  $2.3 \text{ г/м}^3$ , однако максимальные значения могли достигать  $15 \text{ г/м}^3$ .

Среднемноголетние показатели мутности воды в реке Неве составляют  $7 \text{ г/м}^3$ .

Помимо естественного стока наносов, приносимых в Обводный канал водами реки Невы, существует также значительный техногенный сток, который может быть как жидким, так и твердым. Этот техногенный сток поступает в канал через многочисленные выпуски ливневых труб, а также за счет сброса сточных вод от предприятий, расположенных на берегах Обводного канала. На рисунке показано расположение точечных водоспусков вдоль течения Обводного канала.



#### Условные обозначения

1:60 000

- ливнеспуски
- районы расположения выпусков от дождеприемников
- промышленные выпуски

Рисунок 1.5 – Расположение точечных водоспусков вдоль течения Обводного канала

На протяжении течения Обводного канала выявлено несколько значительных источников поступления сточных вод. В частности, зафиксировано наличие четырех отдельных ливневых водоспусков, принадлежащих ГУП "Водоканал", которые совокупно сбрасывают в канал 0.239 тысяч кубических метров воды ежегодно. Помимо этого, в верхнем течении канала расположен один крупный промышленный водоспуск научно-производственного объединения ЦКТИ, чей годовой объем сбросов достигает внушительных 2424.3 тысяч кубических метров. Дополнительно, в среднем и нижнем течении канала обнаружено три линии с частым расположением ливнеспусков, общее количество которых составляет 139. Согласно данным Комитета по природопользованию, эти 139 ливнеспусков ежегодно приносят в канал 68.7 тысяч кубических метров сточных вод.

Совокупный вклад всех перечисленных водоспусков в загрязнение Обводного канала является значительным: ежегодно они приносят в канал до 7.8 тонн твердых осадков. Такой объем твердых веществ способен оказывать существенное воздействие на процессы осадконакопления на дне Обводного канала, способствуя его заиливанию и изменению морфологии. Исходя из расположения этих ливневых водоспусков (как показано на рисунке 3.2.1, если он прилагается), можно предположить, что их воздействие на общую картину мутности распределяется относительно равномерно по всей длине Обводного канала, а не ограничивается локальными зонами.

Важно отметить, что, по информации, предоставленной Государственным водоканалом города Санкт-Петербурга, весь сток, поступающий в Обводный канал, подвергается нормированию и контролю. Кроме того, согласно результатам постоянных наблюдений, проводимых предприятием, мутность как ливневых, так и промышленных стоков, сбрасываемых в канал, не превышает 20 г/м<sup>3</sup>. Эти данные свидетельствуют о попытке контролировать качество сбрасываемых вод. Однако, несмотря на нормирование и относительно невысокую мутность прямых техногенных сбросов, согласно предположениям, основным источником поступления как влекомых, так и взвешенных наносов в

Обводный канал по-прежнему является часть твердого стока реки Невы. Это указывает на доминирование естественного, хотя и модифицированного человеком, пути поступления осадочных материалов.

Аналогичная ситуация с процессами загрязнения и осадконакопления наблюдается и в канале Грибоедова. Это позволяет экстраполировать сделанные выводы относительно источников наносов и их влияния, характерных для Обводного канала и Фонтанки, также и на другие водные артерии центральной части Санкт-Петербурга.

### **1.1 Процесс перемещения наносов в потоке.**

Практическая значимость изучения речных наносов чрезвычайно велика, поскольку сведения о них являются одной из важнейших характеристик гидрологического режима рек и их водосборных бассейнов. Количество переносимых наносов и их режим в значительной степени определяют ключевые процессы, такие как формирование речного русла, степень заносимости судоходных каналов на реках, а также множество других аспектов водного хозяйства. Любое искусственное воздействие на транспорт наносов, например, строительство гидротехнических сооружений, может привести к непредвиденным и часто нежелательным последствиям, включая изменение коренного русла реки, эрозию берегов или, наоборот, чрезмерное накопление отложений. Поэтому при проектировании любых гидротехнических сооружений на реках крайне важно учитывать текущий режим транспорта наносов, а также прогнозировать потенциальное влияние возводимых объектов на условия движения твердого материала в русле.

Вопрос заиления водохранилищ и прудов также имеет огромное практическое значение. Степень и скорость заиления напрямую определяют не только продолжительность эффективного существования водоема и его эксплуатационную эффективность, но и условия его использования. В современном гидротехническом проектировании сведения о стоке наносов, его внутригодовой и многолетней изменчивости, а также о крупности наносов

являются необходимыми исходными данными. Эти данные, наряду с информацией о режиме стока воды, используются при проектировании как крупных, так и малых водохранилищ. Аналогичные данные критически важны и применяются при сооружении отстойников, предназначенных для очистки воды от взвешенных частиц, а также при создании ирригационных систем, где чистота воды имеет прямое отношение к эффективности орошения.

При проектировании систем питьевого, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения (включая орошение) особое внимание уделяется мутности воды, то есть концентрации взвешенных наносов. При превышении установленных норм содержания твердых частиц в воде требуется проектирование и строительство специальных очистных сооружений. Для эффективного функционирования этих сооружений необходимы точные сведения о характеристиках наносов. Кроме того, речные наносы сами по себе могут использоваться как ценное сырье для различных отраслей промышленности и как строительный материал, например, для производства бетона или дорожных работ.

Помимо этого, донные отложения рек, известные как речной аллювий, могут содержать ценные минералы, включая такие редкие и дорогие, как алмазы, золото, а также металлы платиновой группы. В этом контексте следует рассматривать два важных аспекта:

1. Промышленная разработка россыпей: Аллювий может содержать значительное количество ценных примесей, что позволяет рассматривать его как россыпные месторождения, пригодные для промышленной разработки и добычи полезных ископаемых.

2. Поиск коренных месторождений: Содержание ценных примесей, минералов и сопутствующих пород в аллювии позволяет геологам, следуя по руслу реки вверх по течению, обнаружить коренные месторождения этих минералов, то есть первичные источники их происхождения.

При разработке современных аллювиальных отложений в русле реки необходимо тщательно учитывать потенциальные последствия изъятия

материала для экосистемы и гидрологического режима. Также важно оценить интенсивность естественного восполнения этого материала за счет стока наносов. Любые нарушения естественного руслового режима, приводящие к "разбалансировке" системы "транспорт наносов — русло", вызывают цепную реакцию негативных изменений. Последствия этой реакции должны быть заранее учтены при планировании работ, и должны быть предусмотрены адекватные меры, направленные на предотвращение отрицательных явлений и минимизацию ущерба.

Речные наносы — это твердые частицы, которые образуются в результате комплексных процессов. Эти процессы включают эрозию водосборных бассейнов и русел водотоков, а также абразию водоемов (разрушение как надводных, так и подводных частей берегов озер или рек). Образовавшиеся частицы затем переносятся водными течениями в озерах, водохранилищах и реках.

В состав речных наносов входят частицы самых разнообразных размеров и форм. Форма каждой частицы зависит от нескольких факторов: её размера, природы вещества, из которого она состоит, а также степени механической обработки, которую она претерпела в процессе движения и транспортировки водой. Для классификации наносов по размеру частиц используется деление на семь основных фракций. Каждая из этих фракций, в свою очередь, может подразделяться на три подфракции (как показано в таблице 1, если она прилагается). Разделяющей величиной для этих фракций является средний диаметр ( $d$ ), который принимается как диаметр шара, эквивалентного частице по объему. Оценка величины " $d$ " на практике обычно осуществляется с помощью ситового анализа.

Таблица 1 – Классификация частиц наносов по их размерам d мм

Подфракции	Фракции						
	валуны	галька	гравий	песок	пыль	ил	глина
Крупные	Больше 100	100-50	10-5	1,0-0,5	0,1- 0,05	0,01- 0,005	Меньше 0,001
Средние		50-20	5-2	0,5-0,2	-	-	
Мелкие		20-10	2-1	0,2-0,1	0,05- 0,01	0,005- 0,001	

В геологии обломочный материал классифицируется по следующим группам:

1. Крупнообломочные породы, к которым относятся валуны, галька и гравий, образуют группу, известную как псефиты.
2. Пески, или псаммиты, включают частицы размером от 0.05 до 1.0 мм.
3. Пылеватая фракция, с размером частиц от 0.01 до 0.1 мм, носит название алевролита.

В гидрологической классификации, фракция, именуемая илами, в геологической терминологии часто соответствует грубодисперсной глине. Эти фракции, как и более тонкие частицы, относятся к общей группе пелитов. Собственно же глиной принято считать частицы с диаметром менее 0.002 мм ( $d < 0.002$  мм). По своему происхождению глина является продуктом сложного химического распада различных горных пород. В её составе доминируют так называемые глинистые минералы, которые представляют собой обширную группу водных алюмосиликатов, а также железистых и марганциальных силикатов. Помимо этого, в глинах присутствуют активные минералы, такие как каолин, монтмориллонит и гидрослюда, которые придают глинистым породам их характерное свойство — сцепление, влияющее на их физико-механические характеристики.

Поскольку речные потоки транспортируют наносы, состоящие из частиц весьма разнообразных размеров, простое указание крупности частиц через их один средний размер оказывается недостаточным для полного описания. В



гидрологии для более точной характеристики наносов широко используются гранулометрические кривые. Эти кривые строятся на основе детальных лабораторных анализов проб грунтов, взятых со дна, или непосредственно транспортируемых частиц, что позволяет получить исчерпывающую информацию о распределении частиц по размерам.

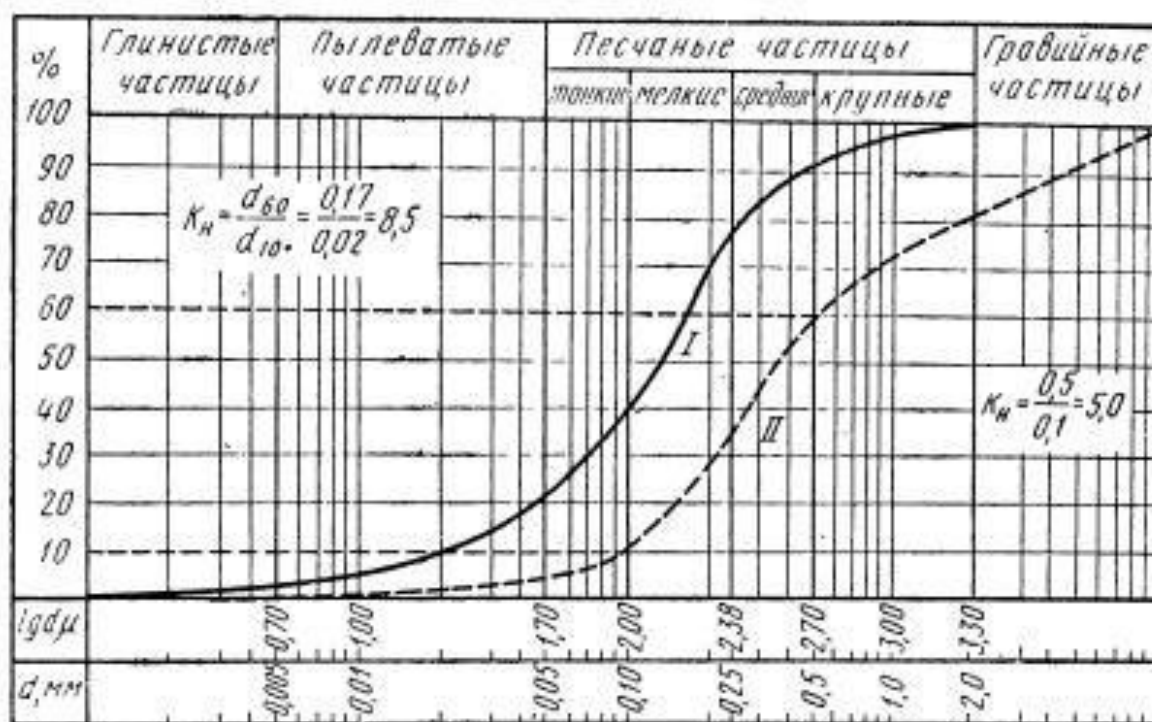


Рис. 1.6 Зависимость диаметра частиц от суммарного содержания фракции.

В процессе транспортировки наносов водными потоками происходит естественная сортировка частиц по крупности. Эффективность и характер этой сортировки напрямую зависят от гидравлических характеристик потока, которые, в свою очередь, определяют крупность наносов, способных перемещаться данным потоком. Наиболее заметно изменения в режиме потока сказываются на транспортировке крупных частиц: при снижении скорости течения ниже определённого критического предела их перемещение прекращается, и они оседают на дно. Важно отметить, что эта сортировка никогда не бывает абсолютной или полной; она лишь приводит к сужению спектра крупности частиц в пределах конкретного участка потока. При этом как

предельные значения размеров частиц, так и их медианное значение, формируются под влиянием двух ключевых факторов: с одной стороны, это гидравлические параметры самого потока (скорость, глубина, турбулентность), а с другой — исходный состав частиц, поступающих из источников питания потока наносами.

Транспорт наносов в речных потоках обладает уникальным и динамичным поведением. Движение отдельных частиц отличается прерывистостью: они не перемещаются непрерывно. Частицы либо находятся в активном движении, перемещаясь в одном из двух основных состояний — взвешенном (переносятся в толще воды) или влекомом (перемещаются по дну), — либо временно выпадают из потока, оседая на дно русла, или же выбрасываются на пойму во время паводков, формируя таким образом массивные отложения речного аллювия. Этот процесс является цикличным: взамен утраченных или осевших частиц со дна потока отрываются новые, присоединяясь к уже движущимся частицам и продолжая свой путь вниз по течению.

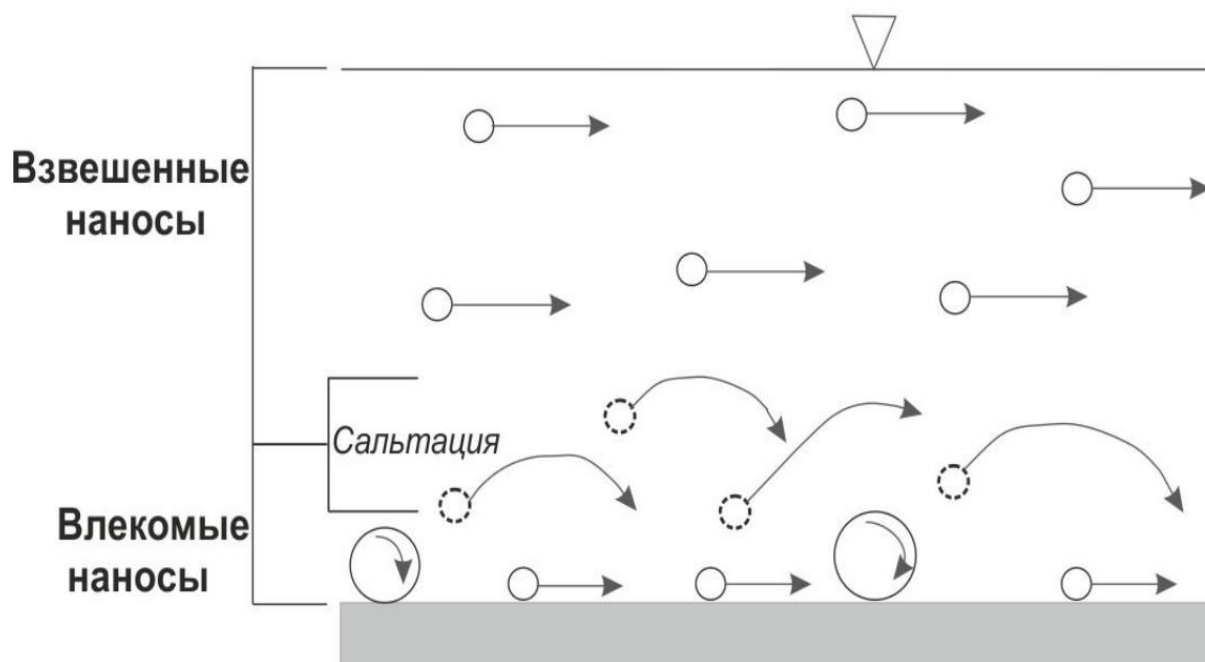


Рис. 1.7 Структура наносов в потоке.

Режим речного потока в целом можно охарактеризовать как неустановившийся: это означает, что его основные параметры, такие как расход воды, уровень и скорость течения, постоянно изменяются во времени. Помимо временной изменчивости, реки также характеризуются неравномерностью течения по длине русла, то есть скорость потока изменяется вдоль его протяженности. Это явление обусловлено множеством факторов, включая изменение размеров и формы поперечного сечения русла, наличие притоков, островов, различных донно-грядовых образований и изгибов русла (закруглений). Кроме того, течение в речном потоке является турбулентным, что означает хаотичное и вихревое движение воды. Особую роль в общей динамике потока и в формировании разнообразных русловых структур играют крупномасштабные турбулентные образования, которые создают мощные вихри и потоки, способствующие перемещению и сортировке наносов.

