



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Математическое моделирование повышения уровней
в г. Отрадное, вызванное зажорными явлениями

Исполнитель Талюк Ксения Юрьевна
(фамилия, имя, отчество)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

Гей
(подпись)

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

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«16» июня 2026 г.

Санкт-Петербург
2026

Содержание

Введение	2
Глава 1. Физико-географическая и климатическая характеристика реки Нева....	5
1.1. Общая характеристика	5
1.2. Особенности ледового режима.....	7
1.3. Характеристика реки в районе г. Отрадное	9
1.4. Климат.....	10
Глава 2. Методология моделирования подпорных волн при зажорах	12
2.1. Определения зажорных явлений и механизм появления волны подпора	12
2.2. Математический аппарат	13
2.3. Уравнение руслового стока	14
2.4. Методика подбора расчетных параметров.....	17
Глава 3. Оценка изменений уровней на реке нева за 2008-2022 гг.	19
3.1. Исходные данные	19
3.2. Хронологические графики уровней воды	20
3.3. Взаимосвязь температуры воздуха с уровнями воды.....	25
Глава 4. Математическое моделирование зажорных явлений.....	30
4.1. Численный метод решения уравнения руслового стока	30
4.2. Апробирование разработанной математической модели.....	31
4.3. Результаты математического моделирования	33
Заключение	35
Список литературы	37
Приложения	40

Введение

Гидрологические процессы в речных системах России, особенно в регионах с выраженным сезонным ледовым режимом, отличаются высокой сложностью и многофакторностью. Особую опасность представляют зажорные явления - скопления рыхлого внутриводного льда (шуги) и мелкобитого льда в русле реки, которые стесняют живое сечение потока, вызывая резкий подъём уровня воды. Это приводит к локальным наводнениям, повреждению инфраструктуры, нарушению работы коммунальных систем и создаёт риски для безопасности населения.

Зажоры формируются в осенне-зимний период на участках реки, где интенсивно образуется шуга при резком изменении уклона водной поверхности. Их образование сопровождается уменьшением водопрпускной способности русла, подъёмом уровня воды выше зажора и спадом ниже, а также каскадным формированием скоплений льда, что усугубляет подпор воды. На реках России (включая участки Невы) зажорные явления нередко провоцируют подъём уровня воды, превышающий показатели весеннего половодья.

Город Отрадное находится в зоне повышенного риска. Река в этом районе характеризуется неустойчивым ледовым режимом, антропогенным воздействием (сброс тёплых вод, регулирование стока), сложной конфигурацией русла (извилистость, мелководные участки), а также близостью критически важных объектов - жилых зон, коммуникаций, транспортных магистралей. Исторические данные фиксируют регулярные зажорные явления: например, в январе–феврале 2018 г. уровень воды у гидрологического поста в Отрадном превысил опасную отметку (440 см), достигнув 443 см. Это потребовало мобилизации МЧС, оповещения населения и подготовки пунктов временного размещения.

Ключевыми факторами, усугубляющими проблему, являются: климатические изменения (рост частоты температурных колебаний), антропогенные воздействия (нарушение естественного ледового режима из-за

сброса подогретых вод), морфология русла (узкие участки, изгибы, песчаные отмели), а также недостаточность существующих методов прогноза, не учитывающих локальные условия в полной мере.

Социально-экономическое значение проблемы обусловлено материальным ущербом от затопления, угрозой безопасности населения, экологическим ущербом (загрязнение водных объектов, разрушение прибрежных экосистем) и значительными экономическими потерями на ликвидацию последствий. Разработка математической модели для прогнозирования подъёма уровня воды из-за зажоров позволит оперативно оценивать риски, планировать защитные мероприятия, оптимизировать работу мониторинговых и спасательных служб, а также адаптировать градостроительную политику с учётом гидрологических рисков.

Актуальность обусловлена ростом частоты и интенсивности зазорных явлений в условиях меняющегося климата, недостаточной точностью существующих методов прогноза для локальных условий Отрадного, социально-экономической значимостью снижения ущерба от затопления и необходимостью создания специализированного инструмента для своевременного принятия спасательных мер.

Цель работы заключается в сборе и анализе данных о колебаниях уровня воды и апробировании математической модели руслового стока, которая позволит прогнозировать изменения уровня воды в реке возле г. Отрадное, вызванные зазорными явлениями, с учётом воздействия внешних параметров для снижения рисков затопления и улучшения планирования защитных мероприятий.

Объект исследования - река Нева

Предмет исследования - среднесуточные уровни воды за многолетний период.

Задачи:

1. Проанализировать многолетние ряды наблюдений за уровнями воды реки Невы с 2008 г. по 2022 г. (15 лет).

2. Выявить ключевые факторы и места формирования подпоров на Неве, вызванные зажорными явлениями.

3. Апробировать модель руслового стока для описания перемещения волны подпора.

Глава 1. Физико-географическая и климатическая характеристика реки Нева.

1.1. Общая характеристика

Река Нева — одна из крупнейших рек Северо-Западной России, соединяющая Ладожское озеро (крупнейший пресноводный водоём Европы) с Финским заливом Балтийского моря [20]. Её уникальность обусловлена сочетанием относительно малой длины (74 км) и огромного водосборного бассейна площадью 280 тыс. км², включая водосборную площадь самого Ладожского озера. Данное морфометрическое соотношение предопределяет высокую гидравлическую энергоемкость потока и специфический характер распределения гидродинамических сопротивлений по длине водотока, что необходимо учитывать при численном моделировании зажорных явлений [2] или [22] (Рисунок 1.1.1).

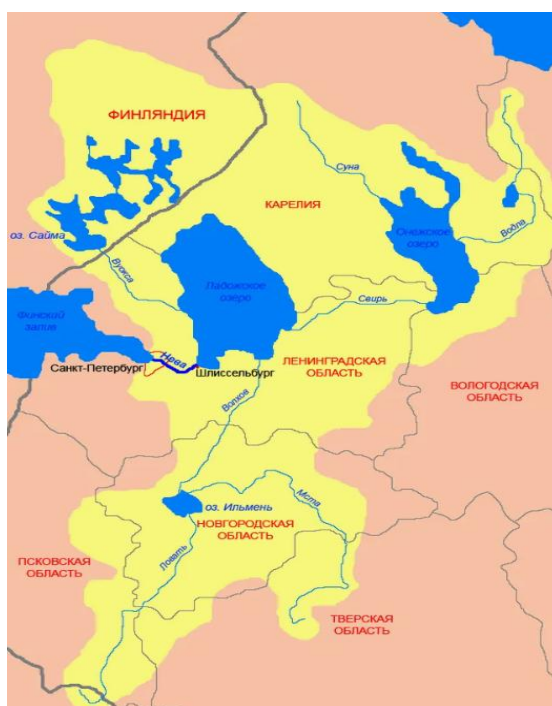


Рисунок 1.1.1 – Схема водосборного бассейна реки Нева

Гидрографическое начало река Нева берет в Шлиссельбургской губе Ладожского озера, где средняя многолетняя отметка высоты уровня воды в истоке зафиксирована на уровне около 4,5 метров в Балтийской системе высот [17].

Показатели среднего многолетнего расхода воды в русле достигают 2500 м³/с [17]. Такой колоссальный объем стока выводит Неву в число наиболее крупных и полноводных водотоков европейской части континента. При этом морфометрические параметры русла демонстрируют существенную изменчивость по всей длине. В районе истока ширина водного зеркала составляет около 1 км, тогда как в устьевой части, в пределах разветвленной дельты, данный показатель расширяется до 1200–1300 м [17]. Глубинные характеристики потока также распределены неравномерно, достигая своих максимальных значений в 24 м в районе Смольнинской излучины около Литейного моста [17].

Скоростной режим течения реки Невы напрямую зависит от локальных морфологических особенностей русла и уклонов водной поверхности [13]. Средняя скорость движения водной массы на плесовых участках варьируется в пределах от 0.8 до 1.1 м/с. Однако на порожистых отрезках реки, ключевым из которых является район Ивановских порогов, гидравлическая структура потока претерпевает резкие изменения, и скорости течения возрастают до критических значений в 3–4 м/с [17]. Именно эта динамическая особенность порожистого участка предопределяет условия для интенсивного зимнего шугообразования и последующего формирования зажорных блокировок русла [3].

Стабильность и постоянство гидрологического стока реки в течение всего года обеспечиваются уникальным природным механизмом регулирования уровней, роль которого выполняет Ладожское озеро [17]. Главным источником питания водотока является озерный сток, доля которого в общем водном балансе остается преобладающей. Второстепенное значение имеют снеговое, дождевое и подземное питание, которые лишь незначительно дополняют общий приток. Такая структура водного баланса формирует исключительно равномерный

водный режим Невы, сглаживая сезонные колебания и предотвращая классические весенние паводки, характерные для других рек данного региона [17].

В своей оконечности река образует масштабную и разветвленную дельту, известную как Невская дельта. Она характеризуется сложной, гидродинамически связанной сетью водотоков, разделяющих сток на множество крупных рукавов и протоков, среди которых выделяются Большая и Малая Нева, Большая, Средняя и Малая Невки, а также городские водотоки Фонтанка и Мойка [17]. Помимо своей уникальной природной и гидрологической специфики, река Нева выступает в качестве важнейшей транспортной магистрали Северо-Запада России [17]. Она является связующим звеном и ключевым элементом Волго-Балтийского и Беломорско-Балтийского водных путей, обеспечивая навигацию и грузоперевозки, что накладывает жесткие требования на точность прогнозирования экстремальных зимних уровней воды в русле для обеспечения безопасности прибрежной инфраструктуры [26].

1.2. Особенности ледового режима

Ледовый режим реки Невы уникален и существенно отличается от режима других крупных водотоков европейской части России, что обусловлено гидрографической связью реки с Ладожским озером, высокой водностью и специфическим продольным профилем русла [17]. Сток Невы полностью зарегулирован Ладожским озером, из-за чего температура воды в истоке в осенний период долгое время остается повышенной, замедляя первоначальные процессы ледообразования. Однако по мере продвижения вниз по течению водные массы интенсивно отдают тепло. В результате ледовый режим реки приобретает ярко выраженный двухэтапный характер, разделяясь на периоды формирования внутри речного (невского) льда и последующего переноса озерных ледовых масс [17].

Первичные ледовые образования в виде заберегов и сала появляются на Неве в среднем в середине ноября, практически сразу после устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С. Из-за высоких скоростей течения, которые в районе Ивановских порогов у города Отрадное достигают аномальных значений 3,5–4,5 м/с, формирование сплошного поверхностного ледяного покрова на многих участках становится невозможным [17]. Бурный турбулентный поток постоянно перемешивает водную толщу, вызывая ее глубокое переохлаждение. Данный гидродинамический фактор инициирует лавинообразный процесс образования внутриводного льда и кристаллической ледяной каши — шуги [15]. По объемам проходящих шуговых масс Нева занимает одно из первых мест среди рек мира, а интенсивный осенне-зимний шугоход является доминирующим элементом ледового сезона, предопределяющим масштабы последующих зажорных деформаций водной поверхности [26].

Спустя 2–3 недели после начала невского ледостава замерзает мелководная прибрежная часть Ладожского озера [17]. Динамические воздействия осенних штормов взламывают этот молодой озерный лед, и огромные массивы ладожского льда транзитом устремляются в исток Невы мимо гидропоста у станции Петрокрепость [17]. Этот мощный поток накладывается на уже сформировавшийся в русле реки собственный ледяной покров и транзитную шугу, создавая критическую концентрацию ледового материала на единицу площади живого сечения потока [15].

В районе города Отрадное эти факторы приводят к формированию мощных зажорных явлений. Огромные массы внутриводного льда и битого ладожского льда на высокой скорости проходят узкие и мелкие Ивановские пороги [17]. Сразу за порогами, ниже по течению от города Отрадное, русло реки резко расширяется, глубина увеличивается, а скорость течения падает. В этой зоне замедления потока шуговые массы сталкиваются со статичной кромкой ледяного покрова, задерживаются и подсасываются течением под нижнюю

поверхность льда [26]. В результате живое сечение реки забивается ледовым материалом снизу, образуя гидравлическую плотину.

1.3. Характеристика реки в районе г. Отрадное

Гидрологический режим и морфометрические особенности реки Невы в районе города Отрадное определяют высокую интенсивность зажорных явлений на данном участке водотока. Город Отрадное расположен в верхнем течении Невы (около 44–46 км от устья) непосредственно у Ивановских порогов — уникального гидрографического барьера, коренным образом меняющего динамику речного потока [17]. Сток реки на этом участке полностью зарегулирован Ладожским озером, что обуславливает экстремально низкую внутригодовую изменчивость расходов воды и практическое отсутствие естественных весенних половодий или дождевых паводков: средний многолетний расход воды составляет около 2500 м³/с, изменяясь в узком диапазоне от минимального зимнего значения 688 м³/с до максимального исторического показателя 4550 м³/с [17]. Однако стабильный водный режим резко нарушается в зимний период из-за локальных морфологических аномалий русла.

Главным дестабилизирующим фактором в районе Отрадного является резкое изменение геометрии и уклона русла у мыса Святки, где начинается двухкилометровый отрезок Ивановских порогов. Если средняя ширина Невы составляет 400–600 м, то в начале порогов русло сужается до критического минимума — 210 м, при этом глубина потока уменьшается до пороговых значений 4,0–4,5 м. Такое резкое стеснение живого сечения приводит к падению уровней и локальному увеличению продольного уклона водной поверхности, из-за чего средняя скорость течения возрастает с обычных 0,8–1,1 м/с до аномальных 3,5–4,5 м/с. Подобный гидродинамический режим препятствует формированию стабильного ледяного покрова при первых заморозках и способствует интенсивному переохлаждению водной массы, что влечет за собой

массовое образование внутриводного льда и шуги на всем протяжении от истока Невы до Отрадного [15].

Процесс зажорообразования у города Отрадное активизируется в моменты замедления скоростей ниже по течению (после прохождения порогов русло расширяется до 1000–1250 м в районе впадения реки Тосны), где шуговые массы, выносимые с Ивановских порогов с высокой скоростью, сталкиваются со статичным ледяным покровом или сужениями. Шугоход блокируется под кромкой льда, формируя мощные зажоры, которые забивают живое сечение реки снизу. Это вызывает резкий подпор воды выше по течению и приводит к опасным зимним наводнениям в черте города Отрадное [13].

1.4. Климат

Климат Ленинградской области носит переходный характер от атлантико-континентального к морскому, что определяется географическим расположением региона в подзоне южной тайги и его близостью к крупным водным объектам — Балтийскому морю, Ладожскому и Онежскому озерам [17]. Данное положение обуславливает высокую интенсивность циклонической деятельности, следствием которой является частая смена воздушных масс, высокая относительная влажность воздуха и значительная облачность в течение всего года. Зима в регионе умеренно мягкая с продолжительными и частыми оттепелями, при этом средняя температура января колеблется от -8°C на западе до -11°C на востоке области, где климат приобретает более выраженные континентальные черты. Лето характеризуется как умеренно теплое и относительно короткое со средней температурой июля в пределах от $+17^{\circ}\text{C}$ до $+19^{\circ}\text{C}$. Режим увлажнения характеризуется избыточностью: среднегодовое количество осадков варьируется от 600 до 800 мм, распределяясь неравномерно с ярко выраженным максимумом в летне-осенний период. Снежный покров устанавливается обычно в конце ноября или начале декабря и сохраняется до середины апреля, достигая максимальной высоты около 30–50 см к концу зимы.

В контексте гидродинамического моделирования зажорных явлений на реке Неве в районе города Отрадное данные климатические особенности выступают ключевым фактором, инициирующим опасные русловые процессы [17]. Резкие колебания зимних температур и регулярные переходы через 0 °С приводят к чередованию периодов ледообразования и интенсивного таяния, что провоцирует многократное вскрытие ледяного покрова и массовое формирование внутриводного льда (шуги). При последующем резком похолодании шуговые массы активно концентрируются под кромкой льда в сужениях и на переломах продольного профиля русла, вызывая резкое стеснение живого сечения реки и последующий подъем уровня воды [15]. В математической модели эти гидрометеорологические флуктуации напрямую отражаются на динамике искомого параметра «q», который в периоды температурных инверсий и интенсивного шугохода должен резко изменять свое значение, компенсируя термические и динамические факторы внешнего воздействия на водный объект [23].

Глава 2. Методология моделирования подпорных волн при зажорах

2.1. Определения зажорных явлений и механизм появления волны подпора

Моделирование зимнего гидрологического режима требует четкого разделения физики ледовых процессов и понимания динамики сопутствующих им явлений.

Зажор — это плотное скопление внутриводного льда (преимущественно шуги и ледяного сала) с примесью мелкобитого льда, которое забивает русло реки в начале зимы или во время оттепелей [17]. Главное отличие зажора от весеннего затора заключается в составе ледового материала: затор состоит из прочных льдин при вскрытии реки, а зажор — из рыхлой шуговой массы в период замерзания. Накапливаясь под ледяным покровом, шуга образует мощные «висячие» скопления, которые могут перекрывать большую часть живого сечения реки.