## **1.2 Связь наносов и мутности водотоков.**

Связь между наносами и мутностью в водотоках Санкт-Петербурга, таких как Канал Грибоедова, Река Фонтанка и Обводный канал, является прямой и фундаментальной, отражая гидрологическое и экологическое состояние этих городских водных артерий. Мутность воды — это оптическое свойство, характеризующее ее прозрачность, и оно напрямую обусловлено наличием взвешенных твердых частиц, то есть наносов, которые рассеивают и поглощают свет. Однако характер этой связи и преобладающие типы наносов существенно различаются для каждого из этих водоемов, что приводит к разным проявлениям мутности.

В основе лежит физический принцип, когда свет проходит через воду, содержащую взвешенные частицы, он взаимодействует с ними. Частицы поглощают часть световой энергии, отражают ее или рассеивают в разных направлениях. Чем больше концентрация взвешенных частиц (наносов) в воде, тем сильнее эти процессы, и тем меньше света достигает наблюдателя или

измерительного прибора. Это воспринимается как снижение прозрачности и увеличение мутности.

Размер, форма, состав и концентрация наносов напрямую определяют степень и характер мутности. Мелкодисперсные частицы, такие как глина, ил, органические остатки, остаются во взвешенном состоянии дольше и наиболее эффективно рассеивают свет, создавая стойкое, часто опалесцирующее помутнение. Крупные частицы, к которым относится песок, быстро оседают, но при сильном течении или турбулентности могут вызывать кратковременное, но интенсивное помутнение.

Водные объекты Санкт-Петербурга тесно взаимосвязаны с рекой Невой и друг с другом, образуя сложную гидрологическую сеть. Это означает, что наносы и мутность в одном канале могут влиять на другие, а общие городские факторы (ливневый сток, эрозия берегов, судоходство) играют определяющую роль.

Канал Грибоедова, проходящий через густонаселенные исторические районы с плотной застройкой и интенсивным пешеходным движением, сталкивается с проблемой мелкодисперсных наносов и стойкой мутности. Основными источниками этих наносов являются поверхностный ливневый сток, который смывает с улиц, крыш и дорог большое количество мелкой пыли, сажи, частиц износа дорожного полотна, автомобильных шин, а также органический детрит, такой как опавшие листья и бытовой мусор. Кроме того, несмотря на гранитные облицовки, происходит эрозия старых набережных, что приводит к выветриванию и разрушению раствора, а следовательно, к попаданию мелких частиц камня и цемента в воду. Активное туристическое судоходство, представленное многочисленными, хоть и относительно небольшими судами, создает постоянную турбулентность, которая активно ресуспендирует уже осевшие мелкодисперсные илы.

В наносах Канала Грибоедова преобладают мелкодисперсные минеральные частицы, такие как глина, ил и пыль, а также органические вещества. Эти частицы имеют малый размер и низкую скорость оседания.

Именно они являются причиной стойкой, хронической мутности. Даже при относительно невысокой весовой концентрации, эти частицы обладают большой удельной поверхностью и эффективно рассеивают свет, придавая воде мутный, часто сероватый или буроватый оттенок. Мутность в Канале Грибоедова часто воспринимается как постоянное явление, поскольку мелкие частицы долго не оседают и постоянно поднимаются винтами судов. Последствиями такой мутности являются эстетическое ухудшение внешнего вида канала, что важно для исторического центра, а также снижение проникновения света, что может негативно влиять на фотосинтез водорослей и жизнь донных организмов.

Река Фонтанка, будучи одним из крупнейших рукавов Невы, имеет свои особенности в характере наносов и мутности. Основным источником наносов здесь является приток из Невы, которая несет значительное количество взвешенных частиц, преимущественно песок, алеврит и глинистые фракции, из Ладожского озера и своего обширного водосборного бассейна. Во время паводков на Неве или повышенного сброса воды с ГЭС объем поступающих наносов в Фонтанку значительно возрастает. Также происходит эрозия протяженных гранитных набережных Фонтанки, которые подвержены механическому воздействию, что приводит к вымыванию мелких частиц. Интенсивное судоходство по Фонтанке с более крупными туристическими теплоходами создает значительные волновые и вихревые потоки, активно ресуспендирующие донные отложения и поднимающие их в толщу воды. Кроме того, с берегов и прилегающих территорий также поступают городские загрязнения и наносы.

Наносы в Фонтанке характеризуются более широким диапазоном размеров, от мелких глинистых и органических частиц до более крупных песчаных фракций, поступающих из Невы. Мутность Фонтанки более динамична и подвержена резким колебаниям. Во время паводков на Неве наблюдается резкое увеличение мутности из-за повышенного притока взвешенных частиц. Интенсивное движение крупных судов также вызывает значительное, хотя и временное, повышение мутности из-за ресуспензии донных

отложений. Фоновая мутность поддерживается более мелкими частицами, постоянно поступающими из Невы и с берегов. Последствия включают влияние на эстетику, сложности для подводных работ и мониторинга, а также потенциальное заиливание отдельных участков и затруднение работы водозаборов, если таковые имеются.

Обводный канал, один из старейших и наименее проточных водных объектов города, с богатой промышленной историей, страдает от исторических отложений и хронической, стойкой мутности. Самым значительным источником наносов здесь являются исторические донные отложения. За десятилетия функционирования канала на его дне накопились огромные объемы илов, содержащих не только минеральные частицы, но и большое количество органических веществ, а также, возможно, загрязнителей промышленного происхождения, таких как тяжелые металлы и нефтепродукты. Кроме того, канал проходит через бывшие промышленные зоны и плотные жилые кварталы, что обуславливает поступление разнообразных городских наносов и загрязнителей через поверхностный сток. Низкая проточность, ограниченная связь с другими водотоками и малая скорость течения способствуют активному осаждению взвешенных частиц и накоплению ила на дне.

Характер наносов в Обводном канале преимущественно тонкодисперсный, часто высокоорганический ил, который может иметь темный цвет. Из-за низкой проточности большая часть этих наносов оседает на дно. Однако при малейшем возмущении, например, редком движении судов, сильном ветре или при проведении дноуглубительных работ, эти рыхлые илы легко ресуспендируются, поднимаясь в толщу воды. Это приводит к значительному и длительному повышению мутности, которая часто приобретает более темный, неприятный оттенок из-за высокого содержания органического вещества. Мутность в Обводном канале может быть очень высокой и держаться долго, если нет достаточного потока для выноса частиц.

Последствиями такой ситуации являются серьезное эстетическое ухудшение внешнего вида канала, снижение качества воды, возможное развитие



анаэробных процессов на дне из-за разложения органики, что приводит к выделению неприятных запахов и образованию сероводорода. Все это создает значительные трудности для любого использования воды из канала.

Важно понимать, что каналы не существуют изолированно. Фонтанка связана с Невой и Мойкой, а Мойка, в свою очередь, с Каналом Грибоедова. Это означает, что наносы и вызванная ими мутность могут перемещаться по всей этой водной системе. Например, Фонтанка, как крупный рукав Невы, может служить источником наносов для Мойки и Канала Грибоедова, влияя на их мутность.

Таким образом, мутность в водотоках Санкт-Петербурга является прямым следствием наличия и динамики взвешенных наносов. Характер и интенсивность этой мутности зависят от специфических источников наносов для каждого водоема, их физико-химических свойств, таких как размер и состав, а также от гидродинамического режима самого канала.

## **Глава 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МУТНОСТИ ВОДЫ**

При изучении гидрологического режима рек одной из ключевых характеристик, подлежащих тщательному анализу, является мутность воды. Этот параметр отражает степень уменьшения прозрачности водной среды и обусловлен присутствием в ней различных взвешенных частиц.

Мутность воды возникает не только из-за наличия неорганических тонкодисперсных взвесей, таких как частицы песка, глины, или неорганические соединения (например, гидроксид алюминия, карбонаты различных металлов). Значительную роль в формировании мутности играют и органические примеси, в частности, различные виды планктона – бактериопланктон, фитопланктон и зоопланктон, которые в большом количестве могут придавать воде выраженную опалесценцию или мутность. Кроме того, мутность может изменяться в результате окисления растворенных соединений железа и марганца, что приводит к образованию и выпадению в осадок коллоидных частиц, делающих воду менее прозрачной.

Для количественного определения мутности воды используются разнообразные методы и средства, которые можно классифицировать на три основные группы: визуальные, физические и химические.

### **2.1 Визуальные методы.**

Визуальные методы основаны на сравнении исследуемого образца воды с известными стандартными взвесями. Традиционно в качестве такой стандартной взвеси применялась взвесь каолина (разновидности глины), а результат выражался в миллиграммах каолина на литр ( $\text{мг/дм}^3$ ). В настоящее время всё чаще в качестве стандартной смеси используется взвесь формазина (синтетического полимера), а мутность измеряется в Единицах Мутности ( $\text{ЕМ/литр}$ , также обозначаемых как ЕМФ или FTU – formzin turbidity unity на английском языке).



Рис. 2.1 Образцы воды с мутностью 5, 50 и 500 ЕМФ.

Помимо этого, для определения мутности широко применяется фотометрическая методика, соответствующая международному стандарту ISO 7027 ("Water quality - Determination of turbidity"). В рамках этого стандарта мутность измеряется в единицах FNU (Formazin Nephelometric Unit). Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) и Агентство по защите окружающей среды (EPA) для своих измерений мутности используют единицу NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Исторически также применялась единица Jackson Turbidity Unit (JTU), которая представляла собой величину, обратную минимальной толщине воды, сквозь которую еще не видно пламени свечи.

Все эти единицы измерения мутности могут быть пересчитаны друг в друга при необходимости, в зависимости от конкретных условий и стандартов.

Приблизительные коэффициенты пересчёта следующие:

$$1 \text{ FTU} = 1 \text{ ЕМФ} = 1 \text{ ЕМ/литр} = 1 \text{ FTU} = 1 \text{ FNU} = 1 \text{ NTU} = 0.053 \text{ JTU}.$$

Кроме того, в зависимости от характера взвешенного материала, полученные данные могут быть пересчитаны в массовую концентрацию: например, 1 NTU приблизительно равен 0.13 мг/л, а соотношение 1 ЕМ/литр составляет около 0.58 мг/л.

Мутность воды тесно связана с несколькими другими характеристиками:

1. Осадок, его наличие и количество (незначительный, заметный, большой, очень большой) могут быть измерены в миллиметрах. Осадок может как отсутствовать, так и присутствовать.

2. Грубодисперсные примеси (определяются гравиметрически). Этот метод включает прогон пробы воды через фильтр, последующее высушивание фильтра с осевшими частицами и его взвешивание.

3. Прозрачность, которая измеряется путем постепенного опускания в воду диска Секки до той глубины, на которой он полностью перестает быть видимым. Диск Секки обычно имеет стандартные метки (отверстия, стандартный шрифт, крестообразная метка и т.п.), помогающие определить момент его исчезновения.

Мутность также может быть определена не только фотометрически, но и визуально, путем оценки степени мутности в специальной мутномерной пробирке (длиной 10-12 см). Визуальное описание пробы воды может быть следующим: прозрачная, слабо опалесцирующая, опалесцирующая, слабо мутная, мутная, очень мутная.

Международный стандарт ISO 7027 включает полевой метод определения мутности и прозрачности с использованием диска Секки. Диск Секки представляет собой диск, покрытый белым пластиком или белой краской, и прикрепленный к цепи или стержню. Стандартный диск обычно имеет диаметр 200 мм с шестью отверстиями диаметром 55 мм, расположенными по кругу диаметром 120 мм.

При проведении процедуры измерения с диском Секки, диск медленно опускается в воду до тех пор, пока он не начнет пропадать из виду. В этот момент делается замер глубины погружения шнура или цепи, при которой диск еще различим. Для повышения точности измерения и исключения влияния отраженного света от поверхности воды, замер повторяют несколько раз.

При показаниях глубины меньше 1 метра значение записывается с точностью до 1 сантиметра. Если показания превышают 1 метр, запись производится с точностью до 0.1 метра.

Удобство этого метода заключается в его применимости с мостов, крутых обрывов или лодок, что делает его весьма практичным для полевых исследований.

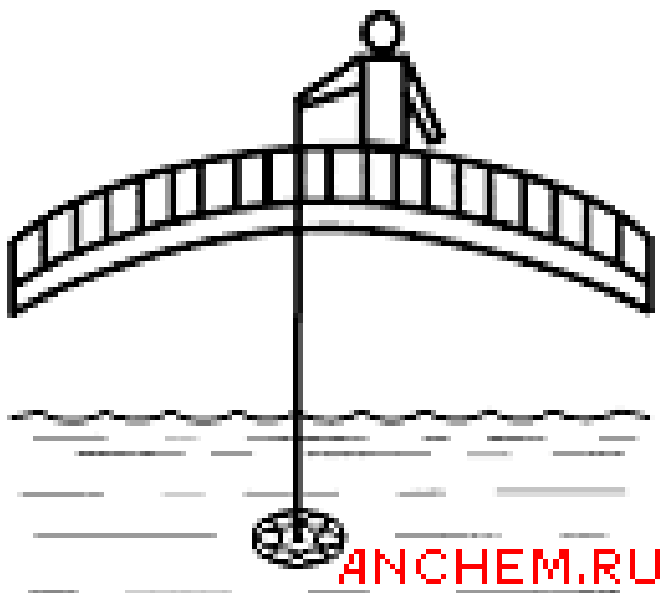


Рис. 2.2 Определение мутности или прозрачности с помощью диска Секки.

Прозрачность воды часто определяется совместно с мутностью, особенно в тех случаях, когда окраска и мутность воды являются незначительными или минимальными, так как эти параметры взаимосвязаны и влияют на оптические свойства воды.

## **2.2 Физические методы.**

К физическим методам относятся такие методы как: гравиметрический, турбидиметрический и нефелометрический.

Гравиметрический метод является одним из основных способов количественного определения содержания взвешенных наносов и мутности в воде. Для отбора проб, необходимых для измерения расходов взвешенных наносов, используются специализированные приборы – батометры. Отбор проб производится в тех же точках, где и замеряется расход на скоростных вертикалях, что обеспечивает репрезентативность данных.

Существуют различные типы батометров, каждый из которых адаптирован под определенные условия: например, батометр-бутылка на штанге (модели ГР-16, ГР-16М) удобен для измерений на небольших глубинах, батометр-бутылка в грузе (ГР-15) предназначен для более глубоких участков, а вакуумный батометр (ГР-61) используется для сбора проб при особых условиях давления. Все эти устройства относятся к категории батометров длительного наполнения, что позволяет получать усредненные по времени значения мутности воды на месте отбора пробы, нивелируя кратковременные флуктуации.

Точность измерений, выполняемых с помощью батометров, напрямую зависит от скорости течения в точке пробоотбора. Для минимизации потенциальной погрешности, связанной с этим фактором, применяются различные типы насадок на батометр, оптимизирующие процесс забора воды при различных скоростях потока.

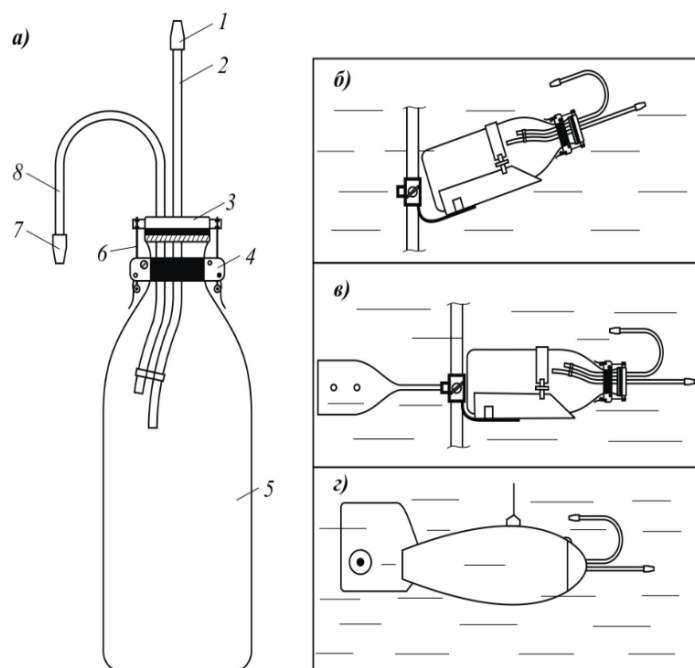


Рис. 2.3 Батометр бутылка.

а – общий вид; б – батометр-бутылка ГР-16; в – батометр-бутылка ГР-16М; г – батометр-бутылка ГР-15.

1 – сменная насадка водозаборной трубки; 2 – водозаборная трубка; 3 – металлическая пробка-головка; 4 – хомут; 5 – бутылка емкостью 1 л; 6 – зажим головки; 7 – насадка воздухоотводной трубки; 8 – воздухоотводная трубка.

Отобранные пробы затем подвергаются тщательной лабораторной обработке. Этот процесс заключается в выделении твердых частиц из воды, их последующем высушивании и взвешивании на высокоточных лабораторных весах для определения массы выделенных наносов в граммах.

Отделение частиц от воды осуществляется путем фильтрования: проба пропускается через специальный фильтр, изготовленный из мелкопористой фильтровальной бумаги с определенным размером пор. На поверхности и в порах фильтра задерживаются все взвешенные частицы наносов. Количество взвешенных наносов в исходной пробе воды затем определяется по разнице результатов взвешивания фильтра до и после осаждения на него наносов.