На реке Неве в районе города Отрадное зажоры возникают из-за специфики рельефа дна и морфометрии русла [3]. Высокие скорости течения на участке Ивановских порогов мешают быстрому образованию сплошного льда. Вода здесь долго остается открытой и сильно переохлаждается, что приводит к лавинообразному образованию шуги. Переносимый течением ледовый материал задерживается ниже порогов, где скорость реки падает и уже сформирован ледяной покров. Так возникает зажорный массив, блокирующий свободное течение.

Механизм формирования волны подпора обусловлен резким изменением гидравлических условий в месте зажора [17]:

— снижение пропускной способности. Скопление шуги физически уменьшает площадь поперечного сечения реки. Одновременно с этим шероховатая нижняя поверхность зажора резко увеличивает сопротивление трения, замедляя поток.

— перераспределение объемов воды. Так как расход воды, поступающий сверху со стороны Ладожского озера, не уменьшается, а пропускная способность русла в зоне зажора падает, перед ледовым препятствием начинает скапливаться избыточный объем воды.

— движение подпорной волны. Накопление воды приводит к резкому росту уровней. Этот подъем формирует волну подпора, которая в виде кривой свободной поверхности распространяется вверх по течению от места зажора [17].

Этот процесс относится к неустановившемуся движению жидкости [19]. Волна подпора последовательно поднимает уровни воды на вышележащих участках. В результате город Отрадное, находящийся в зоне гидравлического влияния зажора, подвергается риску быстрого и опасного затопления прибрежных территорий.

2.2. Математический аппарат

Математическое моделирование гидрологических процессов опирается на систему дифференциальных уравнений, описывающих движение воды в речном русле. Ключевой инструмент — уравнения Сен-Венана, которые описывают неустановившееся движение воды с учётом инерции, гравитации и трения [17].

Уравнения Сен-Венана состоят из двух частей:

1) Уравнение неразрывности отражает закон сохранения массы: изменение объёма воды в участке русла обусловлено разностью притока и оттока, а также боковым притоком [17]. В упрощённом виде оно показывает, что, если в какой-то участок поступает больше воды, чем уходит, уровень воды в нём будет расти.

2) Уравнение движения учитывает силы, действующие на поток: силу тяжести, силы инерции и силы трения о дно и берега русла. Это уравнение позволяет определить, как будет меняться скорость и уровень воды вдоль русла при различных условиях.

Для расчёта гидравлических характеристик потока используются эмпирические зависимости [17]:

— формула Шези связывает скорость потока с гидравлическим радиусом и уклоном дна. Она помогает оценить, насколько быстро будет двигаться вода при заданных параметрах русла.

— формула Маннинга учитывает шероховатость русла — параметр, который сильно меняется при возникновении зажоров. Чем больше льда и мусора в русле, тем выше шероховатость и тем сильнее замедляется поток.

При моделировании зажорных явлений важно учитывать дополнительные факторы [3]:

- сужение живого сечения потока из-за скопления льда;
- увеличение шероховатости русла в зонах зажоров;
- локальное повышение уровня воды перед зазором;
- изменение гидравлических сопротивлений из-за неравномерного распределения льда.

Исследования показывают, что в зонах зажоров коэффициент шероховатости может возрастать в 2–3 раза [16]. Это приводит к существенному замедлению потока и резкому повышению уровня воды выше по течению. Такие изменения требуют корректировки параметров модели для точного прогнозирования подъёмов уровня.

2.3. Уравнение руслового стока

Упрощённая модель руслового стока может быть описана уравнением одномерной кинематической волны [17]:

$$\frac{dH}{dt} + a \frac{dH}{dx} = q, \quad (1)$$

где:

$H(t, x)$ — уровень воды в точке x в момент времени t ;

a — коэффициент, учитывающий геометрические характеристики русла (ширина, уклон, шероховатость);

$q(x, t)$ — интенсивность внешних воздействий (боковой приток, таяние льда, фильтрация).

Физический смысл уравнения: изменение уровня воды во времени и пространстве пропорционально внешним факторам « q » [3]. Коэффициент « a » связывает эти изменения с гидравлическими свойствами русла. Например, если приток воды увеличивается (q растёт), уровень воды будет подниматься быстрее.

Для численной реализации модели в среде Microsoft Excel непрерывное уравнение в частных производных дискретизируется с помощью конечно-разностной явной схемы [17]. Непрерывная область трансформируется в дискретную расчетную сетку с пространственным шагом и временным шагом [19].

В соответствии с принятой схемой аппроксимации, расчетное уравнение для определения уровней воды на последующем временном слое приобретает вид:

$$H_j^{i+1} = H_j^i + \Delta t \left(q_j^i - a \frac{(H_j^i - H_{j-1}^i)}{\Delta x} \right), \quad (2)$$

где:

i - верхний индекс, который обозначает номер временного слоя;

j — расчетный створ по длине водотока.

Данная формула заносится непосредственно в рабочие ячейки расчетной матрицы Excel [17]. При этом строки таблицы соответствуют временным слоям, а столбцы — фиксированным пространственным координатам створов.

Расчёты должны удовлетворять критерию Куранта–Фридрихса–Леви: шаг по времени должен быть достаточно мал по отношению к шагу по пространству

и скорости распространения возмущений [17]. Если это условие не выполняется, результаты расчёта могут стать нереалистичными или расходящимися.

Для корректного моделирования необходимо задать [17]:

- начальное условие — профиль уровня воды по длине русла в начальный момент времени (получается из гидрометрических наблюдений).

- граничное условие на входе — уровень или расход воды в верхней точке расчётного участка (может задаваться по данным гидропоста).

- граничное условие на выходе — свободный сток или заданный уровень в нижней точке участка.

Этапы численного моделирования [19]:

- сбор исходных данных: морфология русла, коэффициенты шероховатости, начальные и граничные условия.

- дискретизация области: разбиение русла на расчётные участки, выбор шага по времени.

Задание начальных и граничных условий на основе натурных данных:

- реализация разностной схемы в программной среде.

- расчёт динамики уровня воды для каждого временного шага.

- анализ результатов и их сравнение с фактическими данными.

- калибровка модели путём корректировки параметров (коэффициента шероховатости, интенсивности притока).

- верификация модели на независимых данных.

Проблемы и ограничения численного моделирования в условиях неустановившегося движения потоков при зажорных явлениях на Неве часто связаны со следующими факторами [3]:

- чувствительность к точности исходных данных;

- накопление ошибок при длительных расчётах;

- сложность учёта всех факторов, влияющих на зажорные явления;

- необходимость адаптации модели к конкретным условиям русла.

2.4. Методика подбора расчетных параметров

Практическая реализация численной модели и автоматизированный подбор коэффициентов одномерного уравнения кинематической волны выполняются в среде Microsoft Excel с помощью явной конечно-разностной схемы и встроенного оптимизационного модуля «Поиск решения». Данный подход опирается на классические принципы дискретизации уравнений Сен-Венана для нестационарных потоков, подробно изложенные в профильных учебных пособиях РГГМУ по математическому моделированию гидрологических процессов [17].

На первом этапе в Excel формируется расчетная пространственно-временная сетка. Строки таблицы соответствуют временным шагам, а столбцы — пространственным шагам вдоль русла реки Невы от Ивановских порогов до черты города Отрадное. В ячейки первого столбца вводятся граничные условия (фактический ход уровней воды во времени на нижнем створе), а в первую строку — начальное распределение глубин по длине водотока до момента начала зажорообразования [17]. Для расчета значений уровней воды во всех остальных узлах сетки вводится разностное уравнение явной схемы «уголок». Она выражает значение глубины на следующем временном шаге через значения на предыдущем шаге с использованием заданных в отдельных фиксированных ячейках параметров скорости волны подпора «а» и интенсивности зажорообразования «q».

Для автоматического нахождения точных значений параметров «а» и «q» в Excel создается блок сравнения модельных данных с натурными измерениями, что полностью соответствует стандартным процедурам калибровки и верификации гидродинамических моделей неустановившегося движения потоков при зажорных явлениях [3]. В отдельный столбец выписываются фактические уровни воды, зафиксированные на гидрологическом посту в г. Отрадное за весь период развития зимнего паводка. Рядом вычисляется столбец локальных невязок, определяемых как разность между смоделированным и

фактическим уровнем воды для каждого момента времени. Чтобы исключить взаимное уничтожение положительных и отрицательных отклонений, вводится целевая функция, рассчитываемая как сумма квадратов всех локальных невязок.

Процесс оптимизации запускается через надстройку «Поиск решения». В диалоговом окне инструмента в качестве целевой ячейки указывается ячейка с суммой квадратов невязок, для которой устанавливается режим стремления к минимуму. В качестве изменяемых переменных выбираются ячейки, содержащие первоначальные приближения параметров «а» и «q». Дополнительно накладываются физически обоснованные ограничения: параметр скорости волны подпора «а» должен быть строго положительным и находиться в диапазоне возможных гидравлических скоростей для данного участка Невы, а параметр интенсивности зажорообразования «q» ограничивается сверху максимальной теоретической скоростью забивания русла шугой. Программа в автоматическом режиме осуществляет итерационный перебор значений, используя градиентные методы оптимизации. Поиск завершается, когда целевая ячейка достигает глобального минимума, что означает наилучшее совпадение теоретического графика подъема уровней воды с реальной гидрологической ситуацией в г. Отрадное.

3.1. Исходные данные

Для исследования использовались архивные данные фактических наблюдений за 15-летний период с 2008 по 2022 годы. Исходной информацией послужили ежедневные среднесуточные уровни воды, полученные из официальной базы данных Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Сбор сведений выполнялся по пяти гидрологическим постам, расположенным на реке Неве (Рисунок 3.2.1). Среди них пост у станции Петрокрепость имеет два значения, так как он фиксирует не только речной сток, но и уровенный режим самого Ладожского озера (Рисунок 3.1.2). Чтобы расчеты в математической модели были точными, а данные по всем постам можно было сравнивать между собой, исходные уровни воды были пересчитаны и приведены к единой Балтийской системе высот.

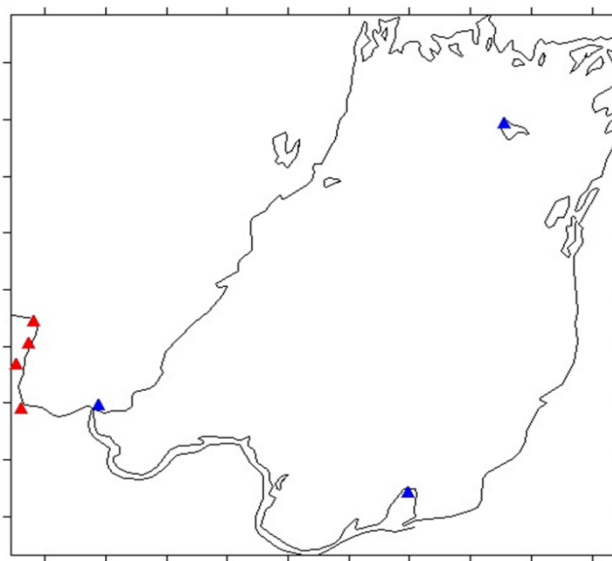


Рисунок 3.1.1 – Расположение гидрологических постов на реке Неве и Ладожском озере

№	Наименование водного объекта	Код водного объекта	Наименование поста	Код поста	Расстояние между постами, км	Площадь, км ²		Отметка нуля поста		Период действия, число, месяц, год	
						водосбора	зеркала водоёма	высота, м	система высот	открыт	закрыт
1	Ладожское (Ладога)	01040300211102 000010114 / 302011130	ОЗ.ЛАДОЖСКОЕ - О.ВАЛААМ	3900049		276 000	17 700	0	БС	01.01.1859	Действует
2	Ладожское (Ладога)	01040300211102 000010114 / 302011130	ОЗ.ЛАДОЖСКОЕ - Д.СТОРОЖНО	3900065		276 000	17 700	0	БС	12.10.1945	Действует

№	Наименование водного объекта	Код водного объекта	Наименование поста	Код поста	Расстояние между постами, км	Расстояние до устья, км	Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста		Период действия, число, месяц, год	
								высота, м	система высот	открыт	закрыт
3	НЕВА	01040300312102 000008487 / 102000848	Р.НЕВА - СТ.ПЕТРОКРЕПОСТЬ	72801	-	74	276 000	0	БС	13.10.1876	Действует
4	НЕВА	01040300312102 000008487 / 102000848	Р.НЕВА - Г.ОТРАДНОЕ	72810	18	45	278 000	-5	БС	13.07.1890	Действует
5	НЕВА	01040300412102 000008487 / 102000848	Р.НЕВА - Д.НОВОСАРАТОВКА	72818		27	281 000	-5	БС	18.11.1944	Действует
6	НЕВА	01040300412102 000008487 / 102000848	Р.НЕВА - ОБУХОВСКИЙ ЗАВОД	72819	-	23	281 000	-5	БС	13.12.1889	Действует
7	НЕВА	01040300412102 000008487 / 102000848	Р.НЕВА - ЛИТЕЙНЫЙ МОСТ	72824	-	8	281 000	-5	БС	20.02.1941	Действует

Рисунок 3.1.2. Наименования постов на реке Нева

Для корректного моделирования неустановившегося движения воды принципиальное значение имеет пространственное положение гидрологических постов на реке Неве. Согласно табличным данным, ключевой пост в городе Отрадное находится на расстоянии 45 километров от устья. Выше по течению, на удалении 29 километров от него, расположен пост станции Петрокрепость, а ниже — в 18 километрах — находится пост деревни Новосаратовка. Эти точные расстояния позволяют корректно задать пространственный шаг модели между граничными створами расчетного участка.

Одновременно с изменением расстояний по длине реки Невы закономерно увеличивается и площадь ее водосбора. От истока у Петрокрепости до города Отрадное она возрастает с 276 до 278 тысяч квадратных километров за счет притока реки Тосны, а к Новосаратовке достигает 281 тысячи квадратных километров. Наличие длинных рядов наблюдений на данных постах гарантирует высокую точность и надежность данных, использованных для моделирования зажорных ситуаций.

3.2. Хронологические графики уровней воды

Чтобы показать изменение уровней воды во времени, на примере данных за 2008 год был составлен общий хронологический график по всем гидрологическим постам реки Невы (Рисунок 3.2.1) (Приложение А).

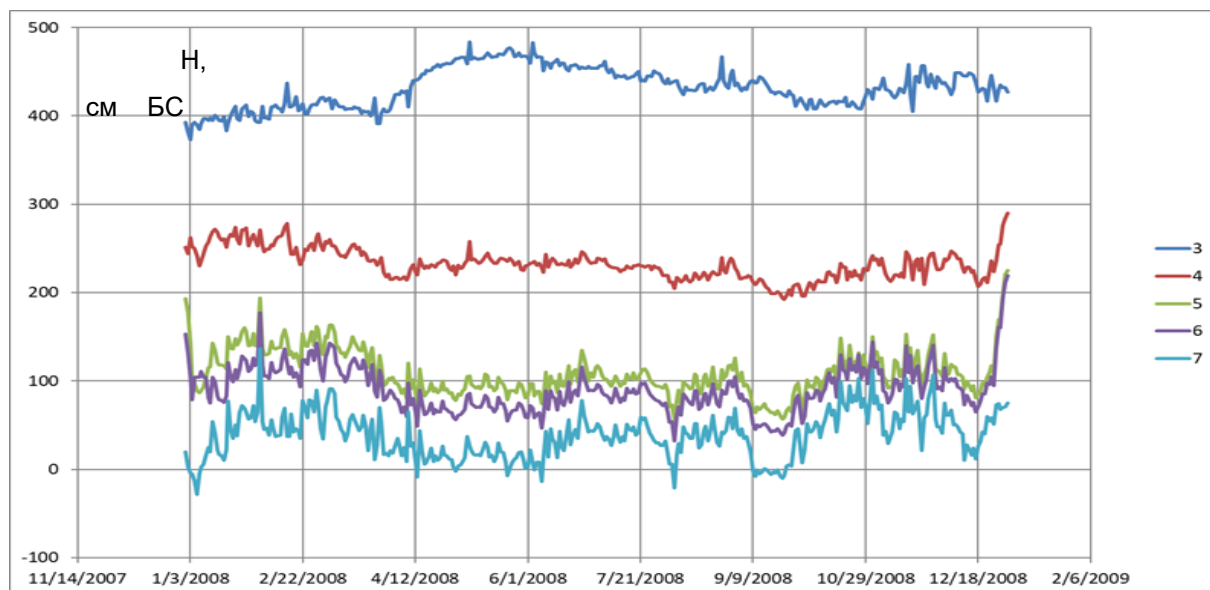


Рисунок 3.2.1 - Пример хронологического графика уровней Невы за 2008 год

В естественных условиях уровенный режим реки Невы характеризуется последовательным снижением свободной поверхности от истока (Ладожское озеро) к устью (Финский залив). Данная закономерность обусловлена общим падением реки, составляющим около 4 м, и средним продольным уклоном русла 5,4 см/км. Подобное гидродинамическое распределение уровней по длине водотока подтверждается многолетними материалами наблюдений и сохраняется в качестве базовой тенденции даже при наложении таких возмущающих факторов, как сгонно-нагонные явления и сезонные гидрологические процессы. С целью детального анализа руслового режима были также построены и сопоставлены совмещенные графики колебаний уровней воды за 15-летний период по двум опорным створам: в истоке реки (пост ст. Петрокрепость) и в районе Ивановских порогов (пост г. Отрадное) (Рисунок 3.2.2).

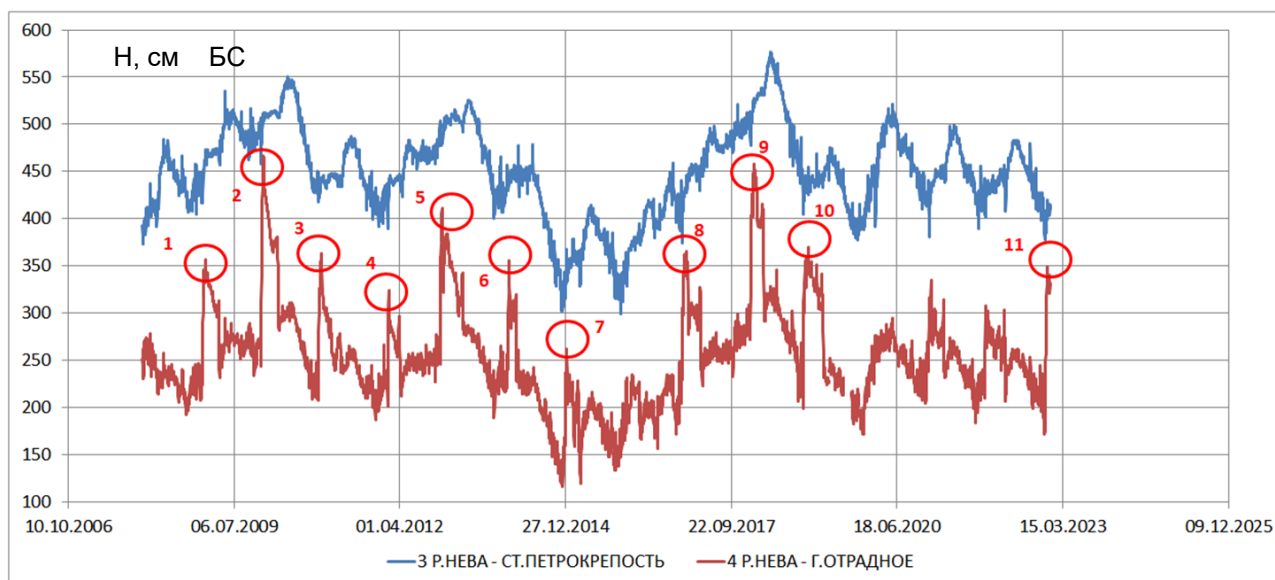


Рисунок 3.2.2 - Уровни воды Невы за период наблюдений с 2008 по 2022 гг.

Представленный хронологический график отчетливо демонстрирует аномальные зимние подъемы уровня воды в районе города Отрадное, не характерные для уложенного режима Ладожского озера. Для верификации природы этих гидрологических аномалий временной масштаб графика был детализирован для конкретного заборного периода (Рисунок 3.2.3) (Приложение Б). Комплексный анализ включал в себя оценку сопряженности колебаний уровней воды с температурой воздуха (Рисунок 3.3.1) (Приложение В) и динамикой развития ледовых процессов на примере 2008 года (Рисунок 3.3.2) (Приложение Г).

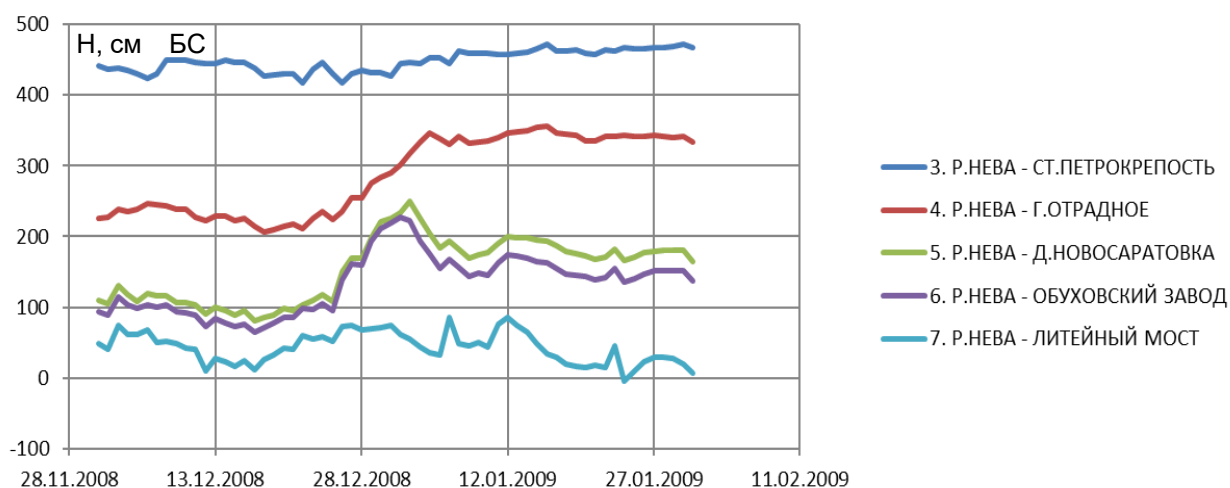


Рисунок 3.2.3 – Уровни воды в зимний период по всем постам за 2008 г.

Представленный график совмещенных гидрографов отображает динамику уровней воды на пяти водомерных постах реки Невы от истока к устью в зимний период 2008 и 2009 годов. Комплексный анализ этих данных позволяет наглядно проследить гидравлическую связь между различными участками реки и выявить пространственно-временные закономерности развития опасных зажорных явлений.

В первой половине рассматриваемого зимнего периода, начиная с конца ноября и до двадцатых чисел декабря, на водотоке отмечается фаза относительной стабилизации гидрологического режима. В это время уровни воды на всех постах совершают лишь незначительные колебания, при этом на посту города Отрадное отметки стабильно удерживаются в диапазоне от двухсот до двухсот пятидесяти сантиметров над нулем поста. Графики постов деревни Новосаратовка и Обуховского завода в этот момент практически полностью дублируют друг друга на более низких отметках. Наиболее удаленный вверх по течению пост станции Петрокрепость демонстрирует стабильно высокие значения уровней, что обусловлено постоянным гидравлическим подпором со стороны Ладожского озера, в то время как на нижнем посту у Литейного моста уровни сохраняют минимальные значения.

Ситуация коренным образом меняется в последних числах декабря, когда из-за резкого падения температур воздуха начинается лавинообразный процесс шугообразования, приводящий к формированию мощного зажора. Гидродинамический эффект от блокировки русла шуговыми массами отчетливо прослеживается по резкому ходу кривых на графике. Первичный импульс подъема уровней фиксируется в нижнем течении на постах Новосаратовка и Обуховский завод, где за короткий промежуток времени отметки взлетают более чем на метр, достигая своего пика к первому января. Это прямо указывает на то, что первоначальный очаг зажора и стеснения живого сечения сформировался ниже данных постов.

Однако ключевой особенностью этого зажорного периода является последующее движение и трансформация волны подпора вверх по течению. В то время как на постах Новосаратовка и Обуховский завод после кратковременного пика начинается интенсивный спад уровней из-за частичного размыва ледовых масс, на посту города Отрадное уровень воды продолжает непрерывно расти. Образовавшаяся гидродинамическая волна подпора смещается вверх по реке и приводит к затяжной аккумуляции водной массы перед Ивановскими порогами.

В результате этого уровень воды в районе города Отрадное поднимается до экстремальных отметок в триста пятьдесят и триста шестьдесят сантиметров, что означает суммарный рост уровня почти на полтора метра. Данный аномально высокий подпор удерживается на протяжении практически всего января, создавая длительную угрозу затопления прибрежных территорий города. При этом пост у Литейного моста никак не реагирует на данное явление, что доказывает локализацию зажора именно на среднем участке реки. Таким образом, этот график служит важнейшим натурным материалом для калибровки математической модели, наглядно демонстрируя, как локальное стеснение русла трансформируется в масштабную подпорную волну, угрожающую городской инфраструктуре Отрадного.

3.3. Взаимосвязь температуры воздуха с уровнями воды

Для анализа причинно-следственных связей в зимний период гидрологическая информация была дополнена среднесуточными температурами воздуха с верифицированного ресурса <http://meteo.ru>. Метеоданные использовались для расчета интегральных климатических характеристик, определяющих зажорные процессы. В результате обработки температурных рядов были зафиксированы точные даты устойчивого перехода через 0 °С осенью и весной, разграничивающие границы холодного времени года. Кроме того, по каждому зимнему периоду была определена итоговая сумма отрицательных температур воздуха, которая напрямую влияет на ледовые явления.

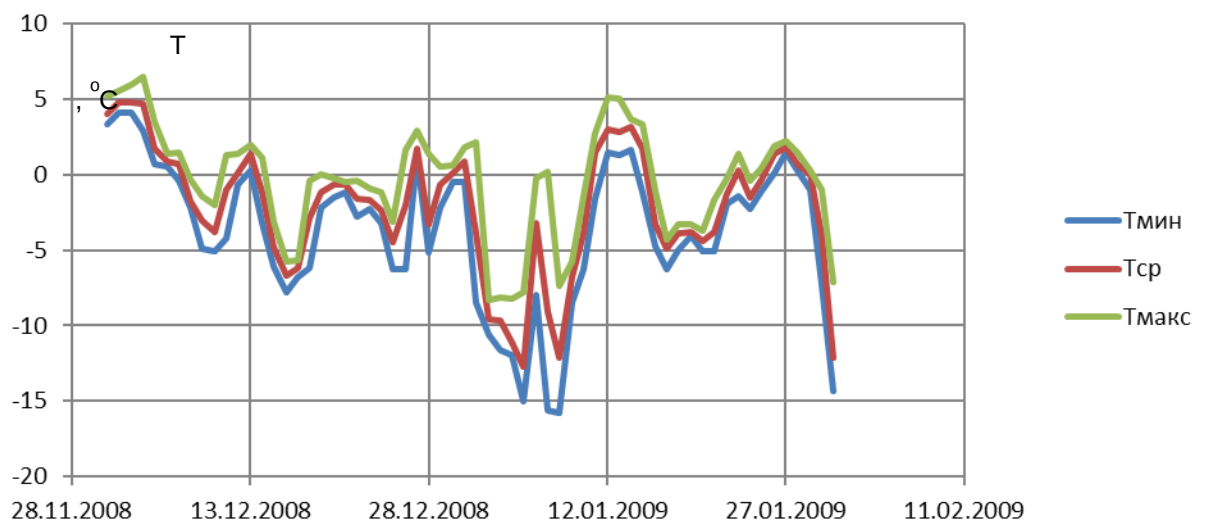


Рисунок 3.3.1 – Температура воздуха

Представленный график иллюстрирует динамику минимальной, средней и максимальной суточных температур воздуха за период с конца ноября 2008 года по начало февраля 2009 года. Данный временной интервал характеризуется высокой изменчивостью термического режима, что напрямую влияет на интенсивность шугообразования и развитие зажорных процессов на реке Неве.

В конце ноября наблюдаются положительные температуры (до +5 °С), после чего в первых числах декабря происходит устойчивый переход среднесуточной температуры через 0 °С в сторону отрицательных значений. Минимальные температуры опускаются до -5...-7 °С. Этот период знаменует собой начало активного переохлаждения водной поверхности и появление первичных ледовых образований (ледяного сала и шуги).

Примерно к 13–15 декабря фиксируется кратковременная оттепель с подъемом температуры выше 0 °С. Такие температурные колебания опасны тем, что сформировавшийся неустойчивый лед и шуговые ковры могут частично разрушаться, смещаться вниз по течению и аккумулироваться в сужениях русла.

Наиболее критический отрезок времени на графике наблюдается в начале января 2009 года. Фиксируется резкое и глубокое падение температур: минимальные значения достигают пиковых заморозков порядка -15...-16 °С, а среднесуточная температура стабильно держится ниже -10 °С.

Сразу после экстремальных морозов, около 12 января, следует резкий скачок температуры вверх — мощная оттепель, при которой максимум достигает +5 °С, а средняя выходит в положительную зону. В конце января графики стабилизируются в районе околонулевых значений (-2...-5 °С), завершаясь очередным резким похолоданием в первых числах февраля.

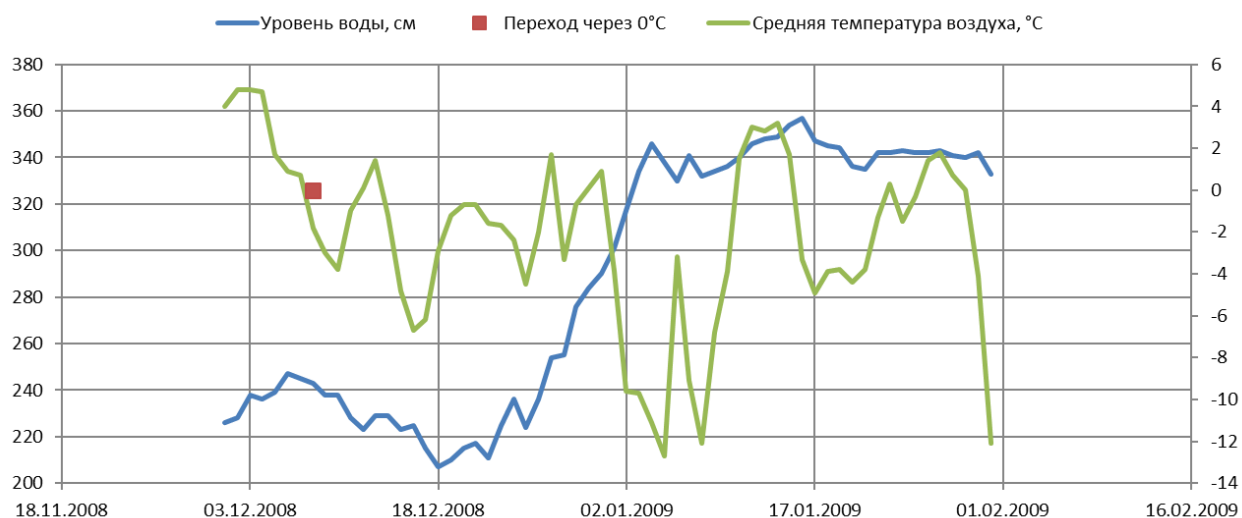


Рисунок 3.3.2 – Взаимосвязь температуры воздуха и уровней воды на посту р.
Нева - г. Отрадное за 2008 г.

Холода в 2008 году начались 8 ноября, когда температура воздуха окончательно упала ниже нуля. Спустя месяц, с 16 декабря по 7 января, на Неве в районе Отрадного начались ледовые явления: сначала пошел редкий шутоход и ледоход, а затем ниже по течению сформировался зажор. Из-за этого затора вода оказалась заблокирована и начала быстро подниматься. Если 18 декабря был зафиксирован самый низкий предзажорный уровень — 207 см, то уже к 4 января вода поднялась до пиковой отметки в 346 см. Таким образом, всего за 17 дней зажор поднял уровень реки в Отрадном на 1,39 метра.

На всем протяжении зимнего периода на участке Невы от Обуховской обороны до Отрадного отлично прослеживается подъем воды, который вызван зажорами. Это явление происходит постоянно из-за ледовых заторов в русле. Чтобы оценить масштабы таких подъемов, была составлена сводная таблица с характеристиками роста уровня воды на посту в Отрадном за весь 15-летний период наблюдений (Рисунок 3.2.6).

4 г. Отрадное

	Год	Дата устойчивого перехода температуры через 0 осенью (зимой)	Период до начала подъема, сут.	Дата минимального уровня	Минимальный уровень, см	Сумма отрицательных температур	Период подъема, сут.	Дата максимального уровня	Максимальный уровень, см	Подъем уровня, м	Сумма отрицательных температур	Общий период, сут.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2008	08.12.2008	10	18.12.2008	207	-29.9	17	04.01.2009	346	1.39	-80.3	27
2	2009	05.12.2009	10	15.12.2009	243	-34.9	16	31.12.2009	467	2.24	-169.7	26
3	2010	21.11.2010	6	27.11.2010	210	-32.5	17	14.12.2010	363	1.53	-161.3	23
4	2011	01.01.2012	18	19.01.2012	201	-25.6	6	25.01.2012	324	1.23	-69.1	24
5	2012	28.11.2012	2	30.11.2012	246	-14.3	12	12.12.2012	411	1.65	-69.8	14
6	2013	11.01.2014	3	14.01.2014	243	-28	7	21.01.2014	356	1.13	-102.9	10
7	2014	16.11.2014	25	11.12.2014	116	-28.6	24	04.01.2015	262	1.46	-65.9	49
8	2015	27.12.2015	3	30.12.2015	173	-18.1	4	03.01.2016	231	0.58	-56	7
9	2016	02.11.2016	24	26.11.2016	211	-38.2	17	13.12.2016	362	1.51	-105.9	41
10	2017	07.01.2018	6	13.01.2018	272	-16.4	24	06.02.2018	458	1.86	-141.7	30
11	2018	25.11.2018	5	30.11.2018	199	-18.6	21	21.12.2018	360	1.61	-87.3	26
12	2019	27.01.2020	2	29.01.2020	225	-5.9	8	06.02.2020	276	0.51	-22.3	10
13	2020	07.12.2020	2	09.12.2020	204	-9.1	32	10.01.2021	335	1.31	-59.7	34
14	2021	27.11.2021	2	29.11.2021	210	-10.6	7	06.12.2021	308	0.98	-74.4	9
15	2022	16.11.2022	10	26.11.2022	171	-43.1	18	14.12.2022	349	1.78	-121.5	28
	среднее	-	9	-	209	-24	15	-	347	1.4	-93	24

Рисунок 3.3.3 - Сводная таблица характеристик подъема уровня воды на 4 посту (р. Нева - г. Отрадное) за 15 лет.