Турбидиметрический метод представляет собой оптический способ определения количества вещества, находящегося в коллоидном растворе или суспензии. Основной принцип метода заключается в пропускании монохроматического излучения (света одной длины волны) через исследуемый образец. Коллоидный раствор, или лиозоль, определяется как дисперсная система, в которой жидкость выступает в качестве дисперсной среды, а дисперсная фаза может быть как жидкой (например, в случае эмульсии), так и твердой (в случае суспензии).

Ключевым требованием для проведения турбидиметрических исследований является гетерогенность коллоидного раствора. Именно это свойство обеспечивает возможность точного измерения концентраций, включая даже сверхнизкие значения. Если изучаемое вещество обладает высокой растворимостью, его предварительно необходимо химически перевести в другое соединение, обладающее необходимыми для измерения оптическими свойствами (например, образующее малорастворимую суспензию). Все коллоидные растворы по своей природе непрозрачны. Их мутность приводит к ослаблению светового потока, проходящего через вещество. Уровень этого ослабления находится в прямой пропорциональной зависимости от концентрации изучаемого раствора, что и является основой для количественных измерений.

В процессе турбидиметрии анализируется оптическая плотность пучка света с заданной длиной волны после его прохождения через коллоидный раствор. При взаимодействии света с коллоидными частицами происходит несколько процессов: часть светового потока поглощается раствором, часть отражается и рассеивается частицами, и лишь оставшаяся часть успешно проходит сквозь вещество. Таким образом, суть метода состоит в определении количества света, которое успешно прошло через коллоид. Интенсивность прошедшего светового потока будет закономерно пониженной, так как значительная его часть была либо поглощена, либо рассеяна.

Для проведения турбидиметрии используются такие высокоточные оптические устройства, как фотометры или спектрофотометры. Исследуемый раствор помещается в специальную прозрачную емкость – кювету, которая затем плотно фиксируется внутри измерительного прибора. Само исследование проводится при герметично закрытой крышке прибора для исключения влияния внешнего света. Для коллоидов с низкой мутностью чаще всего применяют свет в голубом спектре или ближний спектр ультрафиолетового излучения, так как коротковолновое излучение более эффективно рассеивается мелкими частицами. Важно отметить, что современный процесс анализа полностью автоматизирован, что обеспечивает простоту и высокую скорость применения метода.

Однако, несмотря на автоматизацию, существуют определенные сложности, влияющие на точность результатов. Основная из них – разделение световых лучей. Критически важно исключить попадание на диафрагму фотометра лучей, отраженных или рассеянных от поверхности кюветы или самого раствора, так как это может исказить измеренные значения оптической плотности. Для этого используются специальные диафрагмы, отсекающие нежелательные лучи. Ещё одним важным моментом, определяющим точность и адекватность результатов, является строгое соблюдение порядка при смешивании компонентов и правильность приготовления суспензии. Только при тщательном контроле всех этих параметров можно обеспечить максимальную достоверность полученных данных.





Рисунок 2.4 Фотометр

Нефелометрия представляет собой оптический метод исследования и анализа вещества, основанный на измерении интенсивности светового потока, рассеиваемого взвешенными частицами данного вещества в растворе. Интенсивность рассеянного света является ключевым параметром и напрямую зависит от множества факторов, в первую очередь от концентрации частиц в анализируемой пробе. Важным аспектом при нефелометрии является также объём и размер частиц, способных эффективно рассеивать свет.

Для успешного применения нефелометрии к реакциям предъявляется важное требование: образующийся продукт реакции должен быть практически нерастворимым и формировать стабильную суспензию (взвесь). Чтобы поддерживать твердые частицы во взвешенном состоянии и предотвращать их коагуляцию (слипание и оседание), часто применяются различные стабилизаторы, такие как желатин.

Измерение интенсивности рассеянного света осуществляется с помощью специализированных приборов, называемых нефелометрами. Принцип их действия основывается на уравнивании интенсивности двух световых потоков: один исходит от рассеивающей взвеси анализируемого образца, а другой — от

калиброванного рассеивателя внутри прибора, например, матового или молочного стеклянного рассеивателя.

Один из вариантов нефелометрии — нефелометрическое титрование. В этом процессе раствор анализируемого вещества титруют раствором осадителя. По мере добавления осадителя и образования нерастворимых частиц, интенсивность рассеянного света увеличивается пропорционально количеству образующихся взвесей. В момент достижения точки эквивалентности (когда весь анализируемый компонент прореагировал), рост помутнения прекращается. По излому кривой титрования, отражающей зависимость интенсивности рассеяния от объема добавленного титранта, определяют объем осадителя, затраченного на реакцию. Погрешность измерений при нефелометрическом титровании обычно составляет от 5 до 10 %.

Нефелометрия широко применяется в различных областях. Она преимущественно используется для количественного определения хлоридов (в виде взвеси хлорида серебра,  $\text{AgCl}$ ) и сульфатов (в виде взвеси сульфата бария,  $\text{BaSO}_4$ ) при анализе разнообразных материалов, включая руды и минералы. Кроме того, нефелометрия находит применение для определения размеров и формы диспергированных частиц, измерения молекулярной массы полимеров, а также для изучения процессов коагуляции.



Рисунок 2.5 Нифелометр

## 2.3 Химический метод.

Метод сравнения со стандартными образцами (СО) является фундаментальным подходом в химическом анализе, при котором содержание определяемого компонента в исследуемом образце сопоставляется со значением, установленным для стандартного образца.

Стандартный образец (СО) — это специально подготовленный материал, состав которого надежно установлен и юридически удостоверен. Каждый СО сопровождается официальным документом, таким как паспорт или аттестат, содержащим полные и точные данные о его химическом составе и свойствах.

Принцип метода основывается на сопоставлении аналитического сигнала, полученного в результате измерения исследуемого образца, с сигналом, измеренным для СО с известным содержанием целевого компонента. Если аналитический сигнал, полученный от исследуемого образца, соответствует сигналу от стандартного образца, содержание определяемого компонента в образце рассчитывается как отношение этих сигналов. Этот подход позволяет достичь высокой точности и надежности результатов, поскольку измерения проводятся в идентичных условиях и калибруются относительно эталонного материала.

Метод сравнения со стандартными образцами находит широкое применение в различных областях:

1. Аналитическая химия. Данный метод активно используется для контроля правильности и точности проводимых измерений, например, при анализе черных и цветных металлов, где требуется высокая достоверность результатов.

2. Идентификация веществ. В таких методах, как газовая хроматография, анализируемый образец и стандартный образец последовательно хроматографируются в абсолютно одинаковых условиях. Совпадение времен удерживания компонентов образца и СО является надежным подтверждением их идентичности.

3. Контроль качества поверхности: В инженерных и производственных процессах обработанная поверхность сравнивается со стандартными образцами шероховатости, что позволяет оценить соответствие её параметров установленным требованиям и стандартам.

Ярким примером применения метода сравнения со стандартным образцом для количественного анализа веществ является его использование в газовой хроматографии. В этом случае испытуемый раствор вещества и раствор его стандартного образца попеременно вводятся в хроматограф, и измеряются площади пиков, соответствующие каждому компоненту. Поскольку площади пиков прямо пропорциональны концентрациям веществ, вычисляется отношение площадей пиков стандартного и испытуемого образцов. Это отношение, в свою очередь, прямо пропорционально отношению их концентраций, что позволяет точно вычислить содержание определяемого вещества в исследуемой пробе.

В аналитической химии и гидрологии для исследования свойств веществ и оценки параметров воды широко применяются оптико-химические методы, среди которых особое место занимает фотометрический метод.

Фотометрический метод — это оптико-химический подход к анализу, базирующийся на фундаментальном свойстве веществ: их способности поглощать электромагнитное излучение, то есть свет. Суть метода заключается в измерении интенсивности светового потока после того, как он прошел через анализируемое вещество или его раствор. Однако, изменение интенсивности света при его прохождении через образец может быть обусловлено не только поглощением определяемым веществом, но и влиянием других компонентов, присутствующих в растворе, а также такими оптическими явлениями, как рассеяние или отражение света. Для того чтобы точно учесть эти потенциальные помехи и изолировать поглощение именно целевым веществом, в фотометрии обязательно используется раствор сравнения. Этим раствором может быть либо чистый растворитель, используемый для приготовления пробы, либо раствор "холостого опыта" (контрольного образца), который содержит все компоненты

анализируемой системы, кроме самого определяемого вещества. Это позволяет вычесть фоновое поглощение и получить чистые данные для исследуемого компонента.

## **2.4 Самостоятельная сборка прибора для определения мутности**

Для исследования мутности был разработан прототип прибора. В его задачу входит определение концентрации наночастиц в воде.

Для его создания понадобилось:

- Модуль для измерения мутности Turbidity Sensor;
- Кабель, длина которого была 5 м;
- Контроллер Arduino Nano для обработки полученных данных;
- Написание программного обеспечения для обработки полученных данных и вывод их на экран.

Для прибора использовался модуль мутности, который определяет качество воды, измеряя уровни мутности или непрозрачности. Датчик работает благодаря эффекту, который представляет собой рассеяние света в воде из-за посторонних частиц, таких как грязь и т.д. Когда вода прозрачная, ИК-светодиод приемника получает максимальное количество излучения от ИК-светодиода передатчика. По мере того, как вода становится более мутной, излучение ИК-светодиода приемника уменьшается. Таким образом, при чистой воде плата датчика выдает более высокий ток, и наоборот.

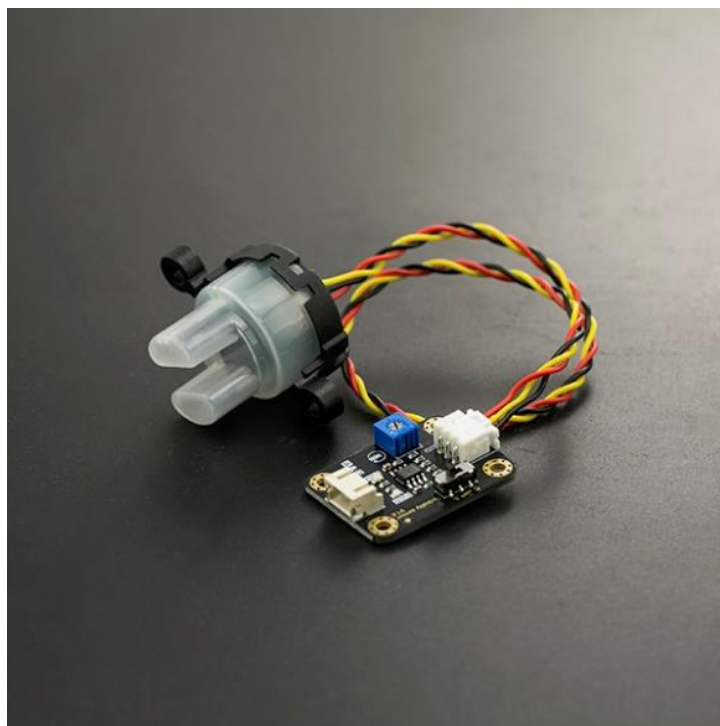


Рис. 2.6 Модуль для измерения мутности Turbidity Sensor.

Так как верхняя часть датчика не водонепроницаемая, то он нуждается в изоляции от воды.

У датчика имеются следующие характеристики использования:

- Рабочее напряжение: 5 В постоянного тока

- Рабочий ток: 40 мА (макс.)

- Время отклика: <500 мс

- Сопротивление изоляции: 100 м (мин)

- Метод вывода:

- Аналоговый выход: 0-4,5 В

- Цифровой выход: сигнал высокого или низкого уровня (можно отрегулировать пороговое значение, отрегулировав потенциометр)

- Рабочая температура: 5 °С ~ 90 °С

- Температура хранения: -10 °С ~ 90 °С

- Вес: 30 г

- Размеры адаптера: 38 мм \* 28 мм \* 10 мм / 1,5 дюйма \* 1,1 дюйма \* 0,4 дюйма

Схема подключения для дальнейшего использования выглядит следующим образом:

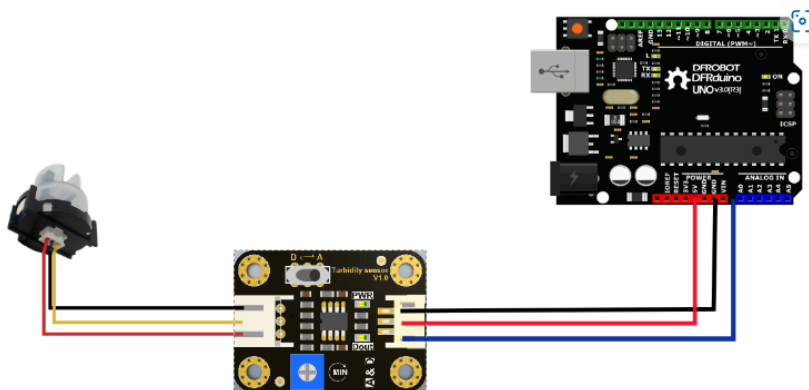


Рис. 2.7 Схема подключения датчика.

Датчик подключается через 5-10м. провод к микросхеме.

Он измеряет количество света, поступающего от светового излучателя к светоприемнику, и на основе этого вычисляет мутность воды.

На рисунке показано, что модуль датчика мутности содержит 3 основные части: водонепроницаемый корпус, схема управления и соединительные провода. Измерительный датчик представляет собой оптическое устройство, состоящее из светодиода (передатчика света) и фототранзистора (приемника света).

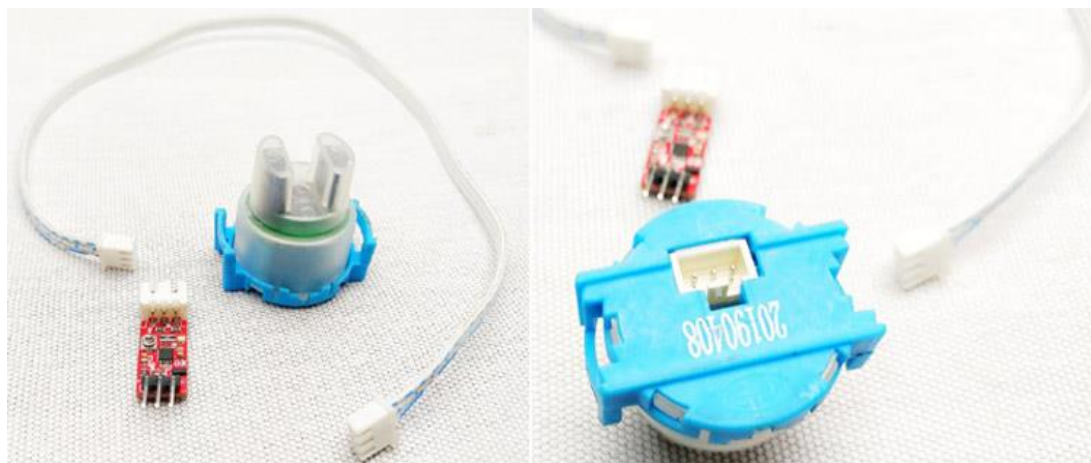


Рис. 2.8 Внешний вид датчика.

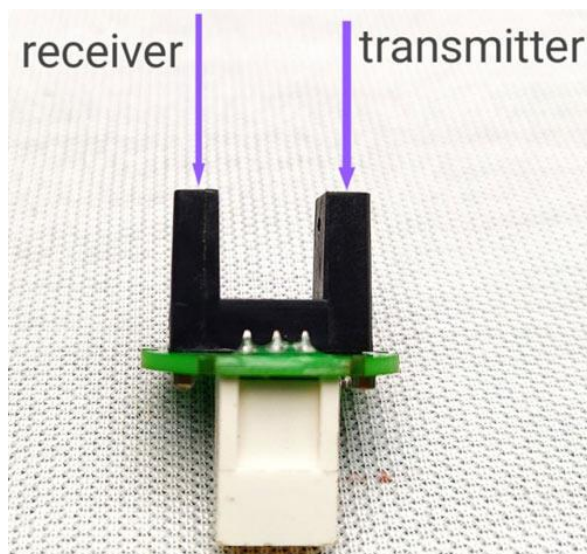


Рис. 2.9 Передающая и приемная части датчика.

Данный модуль использует инфракрасный диод в качестве источника света и инфракрасный приемник в качестве детектора света. Когда луч поступает из светодиода на своем пути рассеивается и поступает в фототранзистор, на выходе мы получаем напряжение. Производитель датчика использует данный график зависимости для определения мутности.