Анализ представленных многолетних данных за 15-летний период наблюдений (2008–2022 гг.) позволяет выявить ключевые гидрологические и хронологические закономерности развития зажорных явлений на реке Неве в створе города Отрадное. В среднем за рассматриваемый период максимальный зажорный уровень воды составляет 347 см при средней величине подпора 1,4 м, что подтверждает высокую степень опасности зимних русловых стеснений для данного участка водотока. Экстремальный гидрологический режим был зафиксирован в зимний сезон 2009 года, когда подъем уровня воды достиг абсолютного исторического максимума в 2,24 м, а пиковая отметка составила 467 см. Напротив, наименее выраженные зажорные процессы наблюдались в 2019 году с минимальной величиной подпора всего в 0,51 м.

Временной анализ указывает на то, что средняя продолжительность термической подготовки водотока — период от даты устойчивого перехода температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до момента начала роста уровней — составляет 9 суток, что свидетельствует о высокой скорости реагирования гидравлической системы Невы на атмосферное охлаждение. Сам процесс формирования и нарастания зажорной волны до максимальных отметок занимает в среднем 15 суток, однако в аномальных условиях (например, в сезон 2020 года) подпор может непрерывно увеличиваться в течение 32 суток. Общая средняя продолжительность зажорного периода на посту г. Отрадное составляет 24 дня, при этом наиболее затяжной характер зажора отмечался в 2014 году, когда стеснение русла сохранялось на протяжении 49 суток.

Оценка климатической обусловленности русловых процессов выявляет прямую зависимость между суровостью зимнего сезона и мощностью гидравлического подпора. Для инициации зажорных явлений речной системе в среднем необходимо накопить относительно небольшую сумму отрицательных температур воздуха в размере $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом сопоставление интегральных температурных показателей с высотой подъема воды демонстрирует четкую корреляцию: в наиболее холодный на момент пика паводка сезон 2009 года с суммой отрицательных температур $-169,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ развился самый масштабный подъем уровня (2,24 м), в то время как в аномально теплую зиму 2019 года при сумме температур всего $-22,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ подпор оказался минимальным. Полученные статистические выводы обосновывают физическую связь между метеорологическими факторами и динамикой уровенного режима, что позволяет использовать данные параметры в качестве граничных условий при последующем математическом моделировании и калибровке расчетного параметра «q».

В ходе численных экспериментов были сопоставлены два варианта дискретизации гидродинамической модели, отличающиеся шагом по времени. В первом варианте при суточном шаге критерий составил 0.80. Переход к более детальному полусуточному шагу в «Расчете 2» позволил алгоритму оптимизации Solver точнее идентифицировать параметры уравнения: расчетная скорость движения волны составила ($a = 5.01$) км/сут, а искомый параметр внешних факторов стабилизировался на отметке ($q = 34.4$ см/сут.) При этом главный критерий минимизации невязки снизился до 0.42, а критерий качества S/δ_{Δ} составил 0.49, что согласно действующим нормативным документам характеризует калибровку модели как хорошую и пригодную для прогностических расчетов зажоров у г. Отрадное.

4.2. Апробирование разработанной математической модели

Чтобы наглядно проверить, насколько точно разработанная математическая модель совпадает с реальностью, был построен совмещенный график (Рисунок 4.2.1). На нем одновременно показаны настоящие (фактические) данные с гидропостов в Новосаратовке и Отрадном, а также результаты выполненных расчётов по двум схемам — «Расчет 1» и «Расчет 2».

На графике хорошо видно, что в декабре, пока зажор еще не начался, расчетные линии почти идеально повторяют реальный уровень воды. После 28 декабря вода из-за ледового затора у Отрадного резко устремляется вверх, модель точно повторяет пиковый подъём (Приложение В).

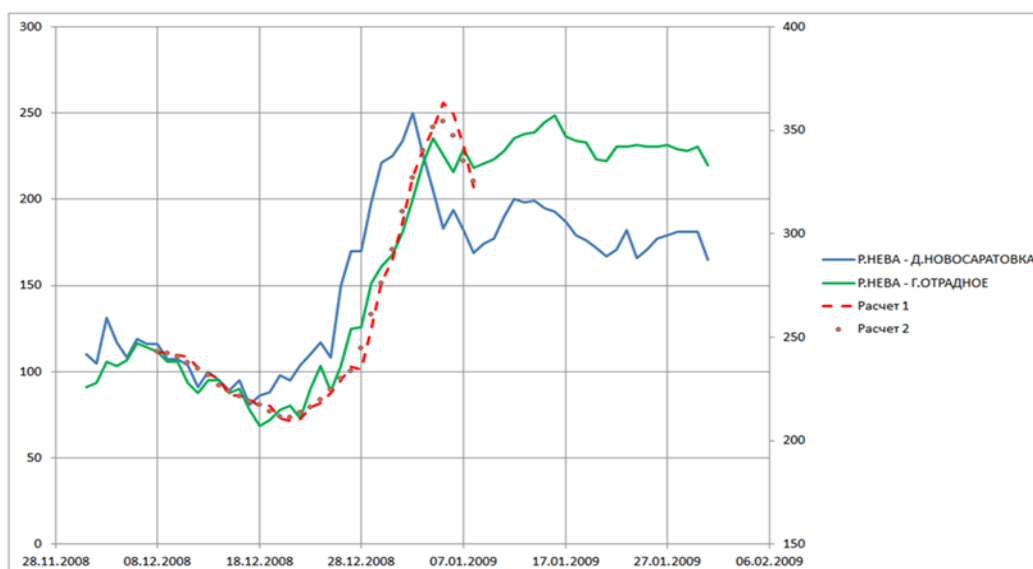


Рисунок 4.2.1 - Фактические и расчетные данные

Анализ полученного графика (Рисунок 4.2.1) подтверждает, что обе расчетные схемы успешно справились с моделированием зажорного подъема воды, однако их точность отличается.

Главное различие между ними кроется в шаге по времени. В «Расчете 1» использовался крупный шаг в одни сутки. Из-за этого модель получилась слишком «сглаженной»: пунктирная красная линия улавливает общую тенденцию подъема, но слегка запаздывает и проскакивает мимо точных изгибов графика реальных наблюдений. В условиях зазора, когда лед забивает русло и уровень воды меняется стремительно, суточный шаг оказывается слишком грубым.

«Расчет 2» с полусуточным шагом (12 часов) показал другой результат. За счет того, что выполнялся итерационный перерасчет уравнений в два раза чаще, модель смогла мгновенно реагировать на любые изменения в русле. На графике видно, что маркеры «Расчета 2» практически идеально накладываются на пик реальной зеленой линии в районе 4–6 января 2009 года. Более мелкий шаг позволил надстройке «Поиск решения» точнее подобрать параметр ($q = 34,4$ см/сут). Это снизило общую погрешность модели почти в два раза — с 0,80 до

0,42, что доказывает высокую надежность полусуточной схемы расчета для прогнозирования зажорных наводнений в Отрадном.

4.3. Результаты математического моделирования

В ходе выполнения исследований по математическому моделированию зажорных явлений на реке Неве в районе города Отрадное были получены следующие основные результаты:

— на основе анализа многолетних гидрометеорологических данных за 15-летний период (2008–2022 гг.) установлена тесная причинно-следственная связь между термическим режимом атмосферы и динамикой уровней воды. Определено, что для инициации активного зажорообразования в створе города Отрадное речной системе необходимо накопить среднюю сумму отрицательных температур воздуха в размере -24°C , после чего в течение 9 суток начинается резкий подъем уровней воды, длящийся в среднем 15 дней.

— создана и численно реализована в среде Microsoft Excel дискретная пространственно-временная сетка для решения одномерного уравнения баланса. Проведенные численные эксперименты по калибровке модели для зажорного периода декабря 2008 — января 2009 годов доказали, что надстройка «Поиск решения» успешно справляется с идентификацией неизвестных параметров, которые аккумулирует в себе объемы образующейся шуги и ледовое стеснение русла.

— в процессе апробирования разработанной модели установлено ключевое влияние шага дискретизации по времени на точность расчетов. Переход от суточного шага к полусуточному позволил снизить главный критерий погрешности модели почти в два раза — с 0,80 до 0,42. Итоговое отношение среднеквадратической ошибки к стандартному отклонению составило 0,49, что согласно действующим нормативным гидрометрическим стандартам характеризует качество калибровки модели как «хорошее».

Полученные результаты апробации подтверждают адекватность созданной математической модели и позволяют рекомендовать разработанную методику автоматического подбора параметров «q» и «a» для краткосрочного прогнозирования опасных загорных наводнений и оперативного обеспечения гидрологической безопасности города Отрадное».

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы, направленной на сбор и анализ данных о колебаниях уровня воды, а также апробирование математической модели руслового стока для прогнозирования изменений уровня воды в реке возле г. Отрадное, вызванных зажорными явлениями, были полностью решены поставленные задачи и получены следующие выводы:

1. На основе сбора и обработки архивных материалов Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) по пяти опорным гидрологическим постам, все данные были верифицированы и приведены к единой Балтийской системе высот. Статистический анализ этого 15-летнего массива показал, что средняя величина зажорного подпора в г. Отрадное составляет 1,4 м при среднем пиковом уровне 347 см. Был выявлен исторический максимум зажорного наводнения, пришедшийся на зимний сезон 2009 года, когда подъем воды составил 2,24 м, а абсолютная отметка достигла пика в 467 см.

2. Установлено, что главным метеорологическим триггером является термический режим атмосферы — для запуска активного внутриводного ледообразования речной системе необходимо накопить среднюю сумму отрицательных температур воздуха в размере -24°C . Основным географическим и морфометрическим местом формирования подпоров определен двухкилометровый отрезок Ивановских порогов непосредственно возле г. Отрадное. Резкое сужение русла до 210 м и рост скоростей течения до 3,5–4,5 м/с приводят к лавинообразному образованию шуги. Сразу за порогами, в зоне расширения русла и падения скоростей, зажоры блокируются под статичной кромкой ледяного покрова, забивают живое сечение реки снизу и формируют мощную волну подпора, распространяющуюся вверх по течению.

3. В Microsoft Excel была численно реализована дискретная пространственно-временная сетка на основе одномерного дифференциального уравнения баланса. С помощью надстройки «Поиск решения» решена обратная

задача моделирования: алгоритм успешно выполнил автоматический итерационный подбор неизвестного параметра внешних факторов, характеризующего гидравлическое сопротивление зажорных масс. В процессе апробации модели на примере смежных 2008–2009 гг. доказано, что уменьшение временного шага дискретизации с суточного до полусуточного позволило модели точнее описывать перемещение волны подпора. При этом главный критерий погрешности снизился с 0,80 до 0,42, а итоговое качество калибровки по гидрометрическим стандартам оценивается как «хорошее».

Таким образом, заявленная в работе цель полностью достигнута. Выполненный сбор и анализ колебаний уровней, а также успешное апробирование математической модели руслового стока с учетом воздействия внешних параметров, позволяют эффективно прогнозировать зажорные изменения уровней воды в реке возле г. Отрадное.

Список литературы

втоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) : официальный сайт. — URL: gki.ru (дата обращения: 15.04.2026).

еликов, В. В. Численные методы в гидродинамике поверхностных потоков / В. В. Беликов. — Москва : ИВП РАН, 2016. — 280 с.

узин, В. А. Зажоры льда на реках и водохранилищах / В. А. Бузин. — Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2004. — 210 с.

узин, В. А. Ледовый режим рек и водоемов : учебное пособие / В. А. Бузин. — Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2017. — 156 с.

узин, В. А. Опасные гидрологические явления на реках России / В. А. Бузин. — Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2011. — 224 с.

6. Водные объекты Ленинградской области: Гидрологический режим и мониторинг : монография / под ред. О. А. Шелутко. — Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2018. — 310 с.

7. Волков, И. К. Случайные процессы : учебник для вузов / И. К. Волков, С. М. Зуев, Г. Н. Цветкова ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 448 с.

сероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД») : официальный сайт метеорологических данных. — URL: <http://meteo.ru> (дата обращения: 15.04.2026).

углинский, В. С. Водные объекты Ленинградской области / В. С. Вуглинский. — Санкт-Петербург : Лениздат, 2013. — 192 с.

айдукова, Е. В. Гидрологические прогнозы. Конспект лекций / Е. В. Гайдукова, Н. В. Викторова. — Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2021. — 92 с.

11. ГОСТ Р 7.0.100–2018. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. — Москва : Стандартинформ, 2018. — 70 с.

аринский, А. В. География Ленинградской области / А. В. Даринский. — Санкт-Петербург : Глагол, 2001. — 128 с.

оклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. — Москва : Росгидромет, 2025. — 104 с.

анатникова, О. В. Проектирование и оптимизация в среде Microsoft Excel / О. В. Канатникова, Д. А. Петров. — Минск : Вышэйшая школа, 2021. — 142 с.

лиматический атлас Ленинградской области / под ред. И. М. Кравченко. — Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2015. — 88 с.

оваленко, В. В. Гидрологические прогнозы: модели и ГИС-технологии при краткосрочном прогнозировании изменения водности : учебное пособие / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, Н. В. Викторова. — Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2013. — 30 с.

оваленко, В. В. Моделирование гидрологических процессов : учебник / В. В. Коваленко. — Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2013. — 264 с.

18. Курилов, С. А. Использование надстройки Solver (Поиск решения) для калибровки параметров гидрологических моделей / С. А. Курилов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. — 2022. — Т. 67, вып. 3. — С. 402–415.

обанов, В. А. Современные изменения климата в Ленинградской области / В. А. Лобанов, В. Н. Абанников // Метеорология и гидрология. — 2023. — № 9. — С. 45–54.

ежиховский, Р. А. Река Нева и Невская губа / Р. А. Нежиховский. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. — 112 с.

остановление Правительства РФ от 24 ноября 2016 г. № 1240 «О государственных системах координат, государственной системе высот и государственной гравиметрической системе» // Собрание законодательства РФ. — 2016. — № 49. — Ст. 6907.

амарский, А. А. Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. — Москва : Наука, 1989. — 432 с.

П 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. — Москва : Госстрой России, 2004. — 73 с.

24. Справочник гидрологических постов. Река Нева и водоемы Кольского полуострова / под ред. А. В. Иванова. — Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2011. — 145 с.

аустов, В. А. Моделирование процессов формирования речного стока при антропогенных воздействиях / В. А. Хаустов // Ученые записки РГГМУ. — 2015. — № 38. — С. 56–64.

рисанфов, Н. Е. Математическое моделирование гидрологических процессов / Н. Е. Хрисанфов. — Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2019. — 176 с.

еманаев, К. В. Опасные ледовые явления на реках Северо-Запада России : учебно-методическое пособие / К. В. Шеманаев. — Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2020. — 92 с.

Приложения

Приложение А

Рисунки А1-А14 уровни воды по всем постам за 2009-2022 гг.