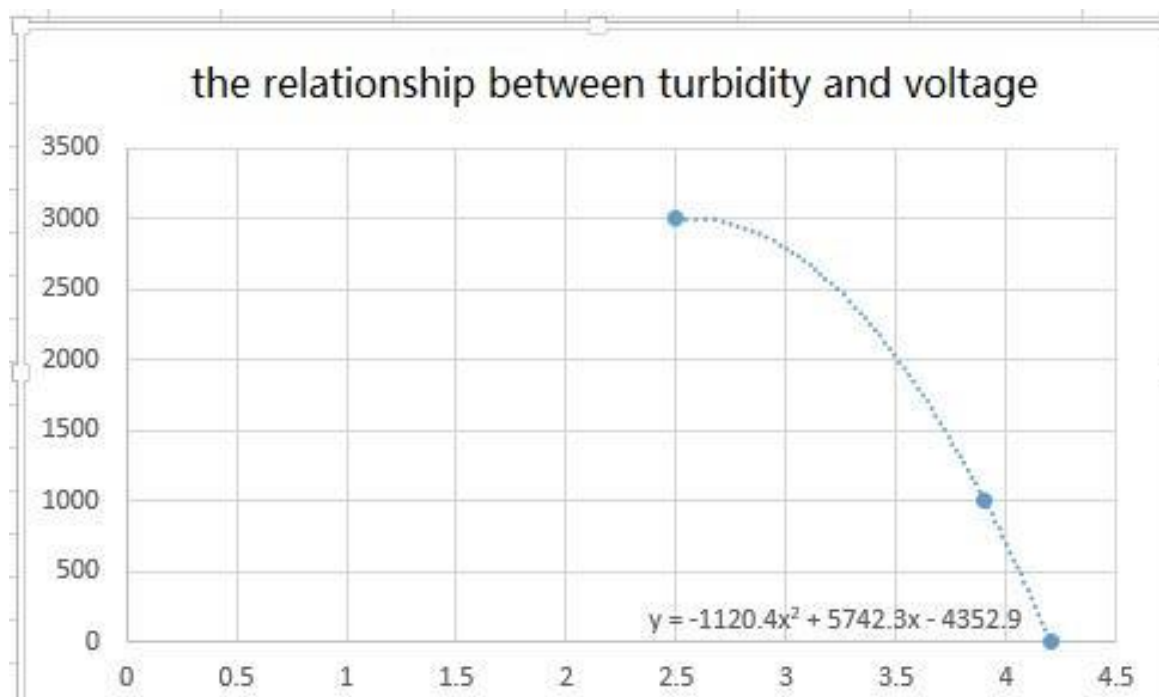


Рис. 2.10 График зависимости мутности от напряжения.



(Ось x: напряжение на датчике, Ось y: мутность переведенная из полученного напряжения)

Вручную, методом экстраполяции по графику, имея напряжение производить вычисление мутности крайне сложно. Для этого на требуется программное обеспечение, которое будет переводить полученное напряжение в значение мутности.



Рис. 2.11 Герметично закрытый датчик с подсоединением к кабелю.

В процессе разработки и доработки прибора, который был частью бакалаврской работы, были обнаружены и предприняты попытки исправить многочисленные ошибки. К сожалению, в результате этих работ прототип был приведен в негодность и стал непригодным для дальнейшего использования. В связи с этим была предпринята вторая попытка: было решено собрать прибор заново, используя другое устройство, найденное на кафедре.



Рисунок 2.12 Прибор с кафедры

Изначально этот прибор также находился в нерабочем состоянии. Несмотря на его первоначальную неисправность, удалось обеспечить его питание от внешнего аккумулятора вместо внутренней батареи, что позволило подключенному к нему датчику заработать. Однако, на этом этапе возникла критическая проблема: экран прибора был поврежден, и его показания были неразборчивы, что делало невозможным считывание данных.

Дальнейшие попытки восстановить работоспособность этого прибора не привели к успеху. В ходе диагностики выяснилось, что значительная часть внутренней схемы выгорела, а экран, что особенно важно, оказался не подлежащим замене, поскольку такие модели больше не производятся. Несмотря на приложенные усилия, оба подхода к созданию функционального прибора для определения мутности оказались безуспешными из-за технических сложностей и повреждений оборудования.

После того как оба прибора после безуспешных попыток привести их в рабочее состояние пришли в негодность, кафедрой была предоставлена возможность поработать и выполнить поставленные задачи с помощью другого прибора, который называется Seapoint Turbidity Meter.



## Seapoint Turbidity Meter

### User Manual

Рисунок 2.13 Seapoint Turbidity Meter

Seapoint Turbidity Meter — сенсор, который измеряет мутность воды, обнаруживая рассеянный свет от взвешенных частиц.

Сенсор Seapoint Turbidity Meter используется в различных приложениях, где нужно измерять мутность или концентрацию взвешенных частиц. Некоторые из них:

- мониторинг загрязнения и качества воды;
- исследования транспорта осадка и оседания частиц;
- профилирование океана;
- мониторинг рек и ручьёв.

Особенность сенсора — ограничение объёма, с которого он воспринимает свет, — позволяет использовать его в ограниченных пространствах, например, в трубах и на мелководных реках.

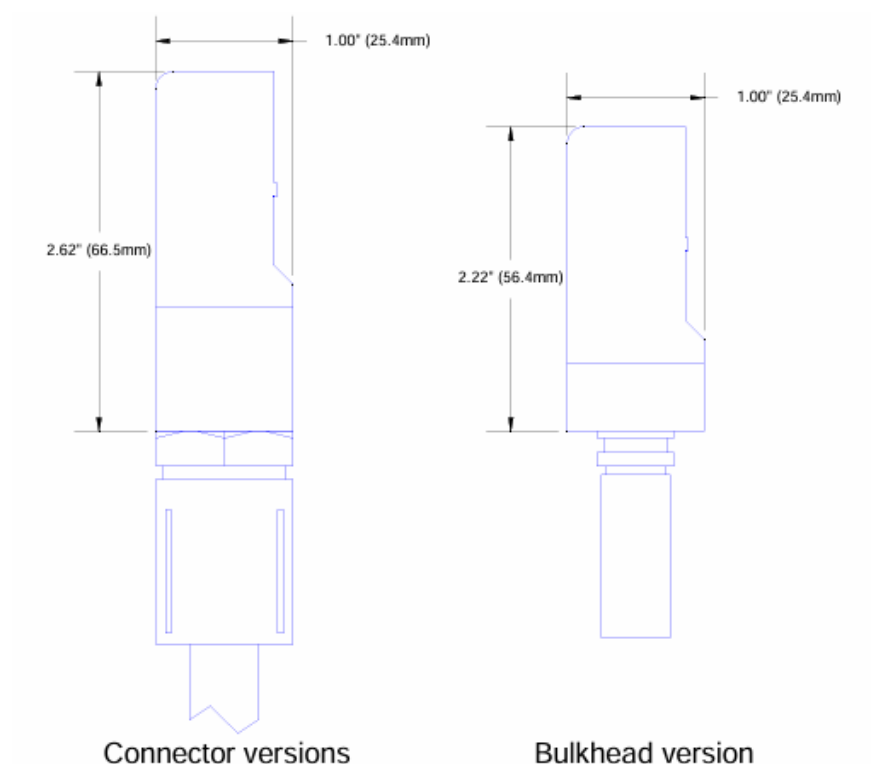


Рисунок 2.14 Технические характеристики прибора

- Потребляемая мощность: 7-20 В постоянного тока, в среднем 3,5 мА, рк 6 мА
- Выход: 0-5,0 В постоянного тока
- Выходное сопротивление: 1000 Ом
- Постоянная времени на выходе: 0,1 сек
- Среднеквадратичный уровень шума: < 1 мВ
- Переходный период при включении питания: <1 сек
- Длина волны источника света: 880 нм
- Углы рассеяния: 15-150 градусов (прибл. Максимальная чувствительность 90 градусов)
- Линейность:  $\pm 2\%$  0-1250 FTU,  $\pm 5\%$  0-1600 NTU
- Температурный коэффициент: < 0,05 %/°C
- Рабочая температура: от 0°C до 65°C
- Глубина погружения: 6000 м (19 700 футов)
- Вес датчика (сухой): 80 г (3 унции)
- Диаметр корпуса: 2,5 см (1,0 дюйма)

- Материалы: Жесткий полиуретановый пластик и эпоксидная смола

Измеритель мутности Seapoint - это датчик, который измеряет мутность путем обнаружения рассеянного света от взвешенных частиц в воде. Небольшие размеры, очень низкое энергопотребление, высокая чувствительность, широкий динамический диапазон и глубина погружения до 6000 метров позволяют использовать этот датчик в большинстве случаев, когда требуется измерить мутность или концентрацию взвешенных частиц. Датчик также нечувствителен к окружающему освещению, находясь под водой, и имеет очень низкий температурный коэффициент.

Измеритель мутности Seapoint улавливает рассеянный свет из небольшого объема в пределах 5 сантиметров от окон датчика. Ограниченный объем датчика позволяет калибровать датчик в относительно небольших емкостях для воды без ошибок, связанных с отражениями от поверхности и стен. Это также позволяет использовать датчик в стесненных условиях, таких как переполненные приборами помещения, трубы и неглубокие ручьи.

Две линии управления позволяют пользователю самостоятельно настроить чувствительность измерителя мутности Seapoint, выбрав один из четырех коэффициентов усиления. Это позволяет легко настроить чувствительность таким образом, чтобы обеспечить диапазон и разрешение, необходимые для конкретного применения. Чувствительность измерителя мутности Seapoint зависит от возможных значений 2, 10, 40 и 200 мВ/FTU.

Каждый датчик настроен на заводе-изготовителе для обеспечения постоянной чувствительности к формазину Стандарт мутности измеряется в формазинных единицах измерения мутности (FTU). Пользователь также может откалибровать датчик с учетом интересующих его частиц для измерения концентрации взвешенных веществ.

Измеритель мутности Seapoint изготовлен из прочных, устойчивых к коррозии материалов и качественных электронных компонентов для поверхностного монтажа, что обеспечивает долговечность и высокую надежность.

Измеритель мутности Seapoint имеет электронную конструкцию, которая обеспечивает высокую чувствительность при минимальном энергопотреблении. Компоненты Micropower используются таким образом, что большая часть энергии, потребляемой датчиком, используется для питания светодиодов. Общая потребляемая мощность составляет 7-20 В постоянного тока, в среднем 3,5 мА, максимальная - 6 мА. В схеме управления источником света используется оптическая обратная связь. Это дает ряд преимуществ, включая превосходную температурную компенсацию оптических компонентов, компенсацию их старения и стабильную производительность в течение секунды после включения питания.

Источник света модулируется, и синхронное обнаружение используется для выделения сигнала рассеяния из общего сигнала, устраняя составляющую окружающего освещения и большую часть электронного шума. Достижение высокой чувствительности при малом энергопотреблении было достигнуто за счет уделения пристального внимания правильной компоновке печатной платы, чтобы предотвратить любое случайное включение сигналов, синхронных с модуляцией источника света, в схему обнаружения. Таким образом, отпала необходимость в регулировке смещения — напряжение смещения для этого датчика при любом коэффициенте усиления находится в пределах одного милливольт от нуля. Источник света модулируется, и синхронное обнаружение используется для выделения сигнала рассеяния из общего сигнала, устраняя составляющую окружающего освещения и большую часть электронного шума. Достижение высокой чувствительности при малом энергопотреблении было достигнуто за счет уделения пристального внимания правильной компоновке печатной платы, чтобы предотвратить любое случайное включение сигналов, синхронных с модуляцией источника света, в схему обнаружения. Таким образом, отпала необходимость в регулировке смещения — напряжение смещения для этого датчика при любом коэффициенте усиления находится в пределах одного милливольт от нуля.



### Глава 3. НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МУТНОСТИ

Были проведены замеры мутности водотоков в городе Санкт-Петербурге с помощью прибора Seapoint Tubidity Meter.

Замеры проводились с мостов чтобы данные по вертикалям были замерены максимально четко.



Рисунок 3.1 Натурные измерения мутности

### 3.1 Объекты исследования.

Замеры проводились по следующим объектам:

Таблица 2 Водотоки и створы.

Место	Объект
Банковский мост	Канал Грибоедова
Демидов мост	
Вознесенский мост	
Харламов мост	
Пикалов мост	
Мало-Калинкин мост	
Новоконюшенный мост	
Старокалинкин мост	Река Фонтанка
Египетский мост	
Обуховский мост	
Лештуков мост	
Аничков мост	
Прачечный мост	
Пантелеймоновский мост	
Монастырский мост	Река Монастырка
Казачий мост	
Атаманский мост	Обводный канал
Каретный мост	
Боровой мост	
Масляный мост	
Варшавский мост	
Таракановский мост	
Мост Степана Разина	
Бумажный мост	Бумажный канал



Молвинский мост	
4ый Ждановский мост	р. Ждановка
Мало - Петровский мост	
мост Красного курсанта	
Ждановский мост	
Кронверкский мост	Кронверкский пролив
Иоанновский мост	
Зап.Артиллерийский мост	Кронверкский проток
Вост.Артиллерийский мост	
Мало - Крестовский мост	р. Крестовка
Головинский мост	р. Черная речка
Строгановский мост	
Чернореченский мост	
Ланской мост	
Верхний Лебяжий мост	Лебяжья канавка
Нижний Лебяжий мост	
1 - ый Садовый мост	р. Мойка
Малоконюшенный мост	
Большой конюшенный мост	
Красный мост	
Поцелуев мост	
Храповицкий	
2ой Зимний мост	Зимняя канавка
1ый Зимний мост	
1ый мост Круштейна	Адмиралтейский канал
2ой мост Круштейна	
Адмиралтейский мост	Ново-Адмирал.к-л

После первичной обработки данных было принято решение остановиться на 3х объектах. Это канал Грибоедова, река Фонтанка и Обводный канал. По этим объектам достаточно замеренных вертикалей чтобы впоследствии их обрабатывать. По остальным объектам были обработаны данные, сделана графики изменения мутности по вертикали, графики измерения мутности по длине водотока с этих объектов получается максимально некорректными из-за недостаточности замеренных вертикалей.

### 3.2 Изучение распределения мутности по вертикале.

По данным с замеров были построены графики изменения мутности по вертикалям.

Канал Грибоедова:

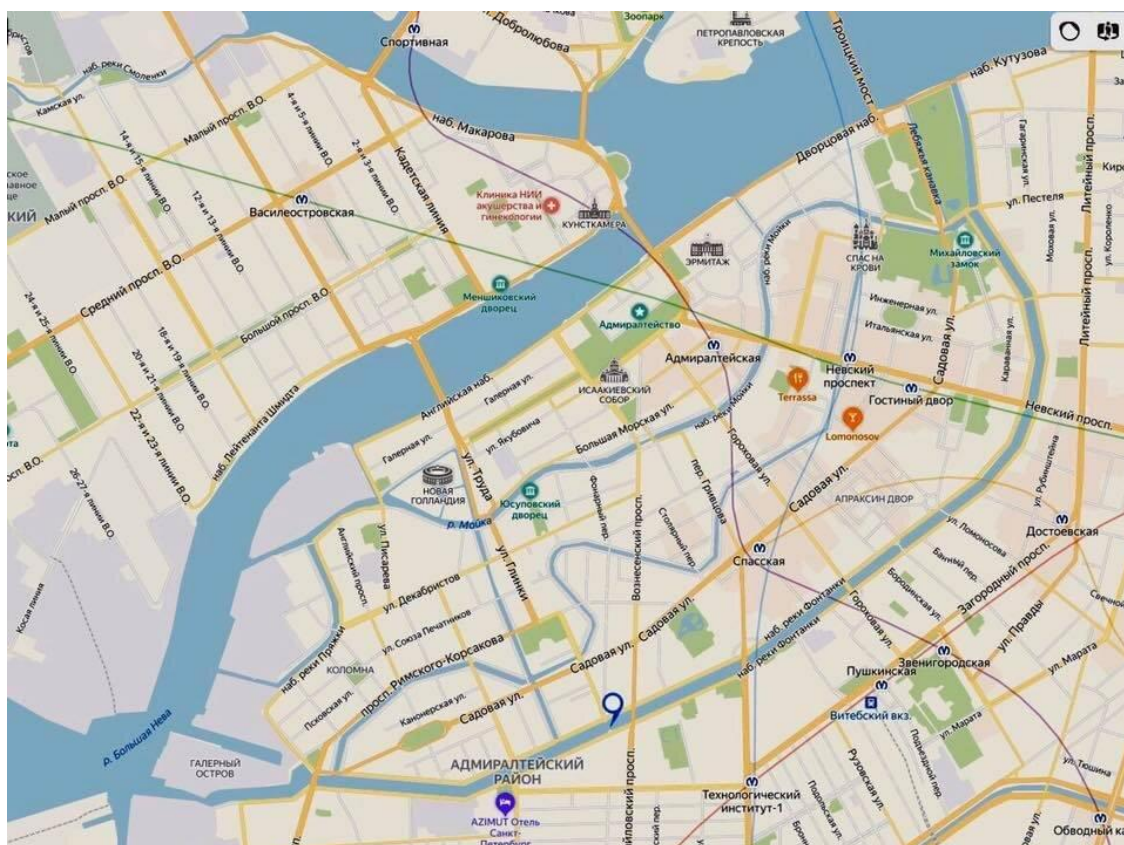


Рисунок 3.1 Карта-схема Канала Грибоедова

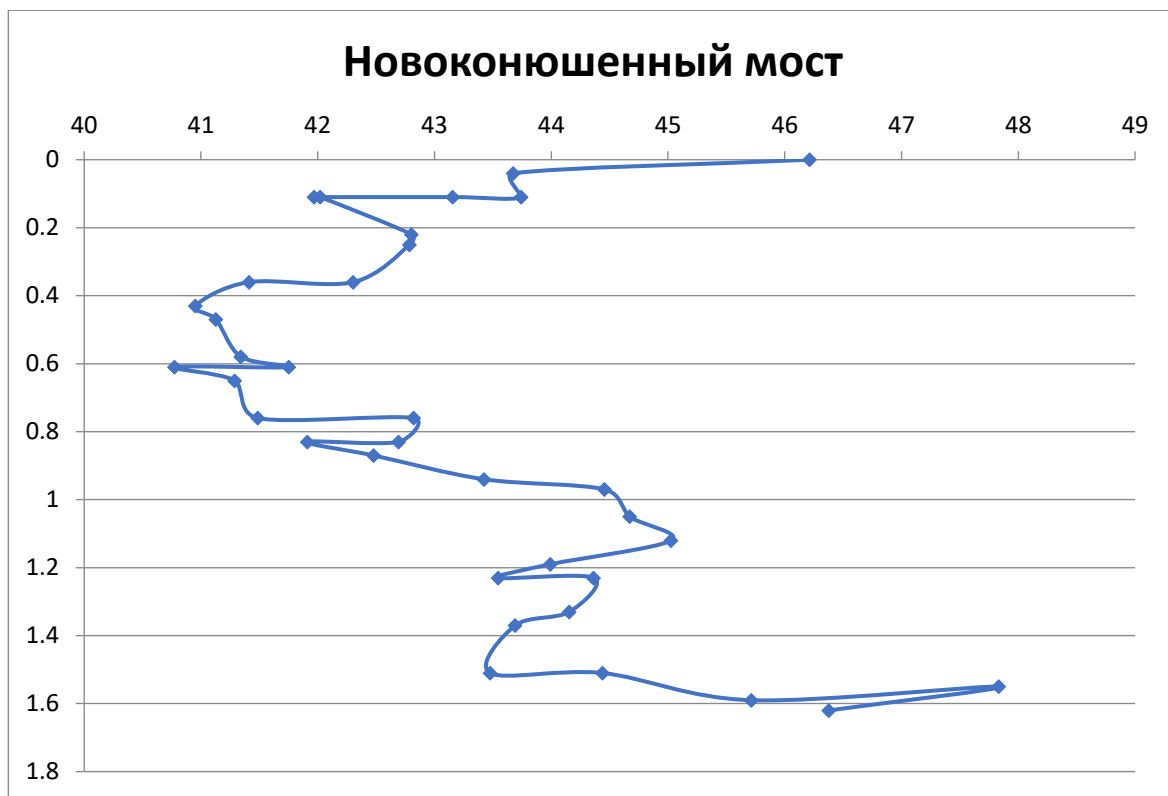


Рисунок 3.2 Данные по вертикали

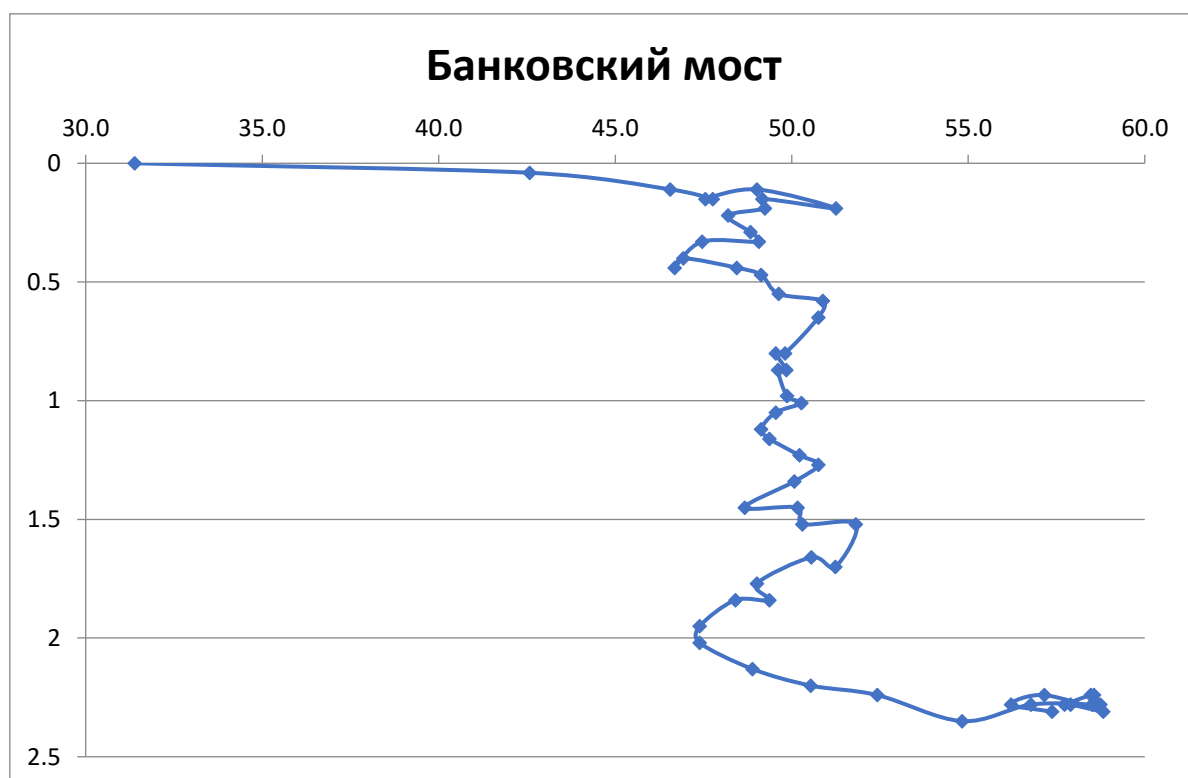


Рисунок 3.3 Данные по вертикали

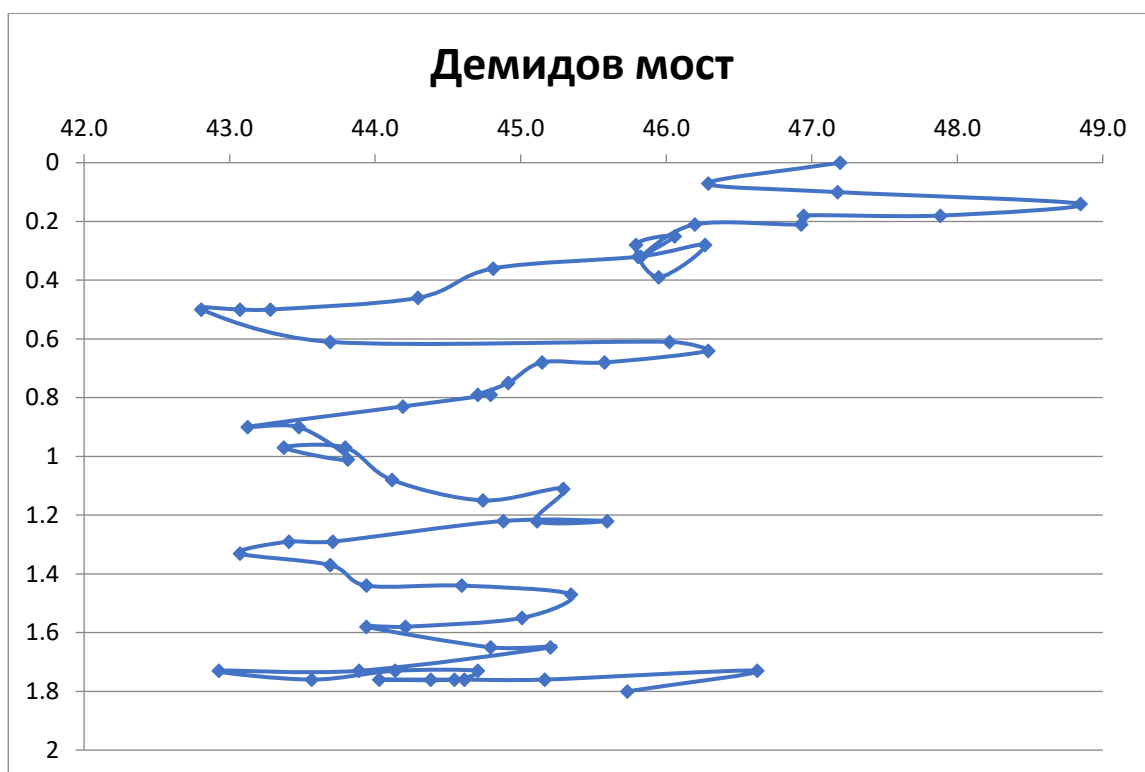


Рисунок 3.4 Данные по вертикали

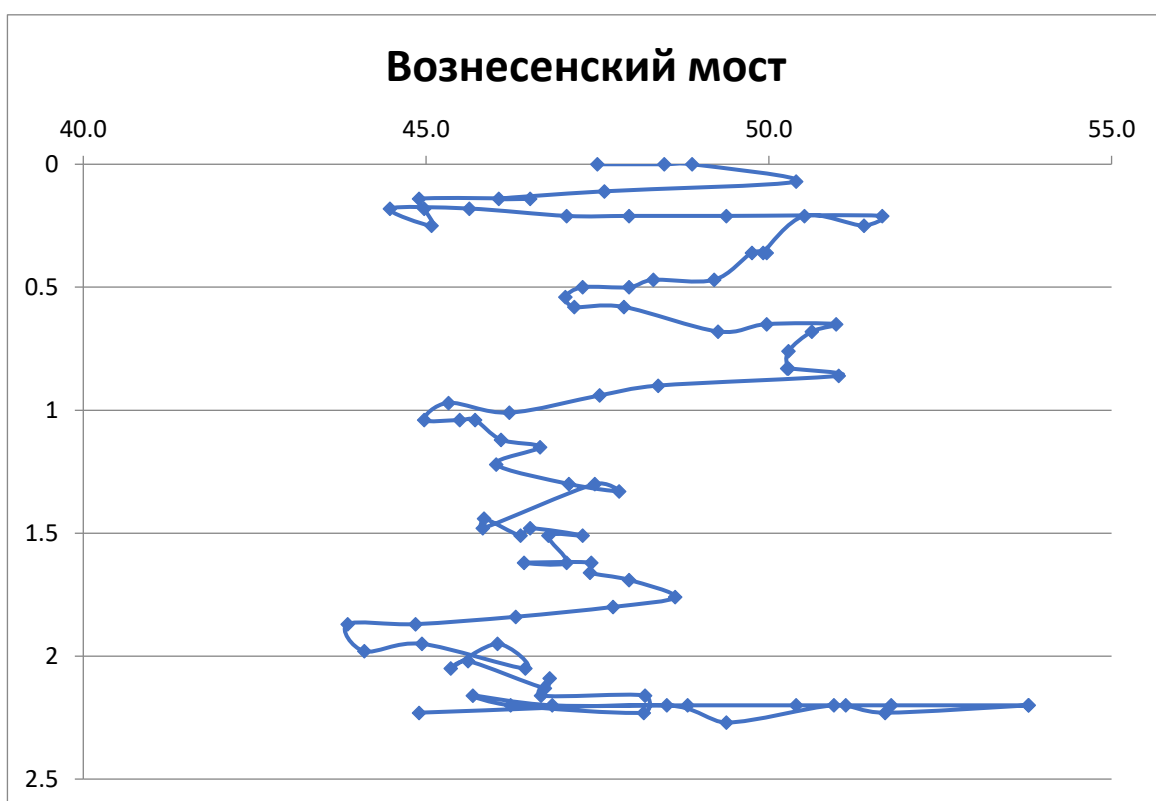


Рисунок 3.5 Данные по вертикали

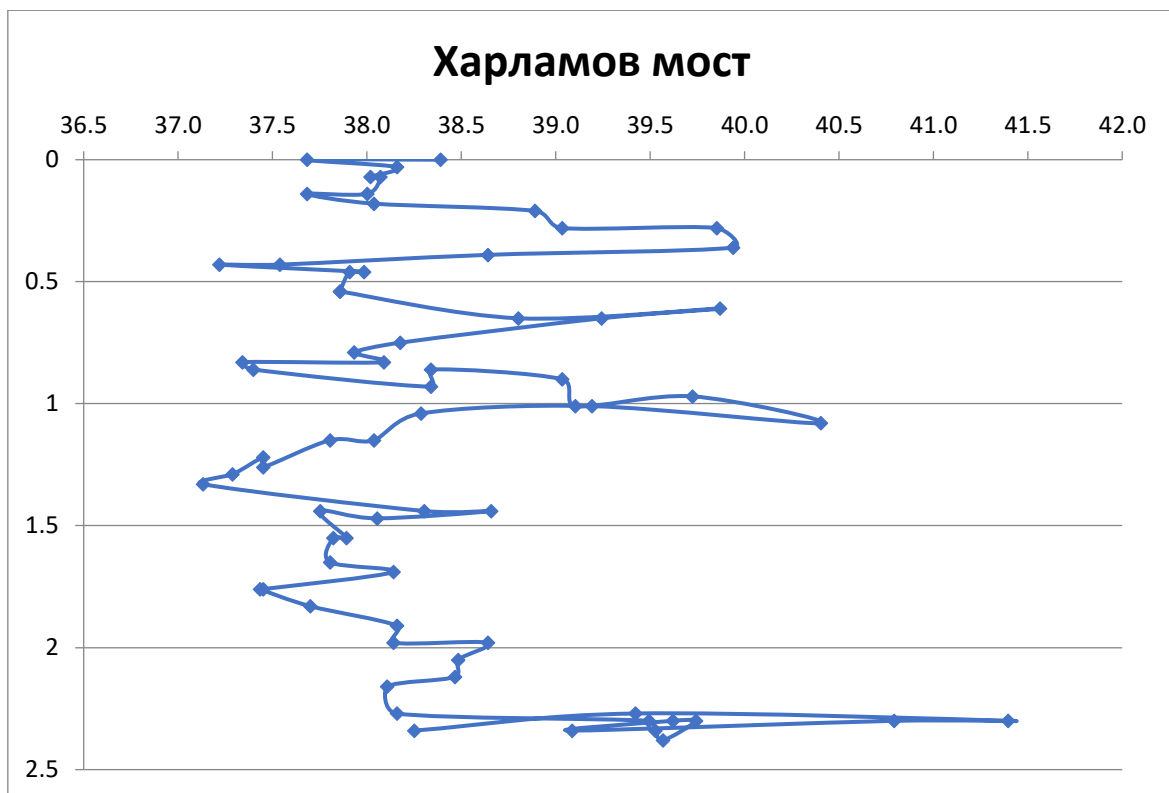


Рисунок 3.6 Данные по вертикали

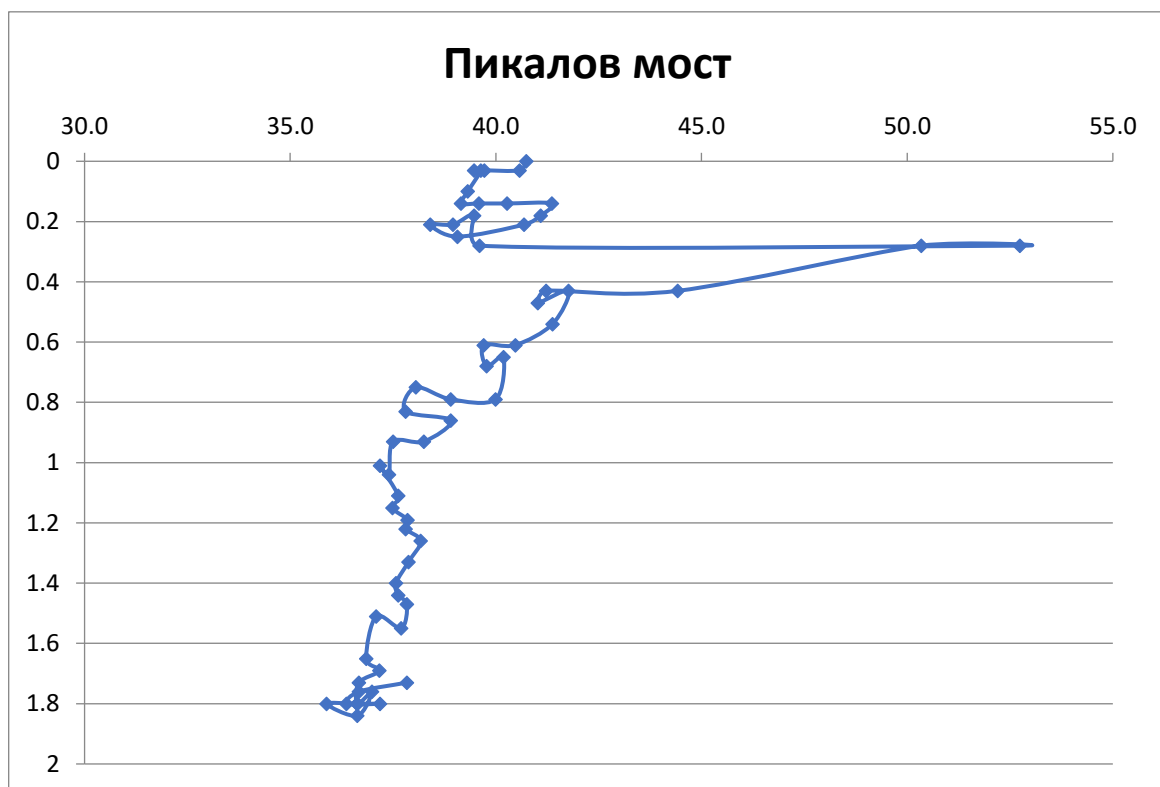


Рисунок 3.7 Данные по вертикали

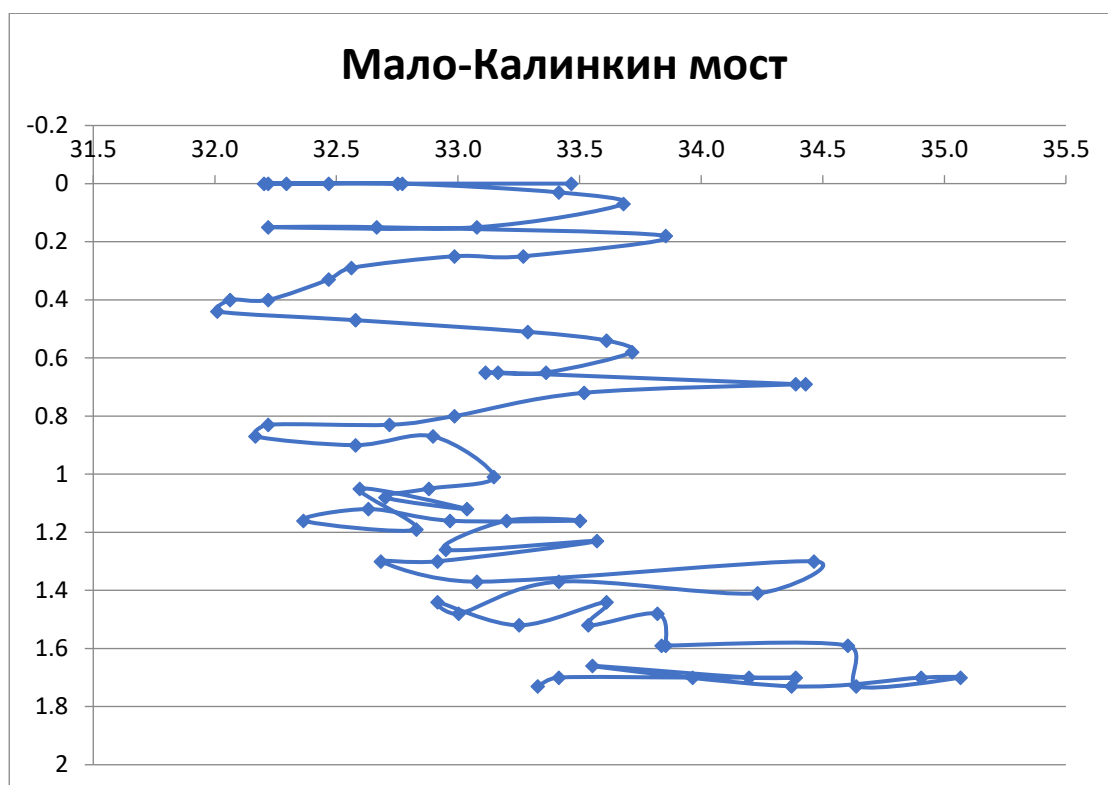


Рисунок 3.7 Данные по вертикали

Таблица 3 Данные по мутности и глубине

Средняя мутность на профиле, г/м <sup>3</sup>						
1	2	3	4	5	6	7
44,3	50,3	44,9	46,6	38,9	38,9	33,7
Примерная макс. глубина по профилю						
1,62	2,35	1,8	2,27	2,38	1,87	1,77
ср Мутность канала Грибоедова				42,5		

Вывод:

По обработанным данным видно, что мутность к последнему створу уменьшается. Это может быть связано со Строением самого канала, на поворотах происходят потери мощности переносимости потока и осаднения самих наносов, что может влиять на значение мутности. Так же на это может влиять строение русла реки.