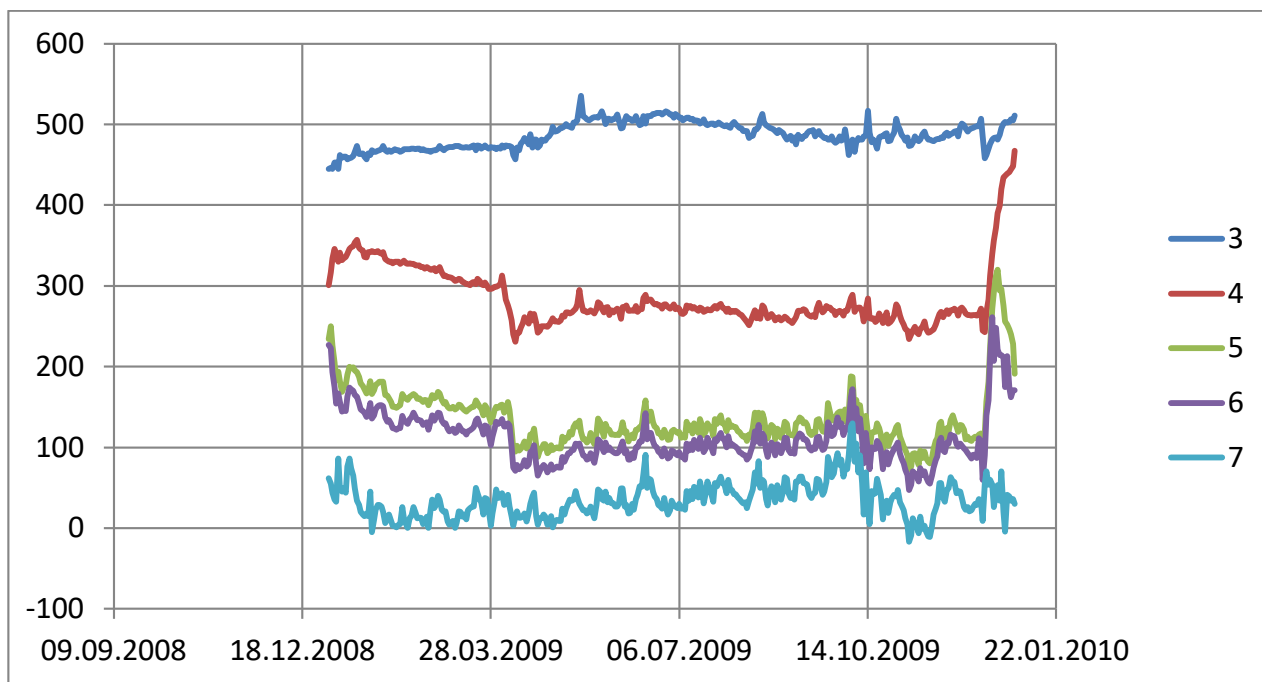


Рисунок А1. 2009 год

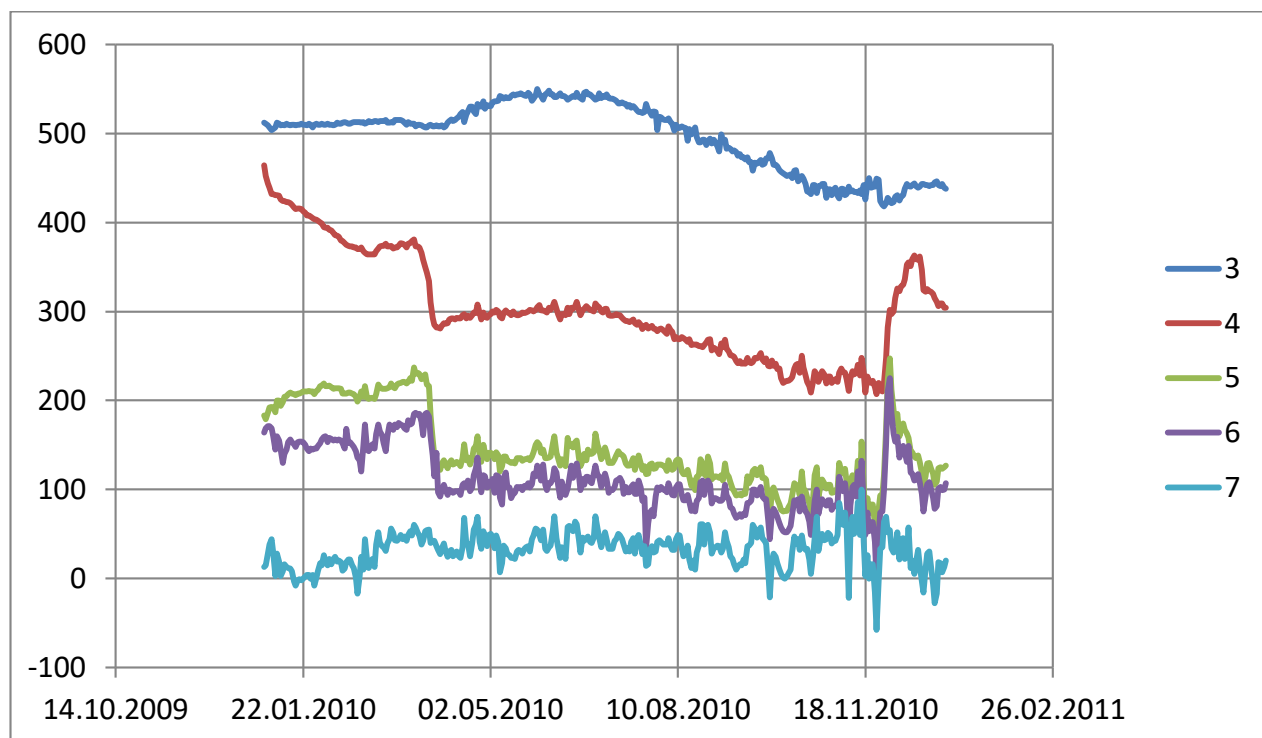


Рисунок А2. 2010 год

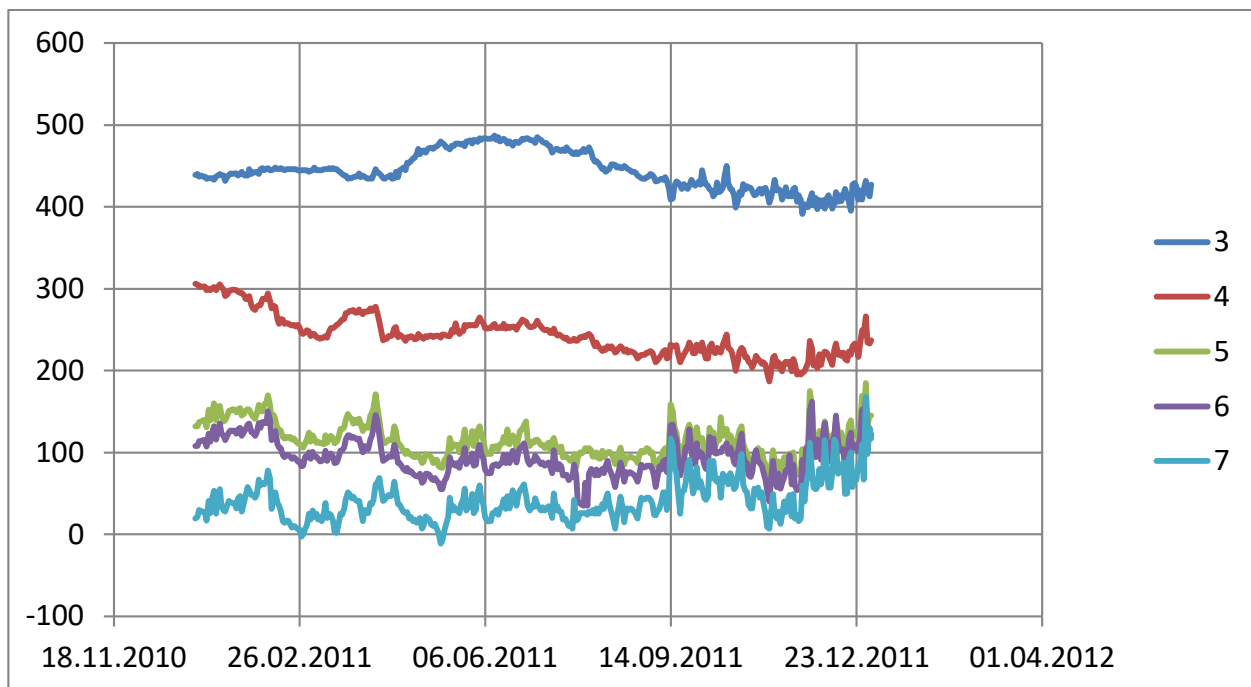


Рисунок А3. 2011 год

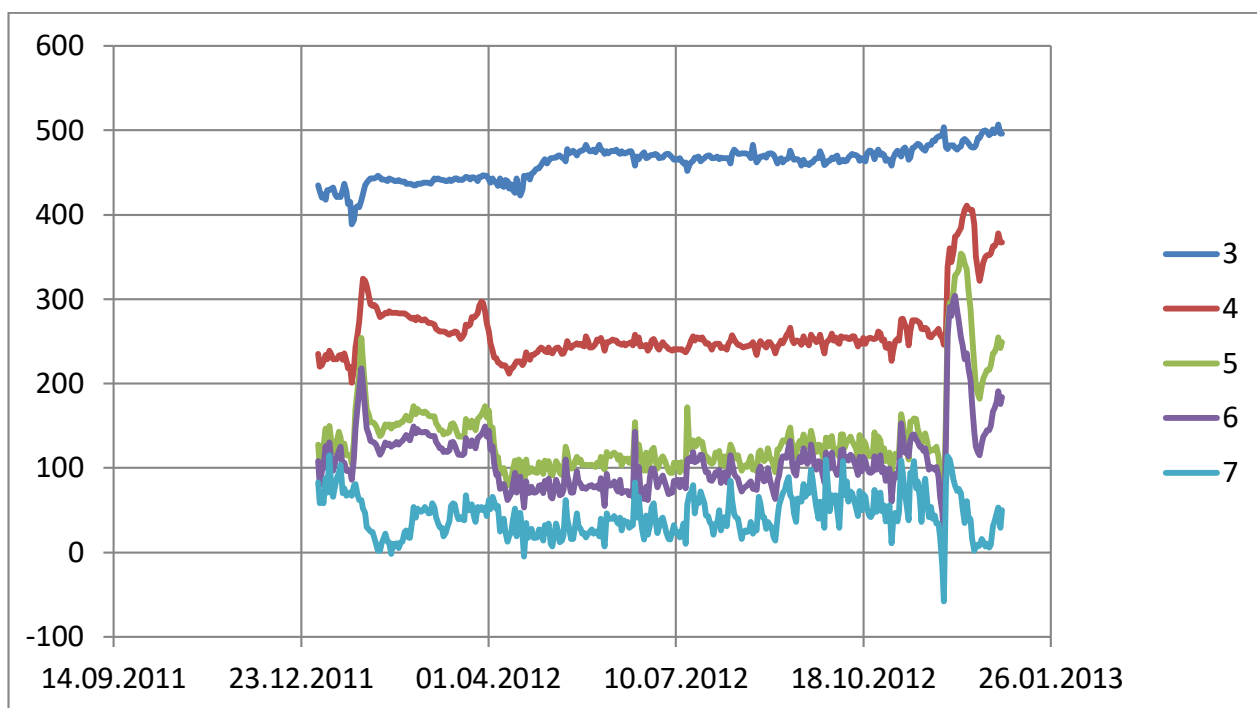


Рисунок А4. 2012 год

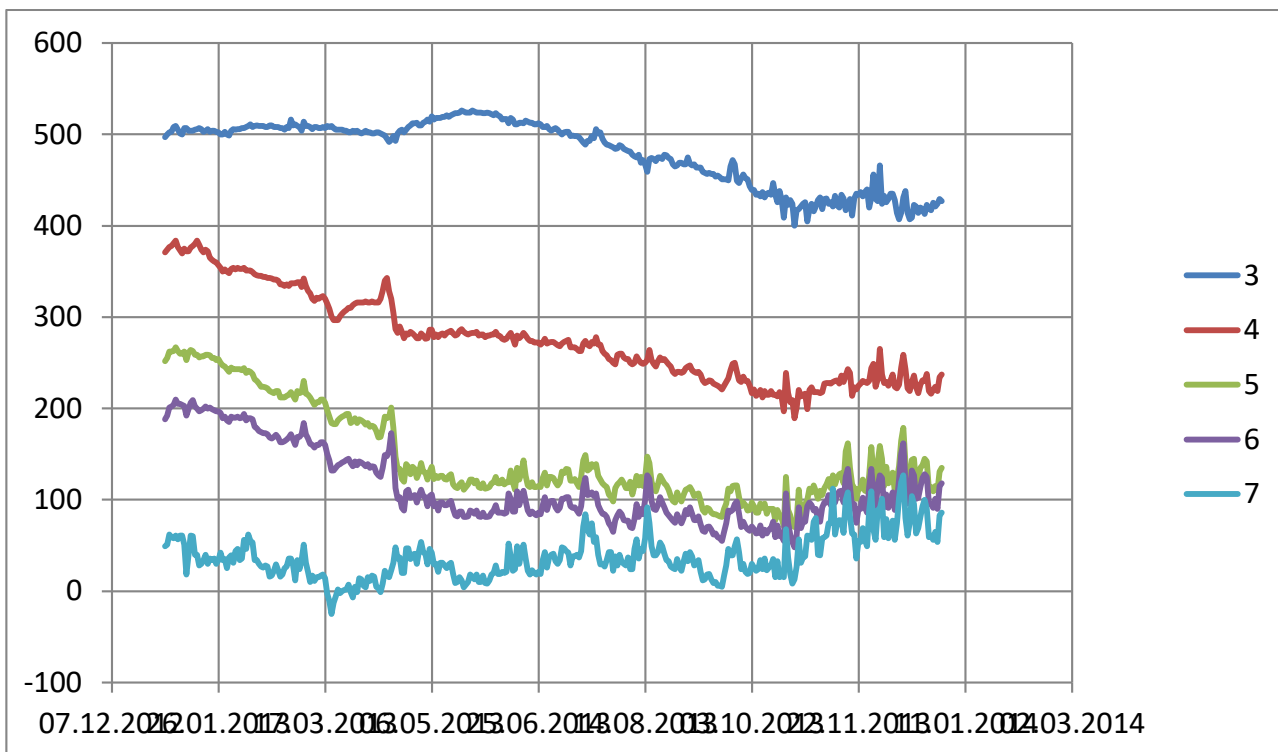


Рисунок А5. 2013 год

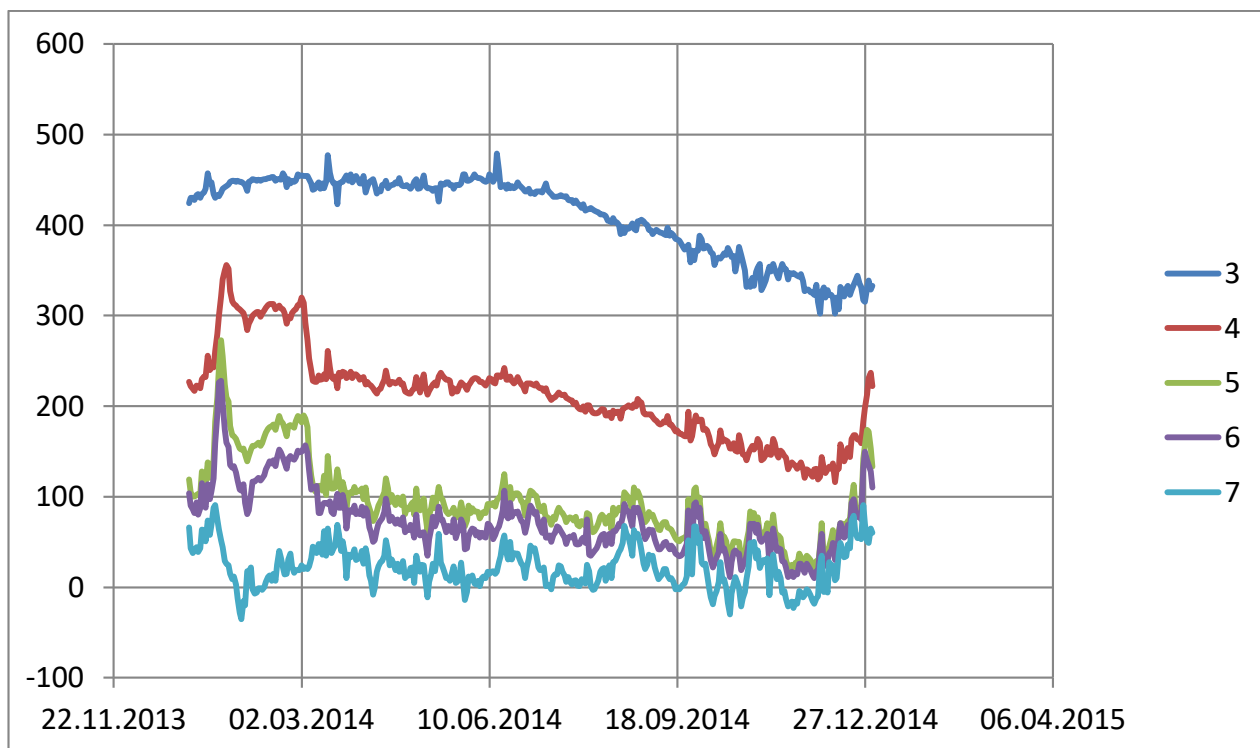


Рисунок А6. 2014 год

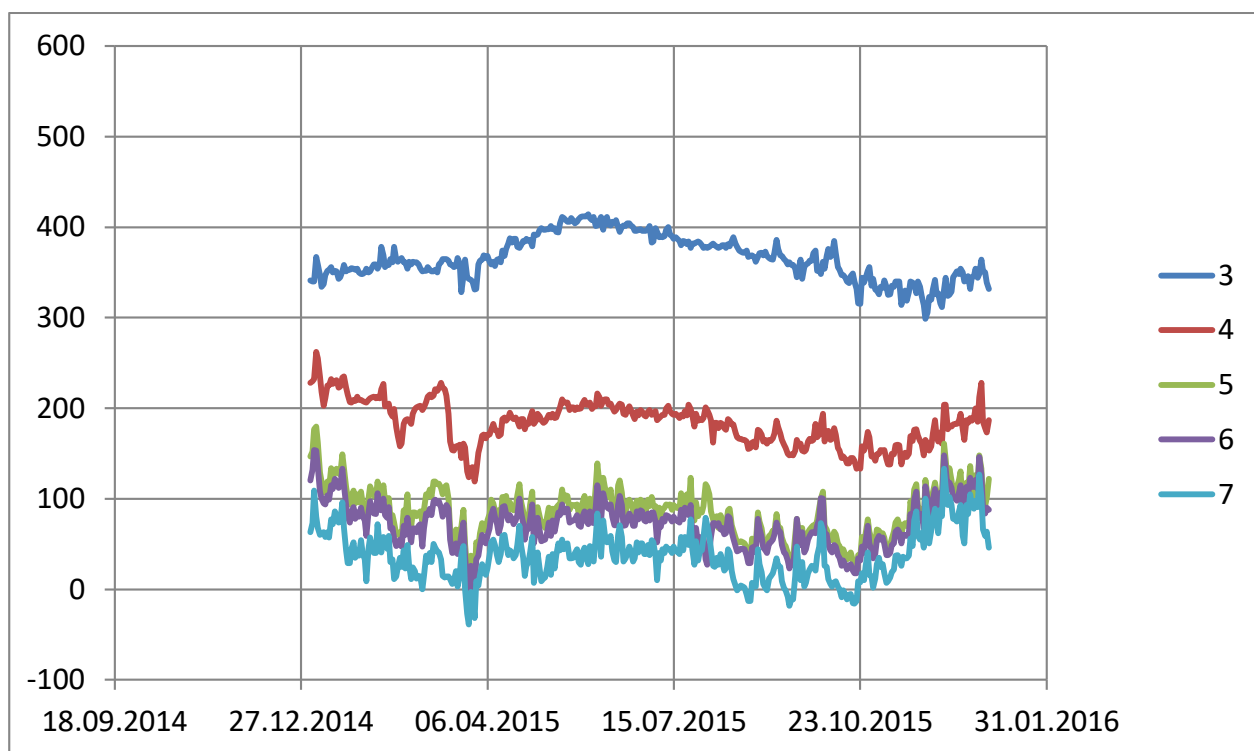


Рисунок А7. 2015 год

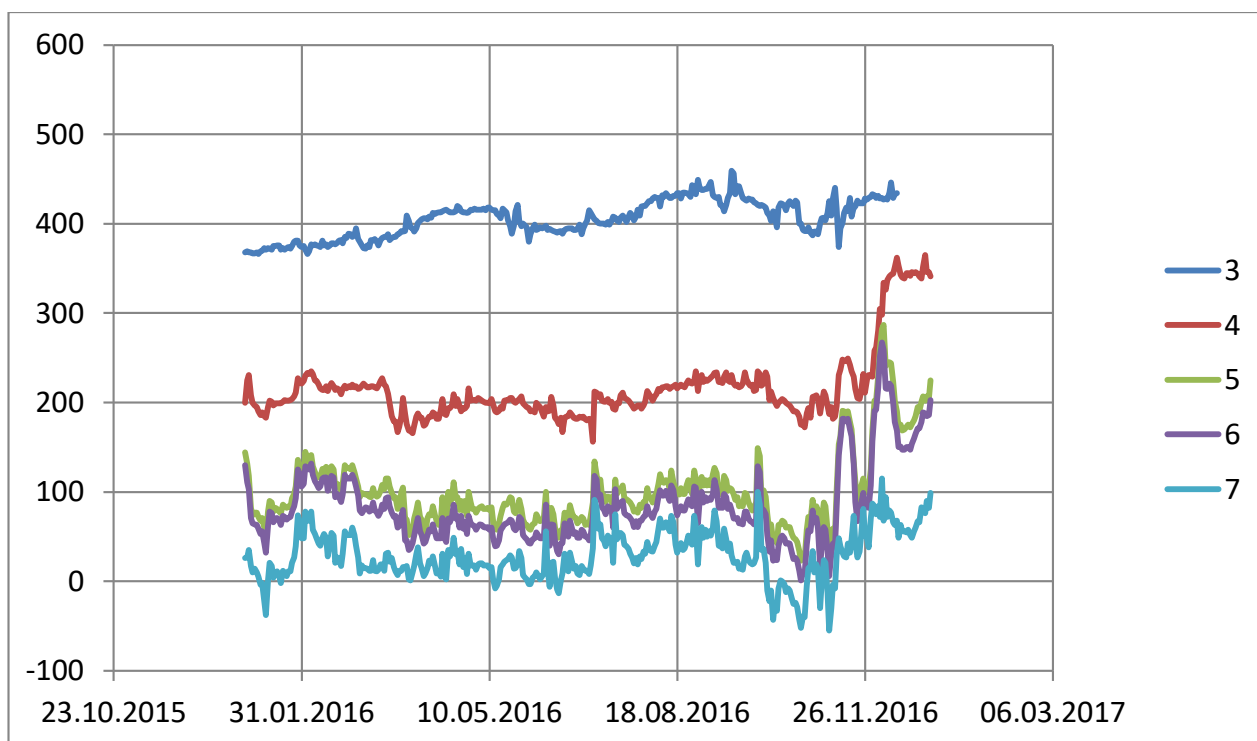


Рисунок А8. 2016 год