## Река Фонтанка:

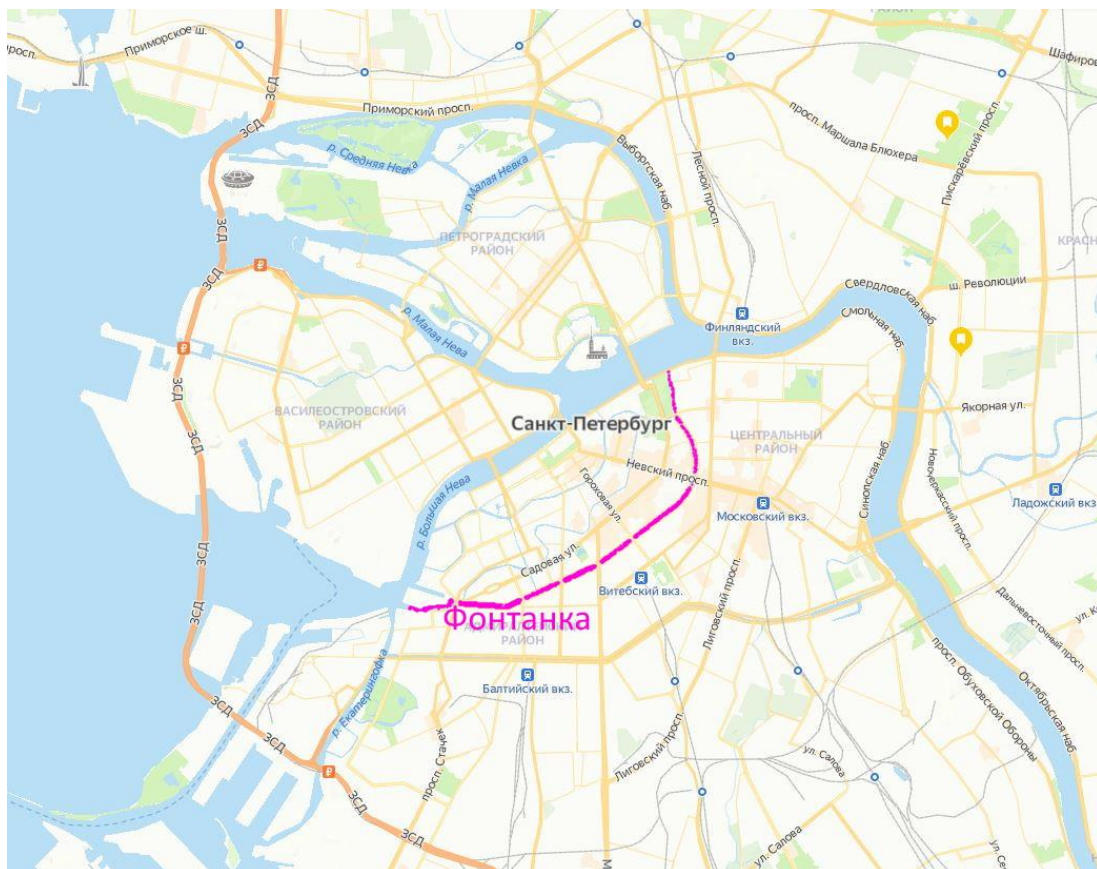


Рисунок 3. 8 Карта-схема Реки Фонтанки

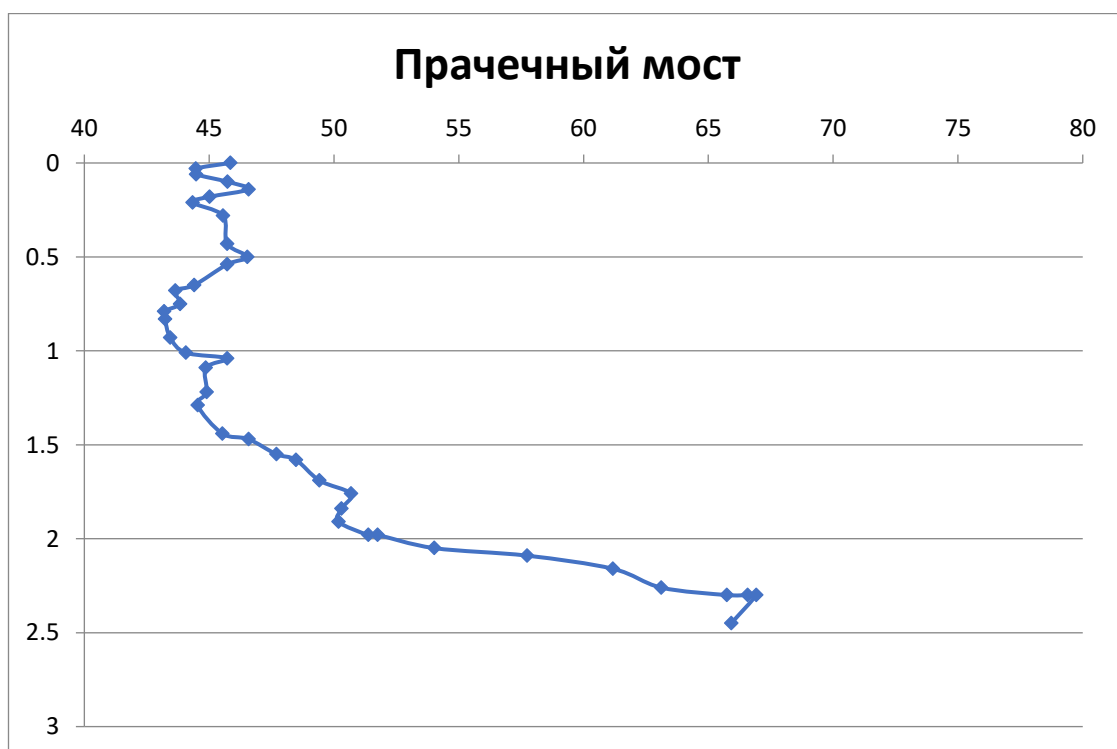


Рисунок 3.9 Данные по вертикали

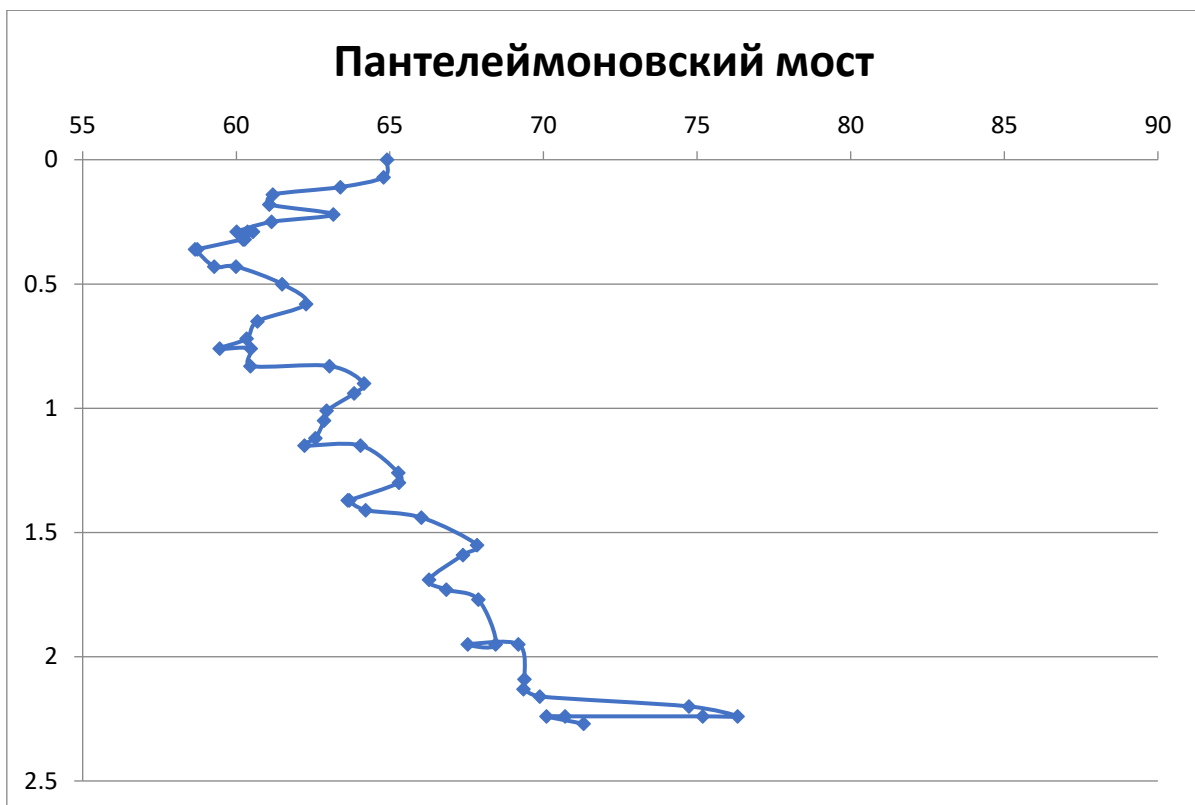


Рисунок 3.10 Данные по вертикали

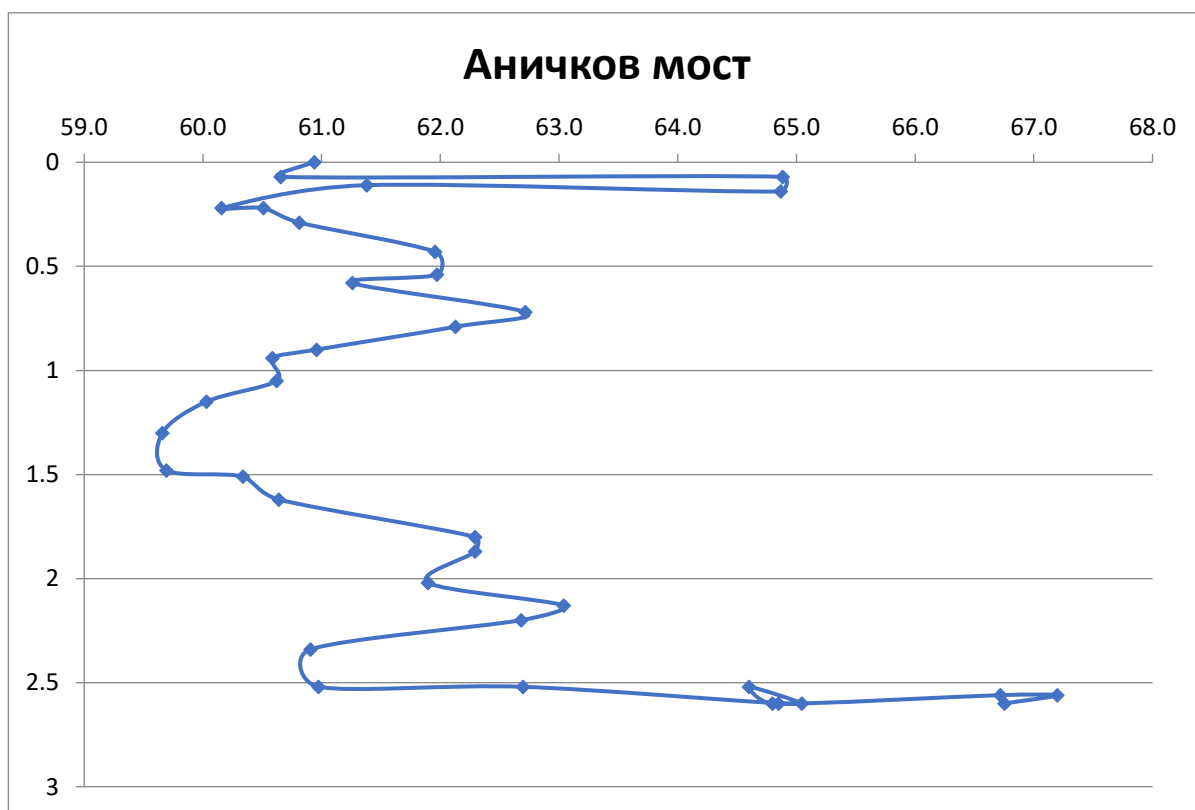


Рисунок 3.11 Данные по вертикали



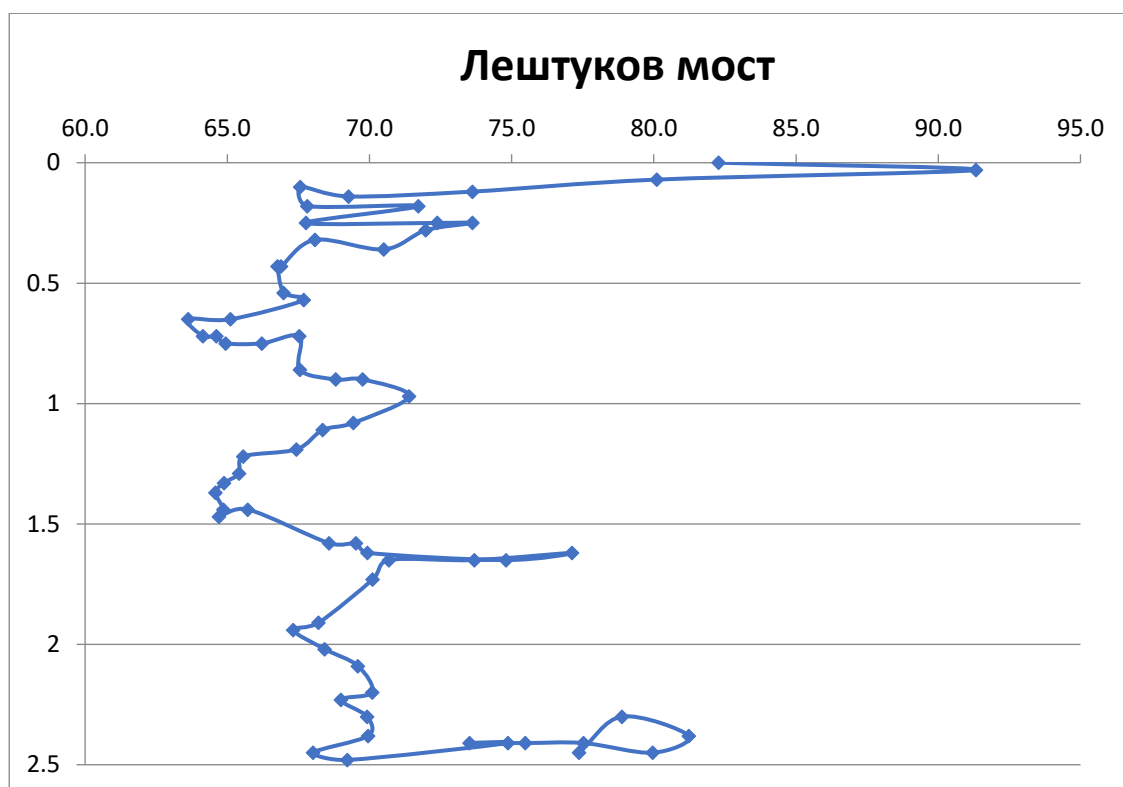


Рисунок 3.12 Данные по вертикали

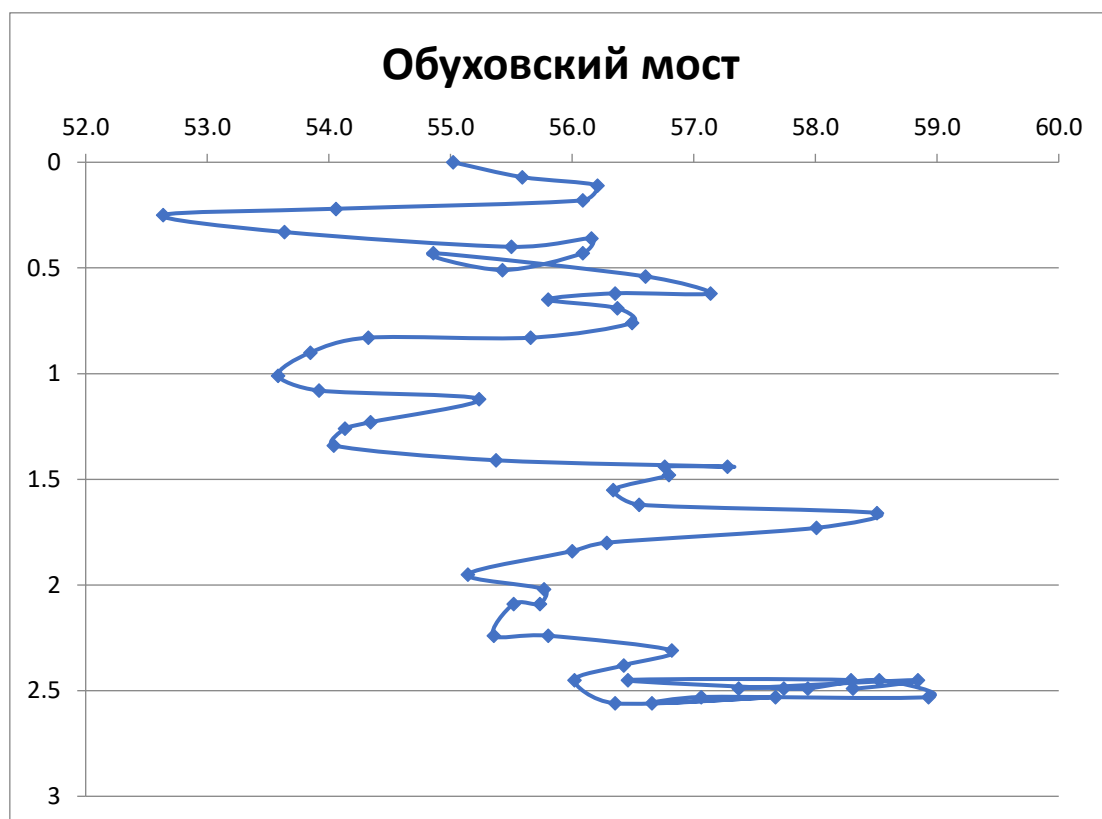


Рисунок 3.13 Данные по вертикали

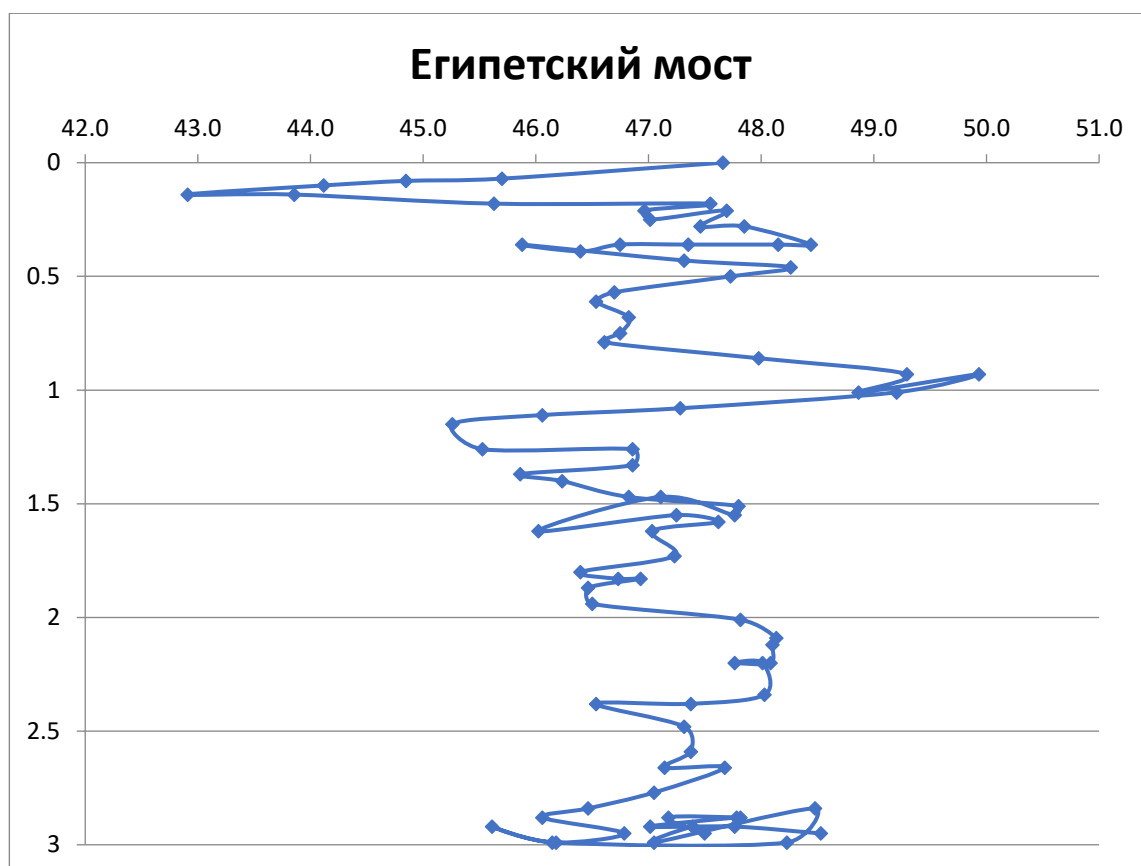


Рисунок 3.14 Данные по вертикали

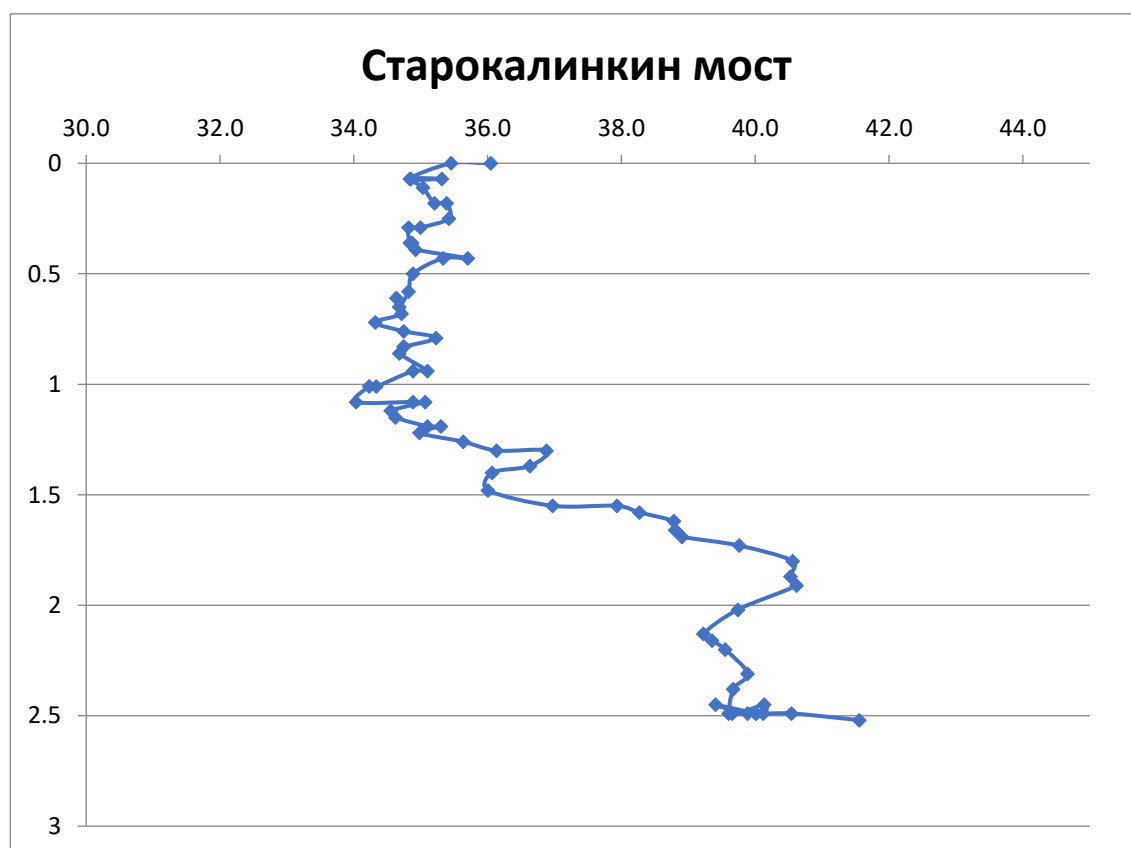


Рисунок 3.15 Данные по вертикали

Таблица 4 Данные по мутности и глубине

Средняя мутность на профиле, г/м3						
1	2	3	4	5	6	7
58,3	67,1	63,3	71	56,7	47,4	38,3
Примерная макс. глубина по профилю						
2,46	2,27	2,63	2,48	2,56	2,99	2,52
ср Мутность реки Фонтанка				57,44286		

Вывод:

По обработанным данным видно, что мутность к последнему створу так же уменьшается как и у канала Грибоедова. Это может быть связано со строением самого канала, на поворотах происходят потери мощности переносимости потока и осаждения самих наносов, что может влиять на значение мутности. Так же на это может влиять строение русла реки.

Обводный канал:

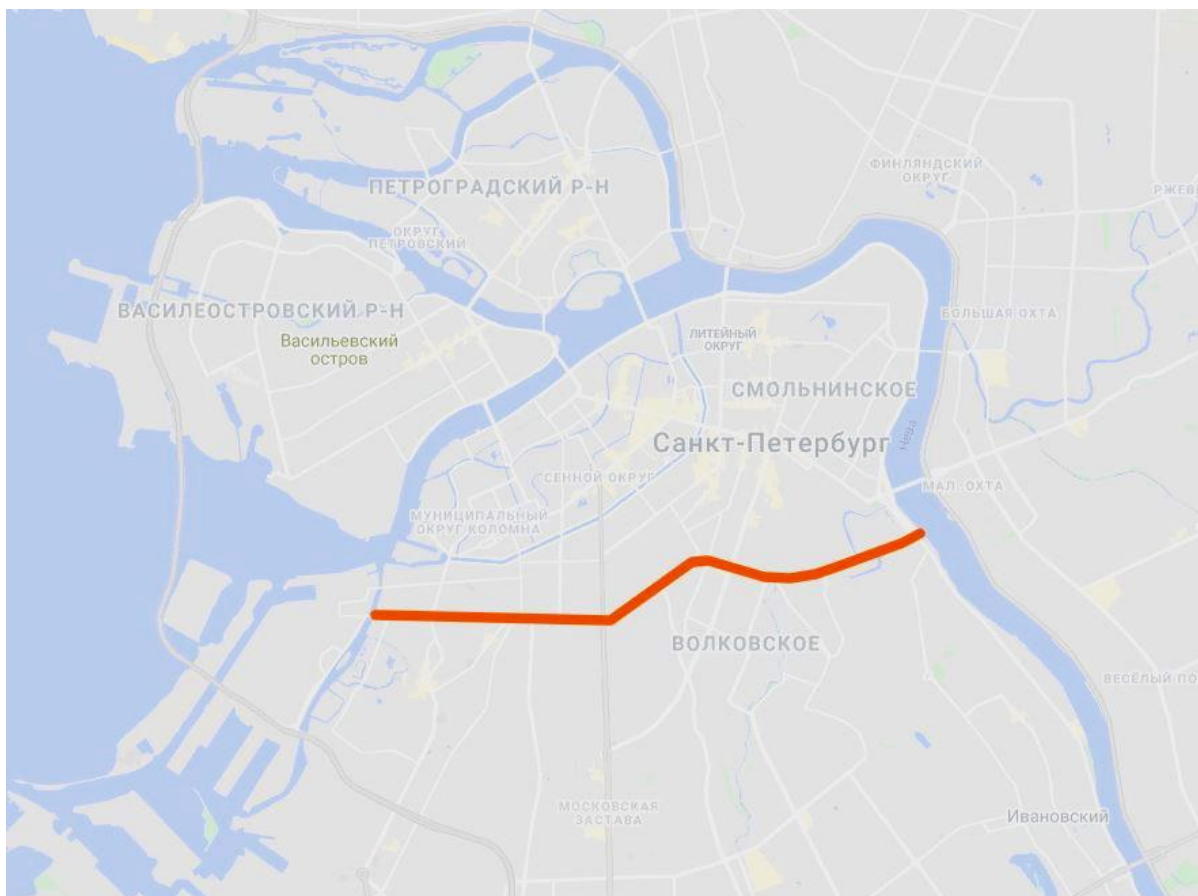


Рисунок 3.16 Карта-схема Обводного канала

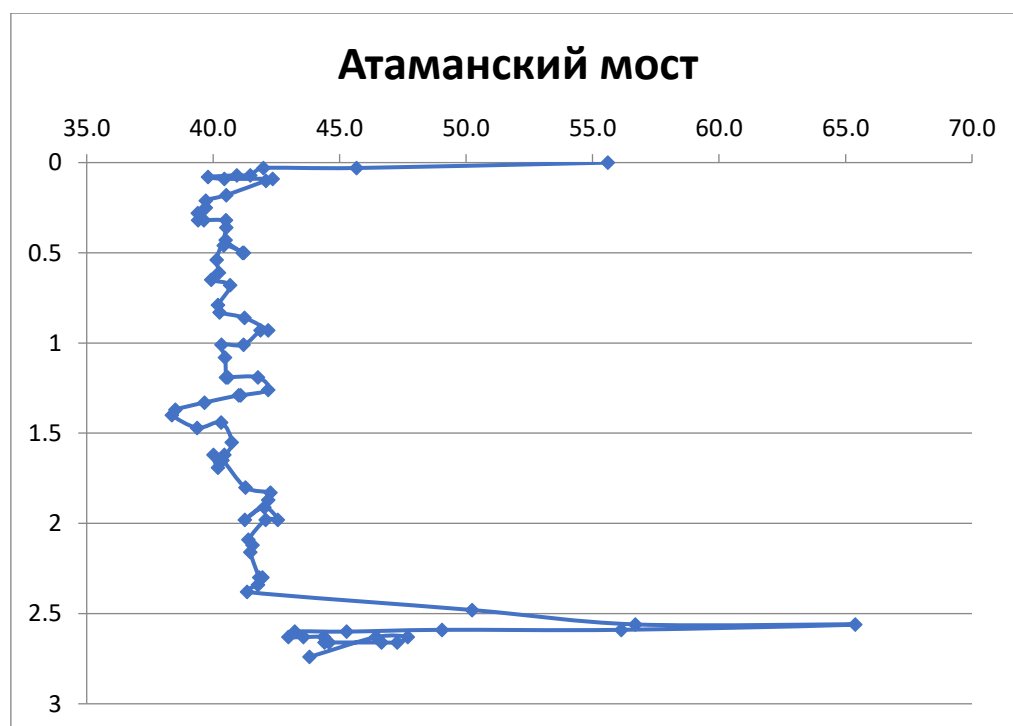


Рисунок 3.17 Данные по вертикали

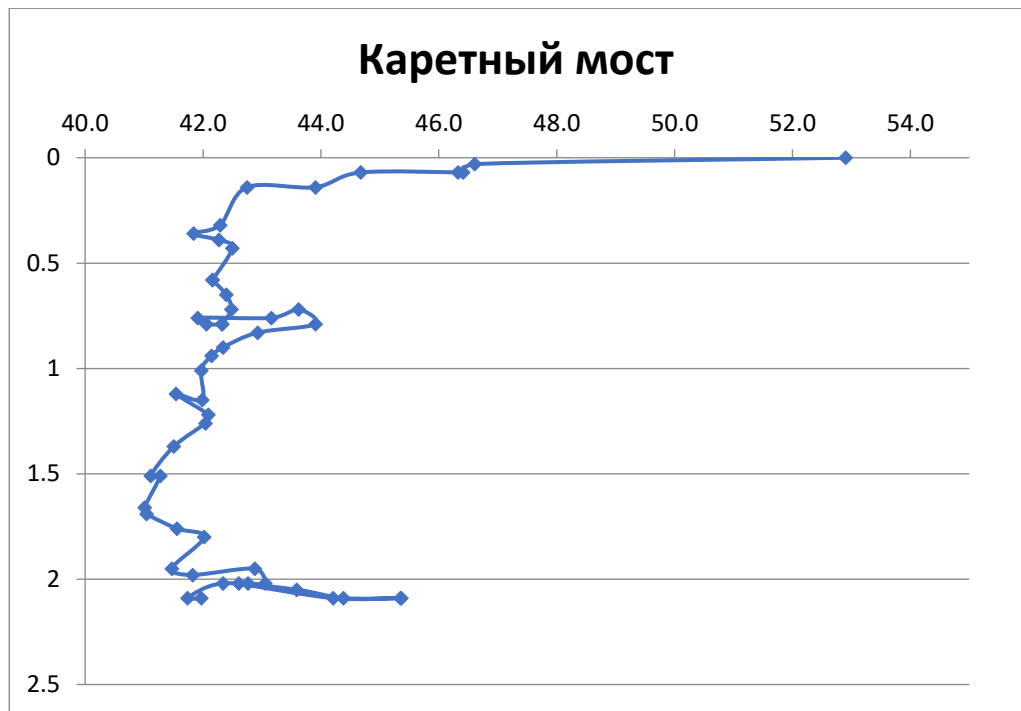


Рисунок 3.18 Данные по вертикали

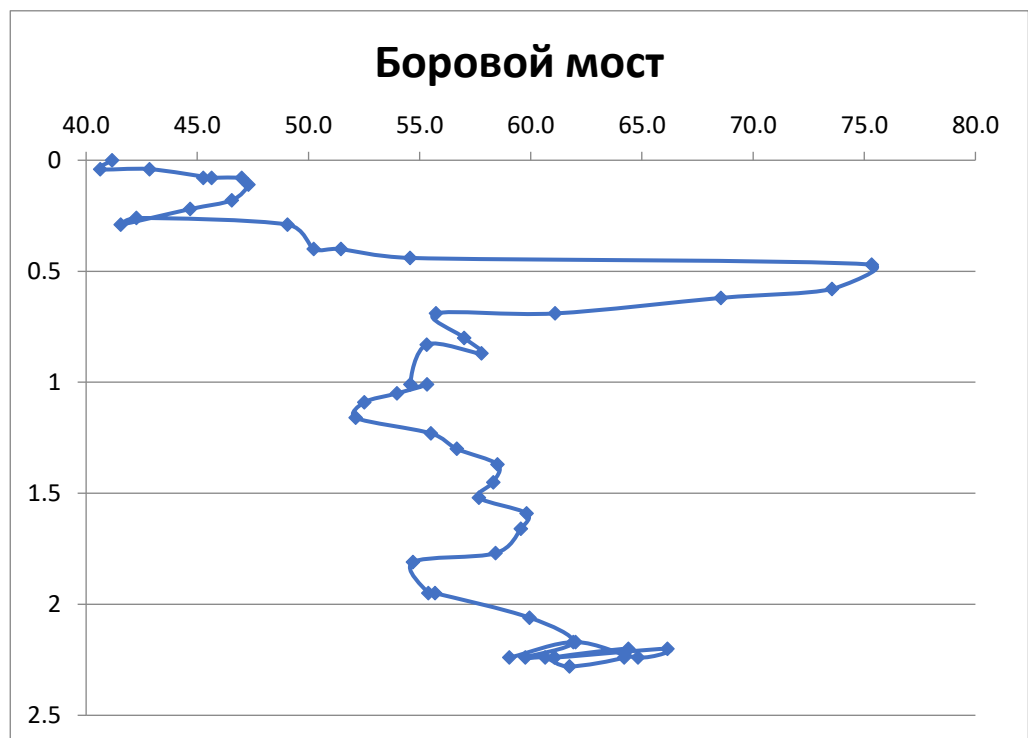


Рисунок 3.19 Данные по вертикали

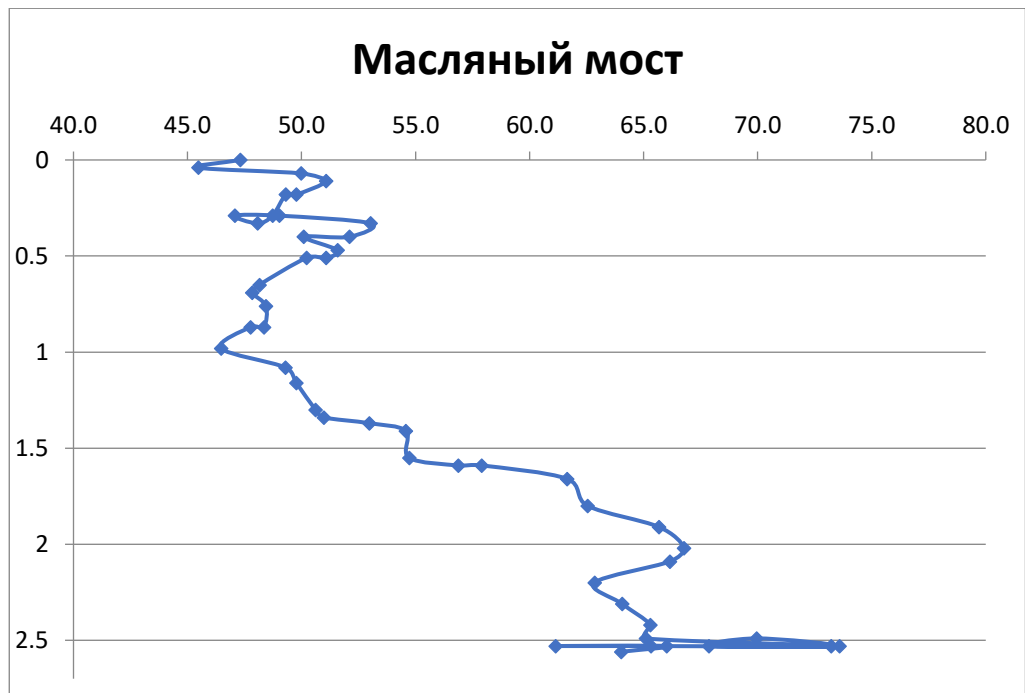


Рисунок 3.20 Данные по вертикали

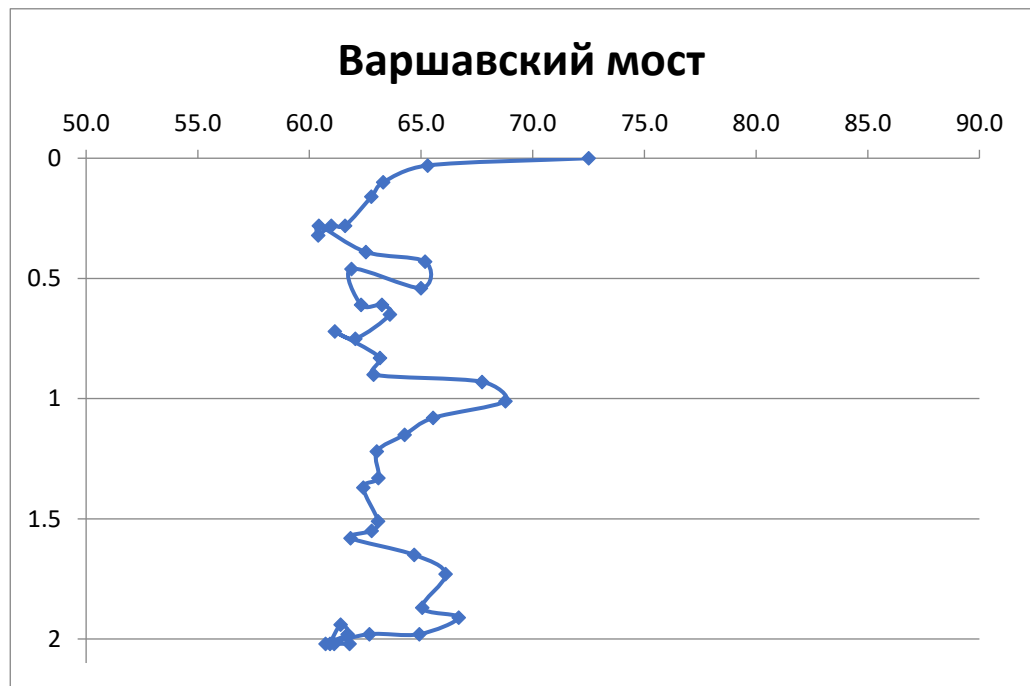


Рисунок 3.21 Данные по вертикали

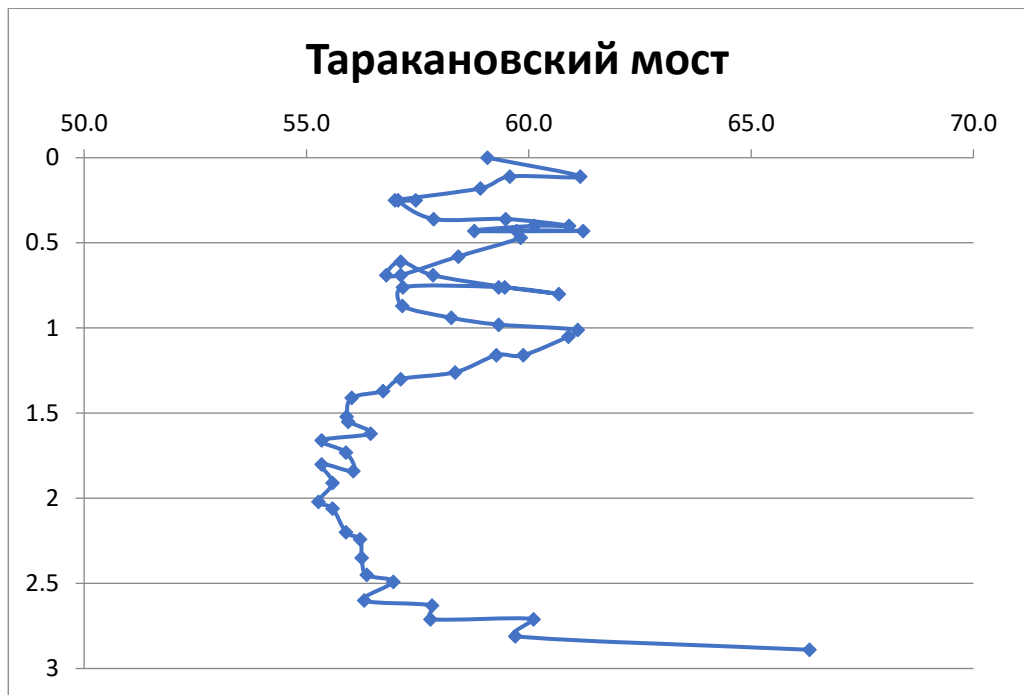


Рисунок 3.22 Данные по вертикали

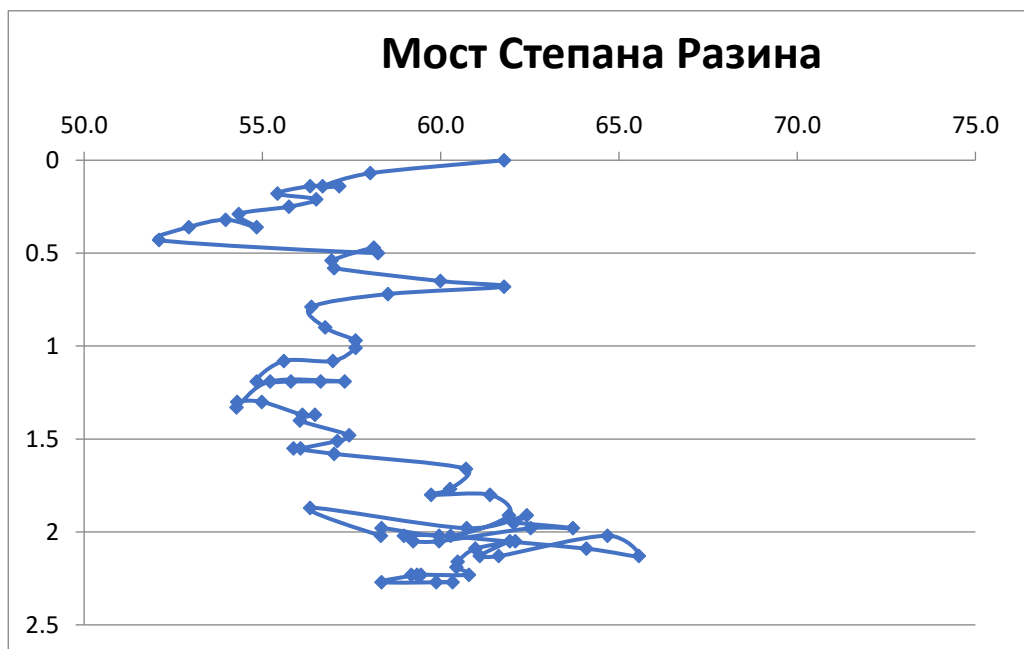


Рисунок 3.23 Данные по вертикали

Таблица 5 Данные по мутности и глубине

Средняя мутность на профиле, г/м3						
1	2	3	4	5	6	7
43,4	43,1	57,8	58	63,1	57,6	60
Примерная макс. глубина по профилю						
2,74	2,13	2,28	2,56	2,02	2,89	2,27
ср Мутность Обводного канала				54,71429		

Вывод:

По обработанным данным видно, что мутность к последнему створу увеличивается. Это может быть связано со строением самого канала, Обводный канал является более прямолинейным чем река Фонтанка и канал Грибоедова. Потерь энергии потока должно быть меньше, а значит переносимость потока выше и показатель мутности к последнему створу больше.

### 3.3 Распределение мутности по длине водотока.

После построения графиков изменения мутности по вертикалям, были сделаны графики изменения мутности по длине водотока.

Канал Грибоедова:



Рисунок 3.24 Изменение мутности по длине водотока



Река Фонтанка:



Рисунок 3.25 Изменение мутности по длине водотока

Обводный канал:



Рисунок 3.26 Изменение мутности по длине водотока

Так же была посчитана средняя мутность по каждой вертикали и средняя мутность по длине каждого водотока.

Таблица 6 Осредненные данные со всего водотока

ср Мутность канала Грибоедова	42,5
ср Мутность реки Фонтанка	57,4
ср Мутность Обводного канала	54,7

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После построения графиков мутности по длине водотока и их сравнения можно наблюдать следующее. Среднее значение мутности канала Грибоедова меньше и составляет  $42,5 \text{ г/м}^3$  чем у реки Фонтанки  $57,4 \text{ г/м}^3$  и Обводного канала  $54,7 \text{ г/м}^3$ .

Если посмотреть на графики то по ним видно что от начала водотока к его концу значения мутности повышаются у Обводного канала от  $43,4 \text{ г/м}^3$  в начале и до  $60,1 \text{ г/м}^3$  в конце. У канала Грибоедова и реки Фонтанки значения мутности к концу водотока уменьшаются  $44,3 \text{ г/м}^3 - 33,7 \text{ г/м}^3$  и  $58,2 \text{ г/м}^3 - 38,3 \text{ г/м}^3$ .

Это может быть связано как с антропогенным воздействием на водотоки так и с их географическим расположением. Обводный канал является более прямолинейным нежели река Фонтанка или канал Грибоедова. Из-за этого сила потока у него больше и переносить он может больше наносов которые впоследствии влияют на значение мутности. Река Фонтанка и канал Грибоедова имеют извилистое русло. Из-за этого могут быть потери мощности потока и самих нанос на поворотах что так же влияет на значение мутности.

## Список использованной литературы

1. А. В. Караушев, Теория и методы расчета речных наносов. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1977.
2. Сайта производителя датчика DFROBOT Drive the future [Сайт]: Режим доступа.- [Turbidity\\_sensor\\_SKU\\_SEN0189-DFRobot](#)
3. Дополнительные сведения о мутности, Википедия [Сайт]: Режим доступа.- [Мутность воды — Википедия \(wikipedia.org\)](#)
4. А. Н. Келль, Осадконакопление в водоемах. – Санкт-Петербург 2023.
5. Д. А. Орлов, Процессы заносимости Обводного канала г.Санкт-петербурга. - Санкт-Петербург 2023.