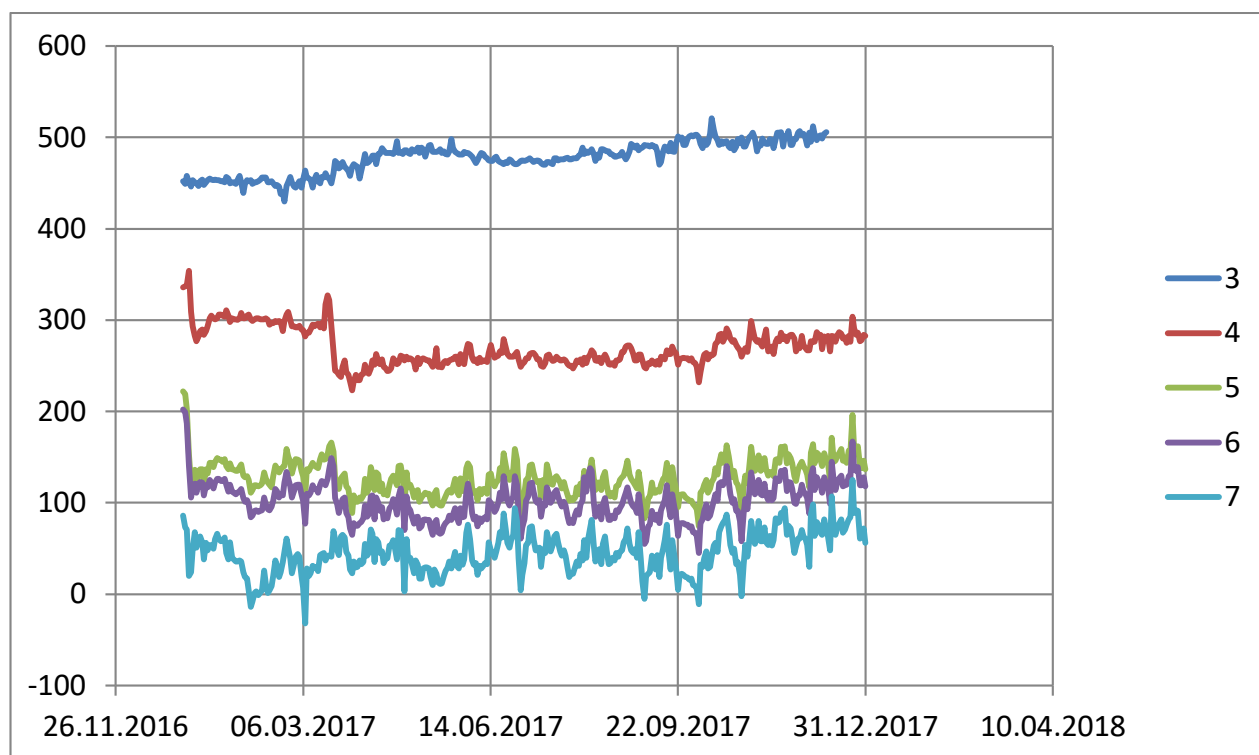


Рисунок А9. 2017 год

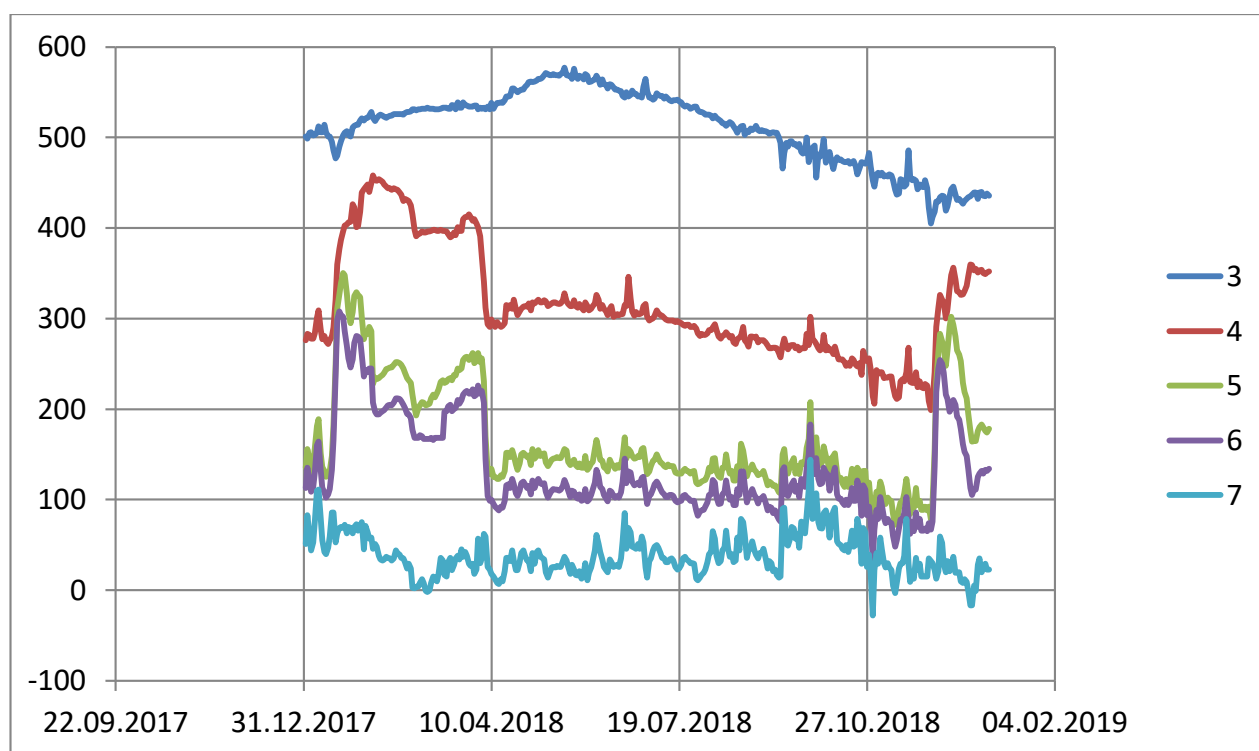


Рисунок А10. 2018 год

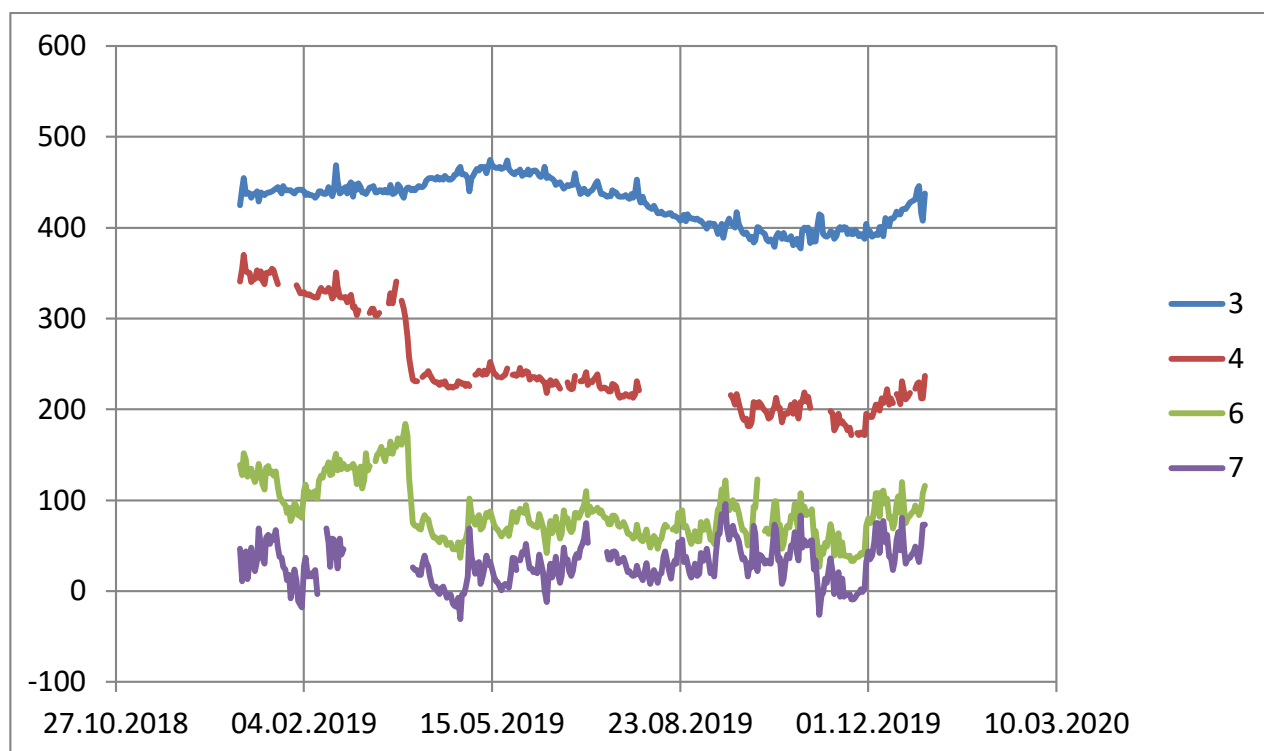


Рисунок А11. 2019 год

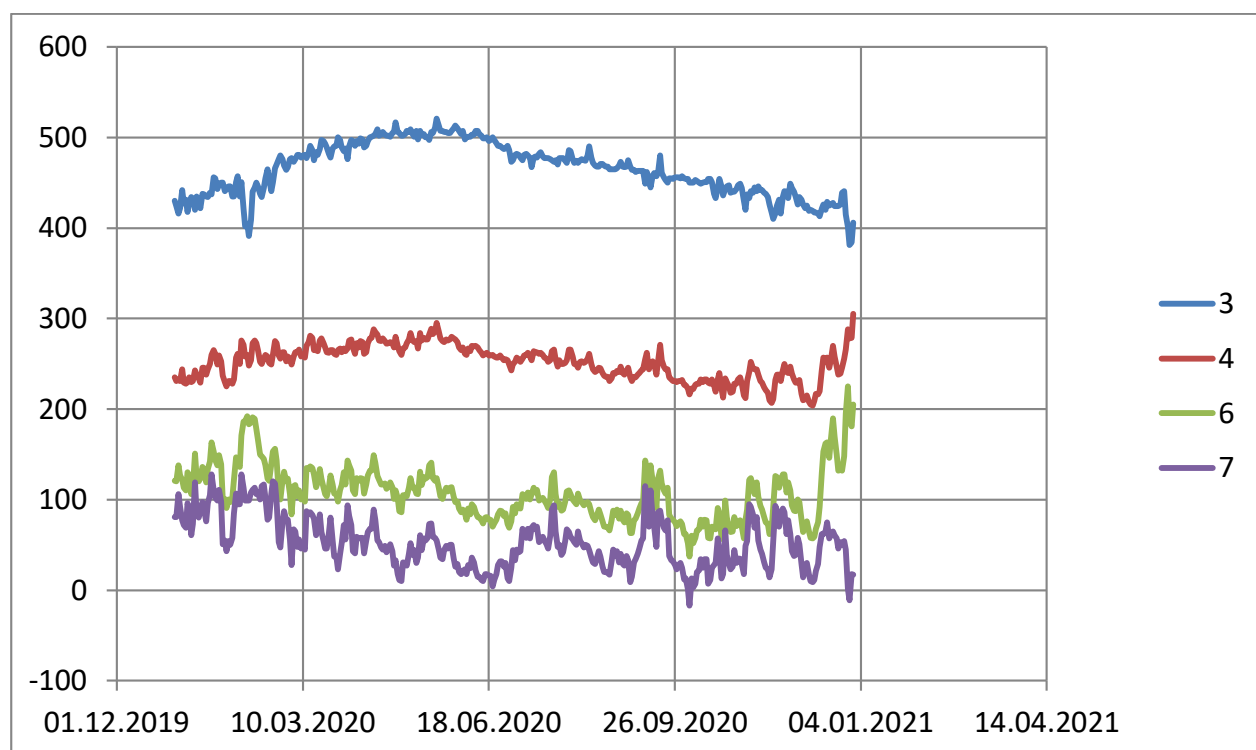


Рисунок А12. 2020 год

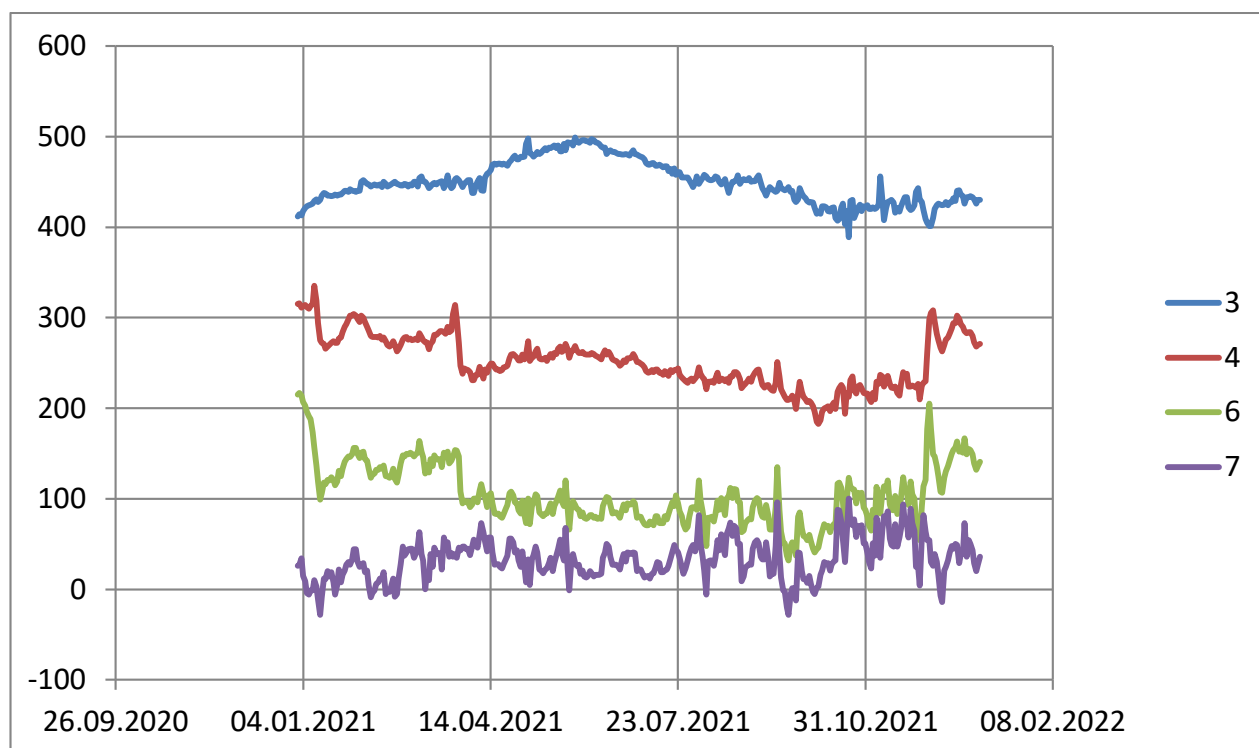


Рисунок А13. 2021 год

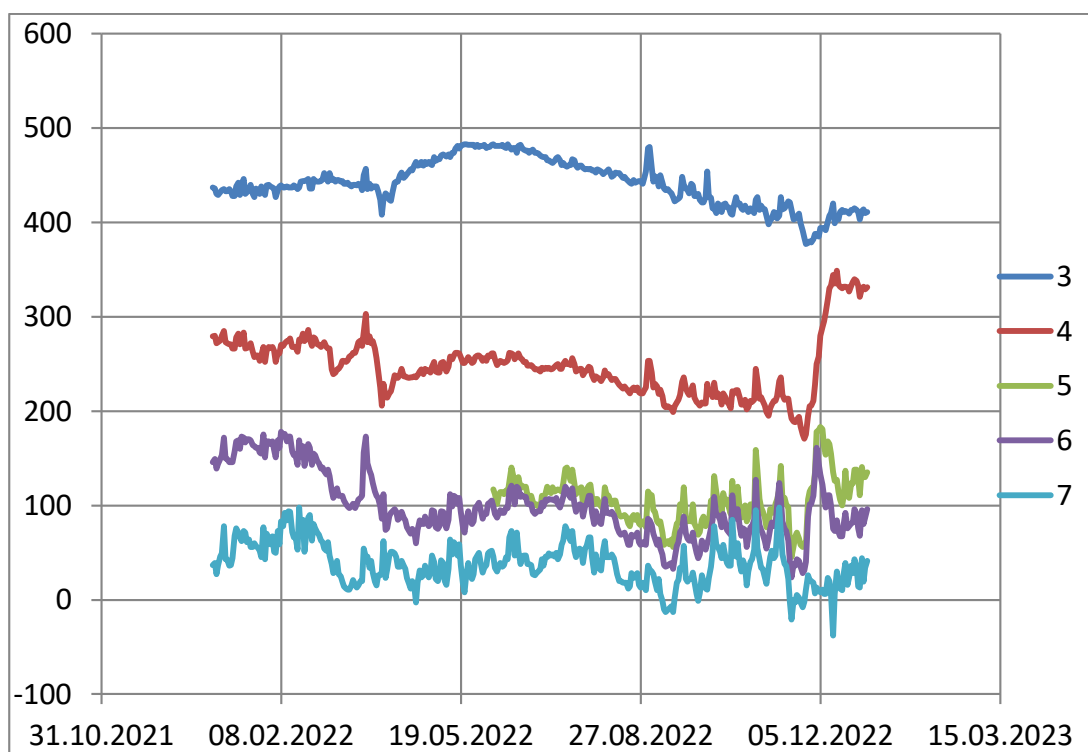


Рисунок А14. 2022 год

Уровни воды (Рисунок Б1-Б11) и температура воздуха (Рисунок Б12-Б23) в зимний период по всем постам за 2009-2022 гг.

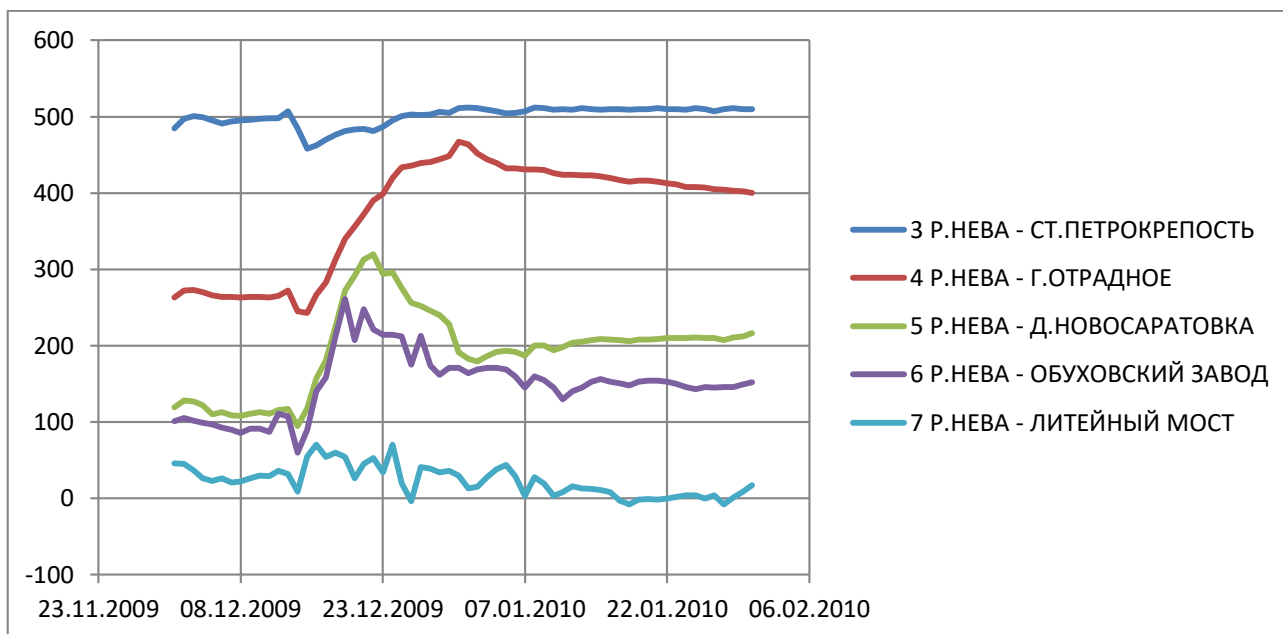


Рисунок Б1. 2009 год

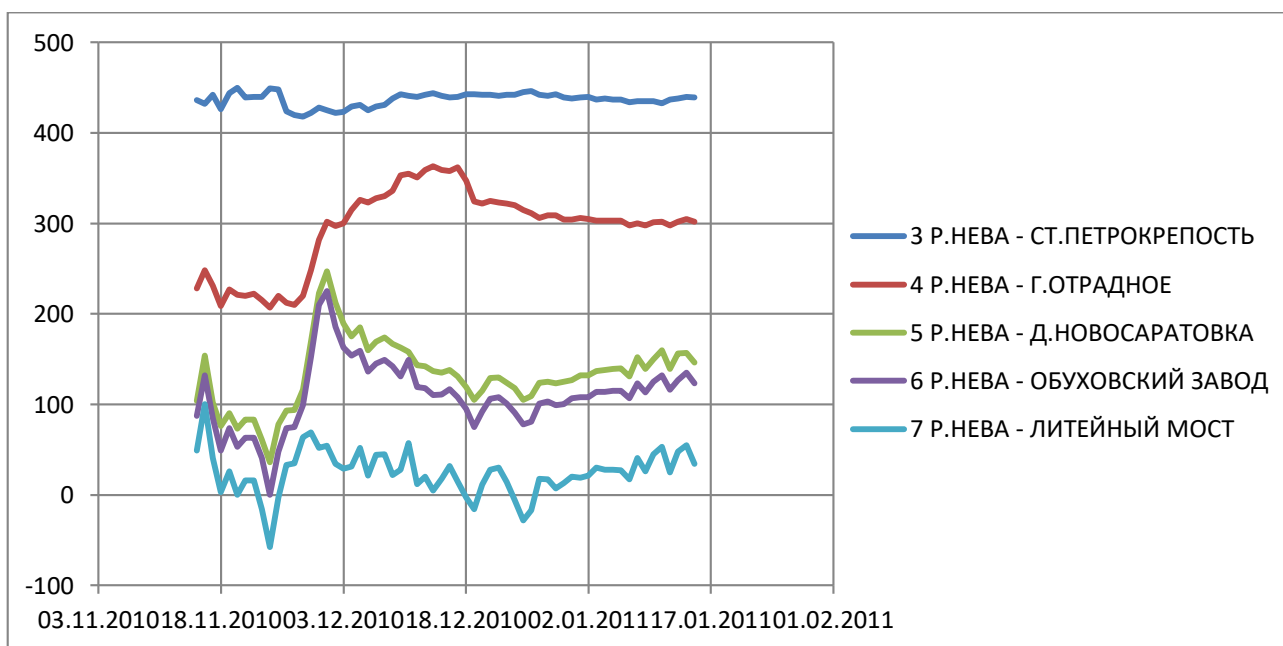


Рисунок Б2. 2010 год

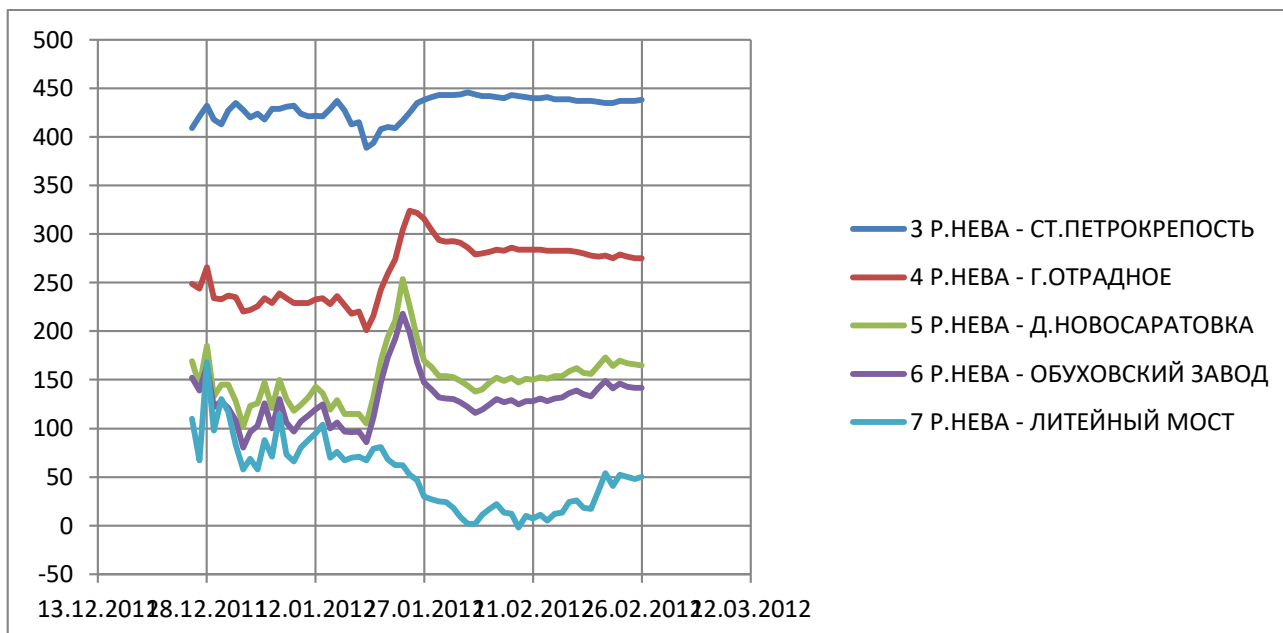


Рисунок Б3. 2011 год

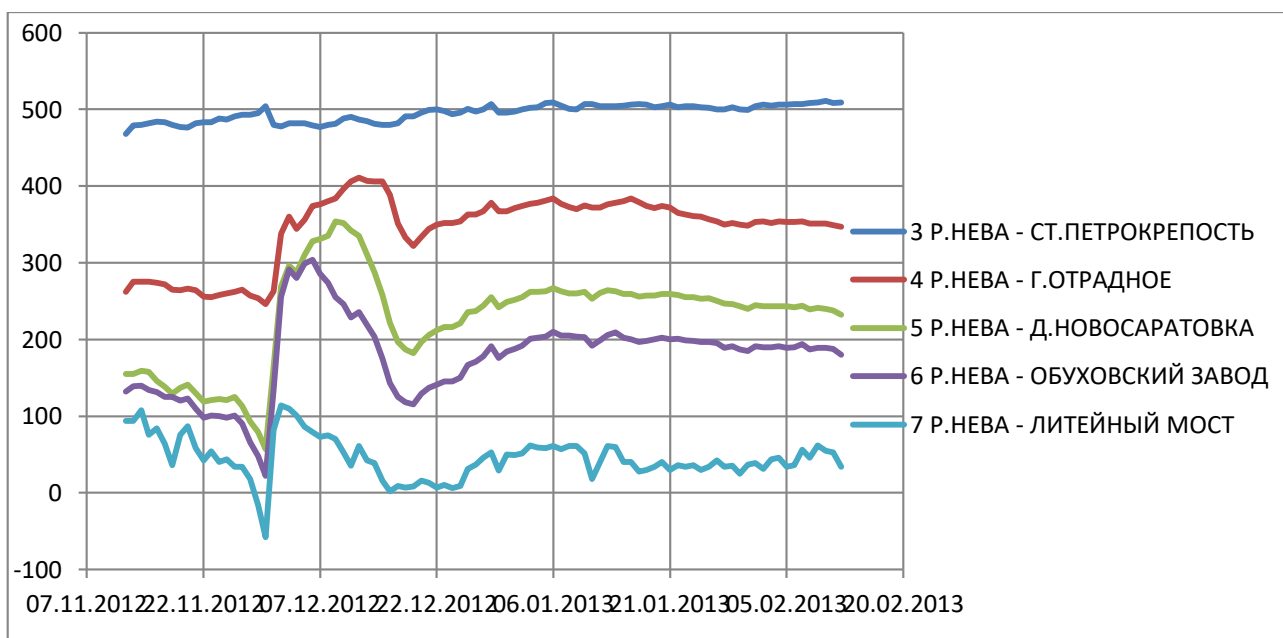


Рисунок Б4. 2012 год

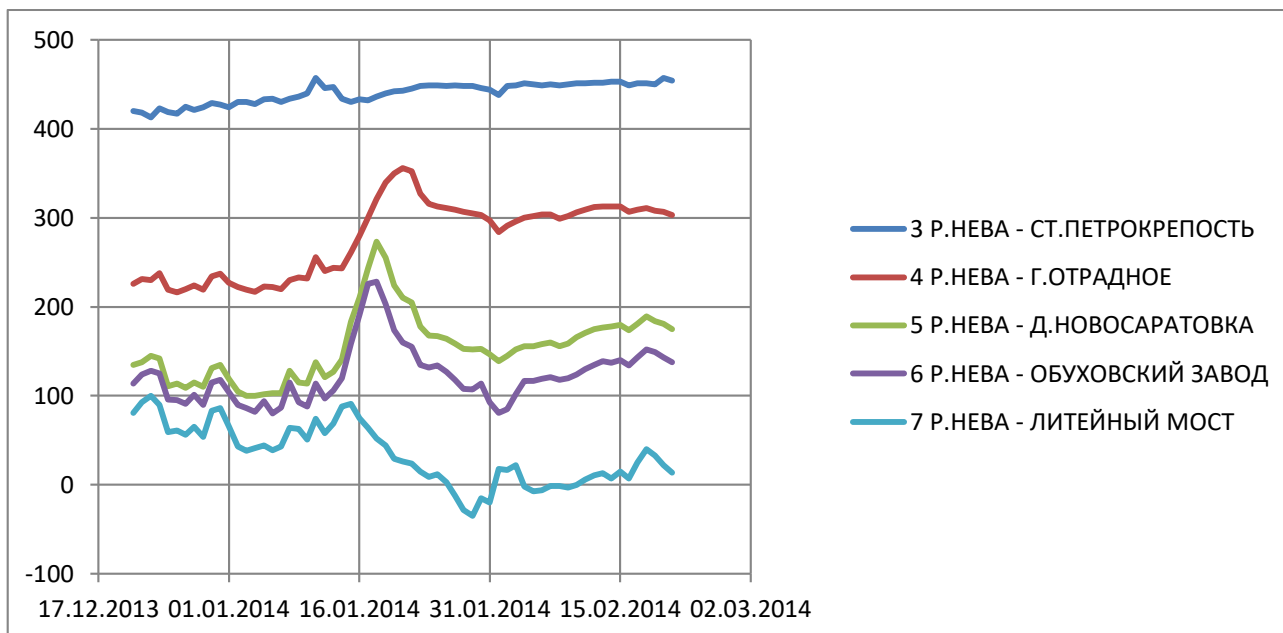


Рисунок 5Б. 2013 год

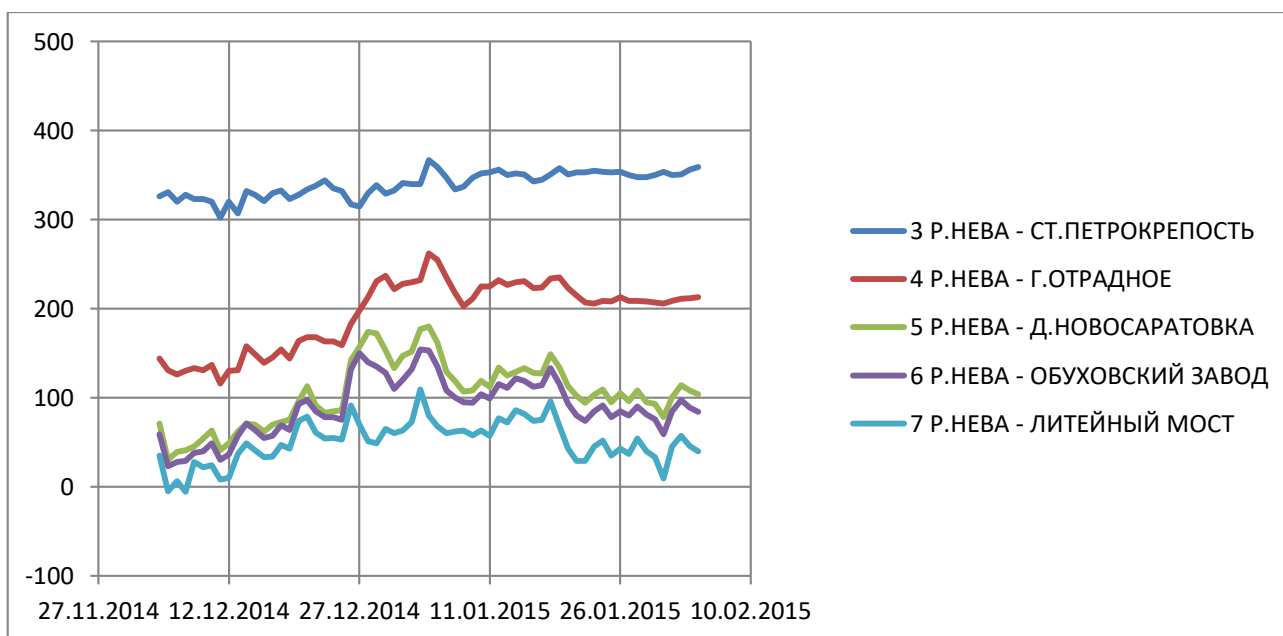


Рисунок 6Б. 2014 год

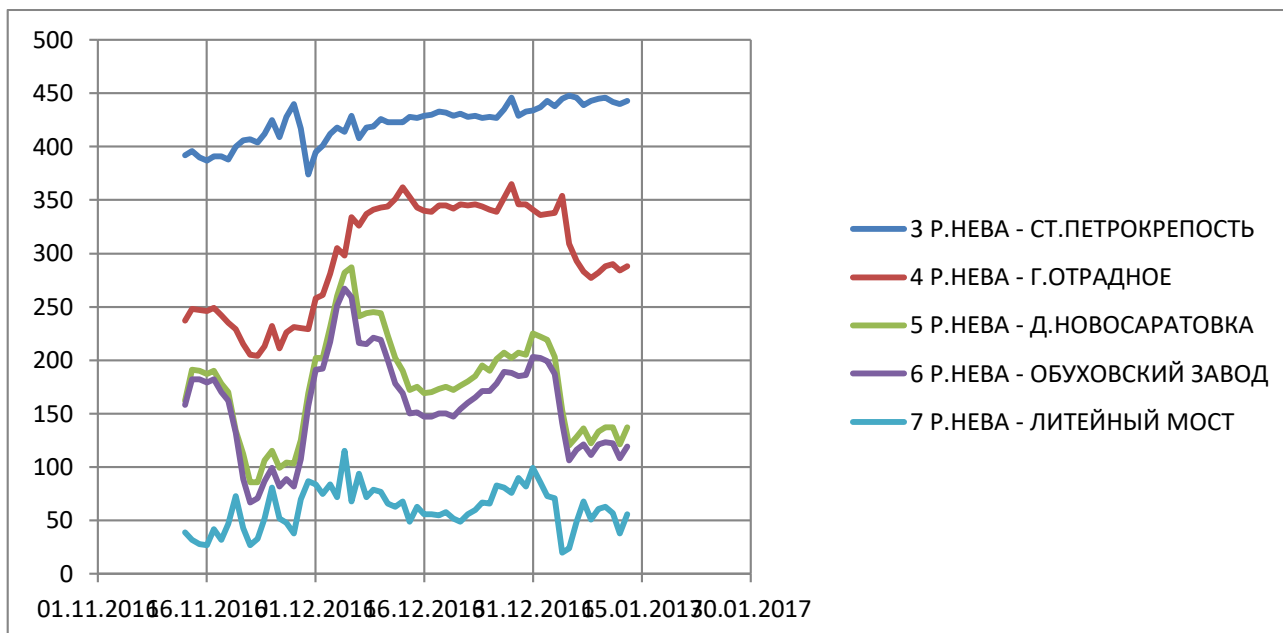


Рисунок Б8. 2016 год

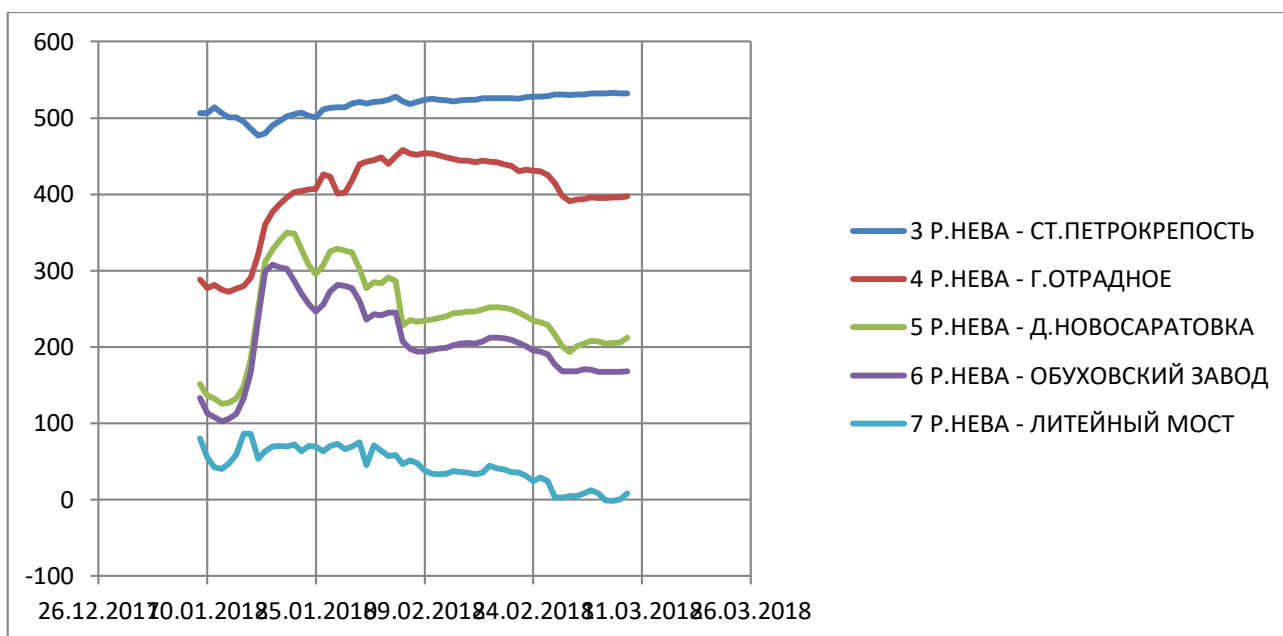


Рисунок Б9. 2017 год

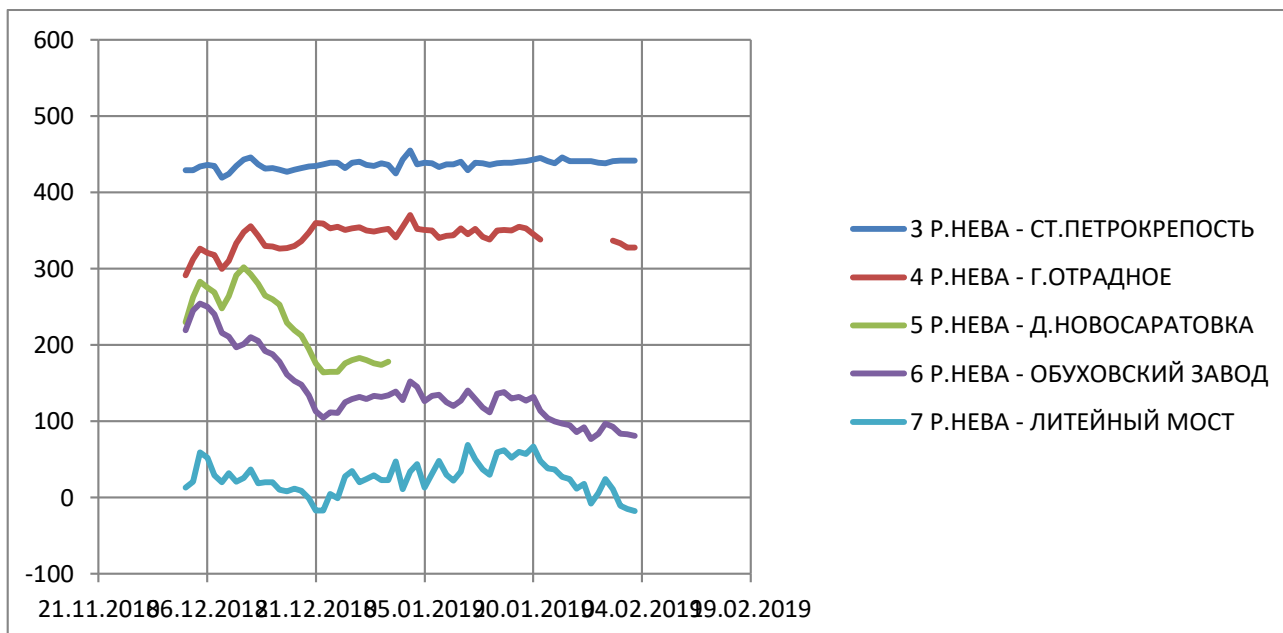


Рисунок Б10. 2018 год

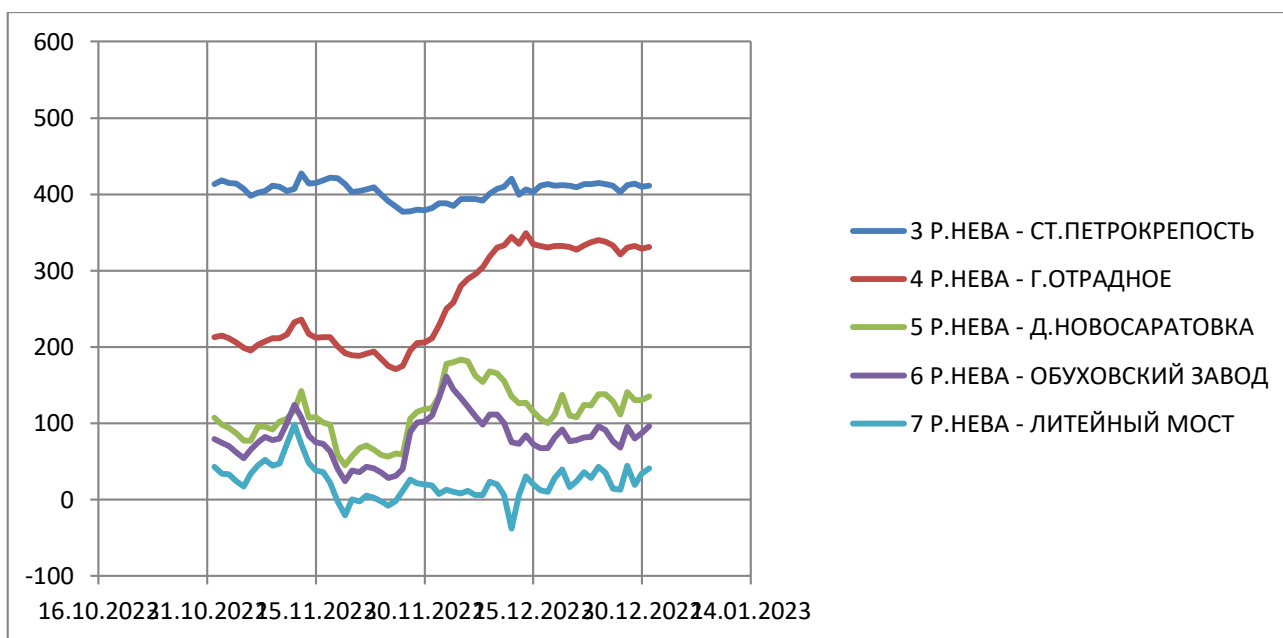


Рисунок Б11. 2022 год

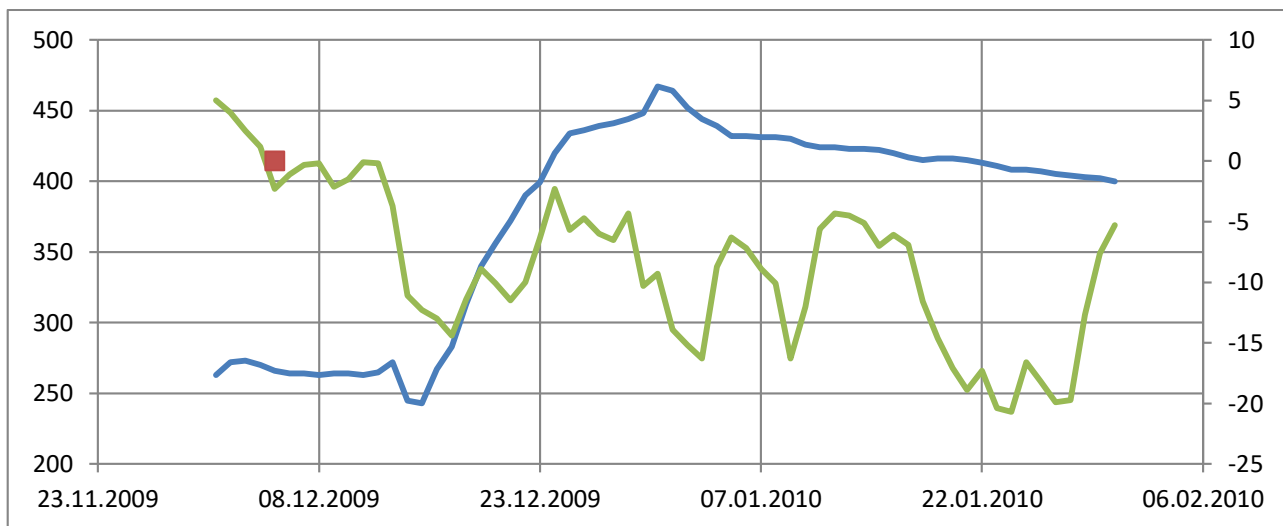


Рисунок Б11. 2009 год

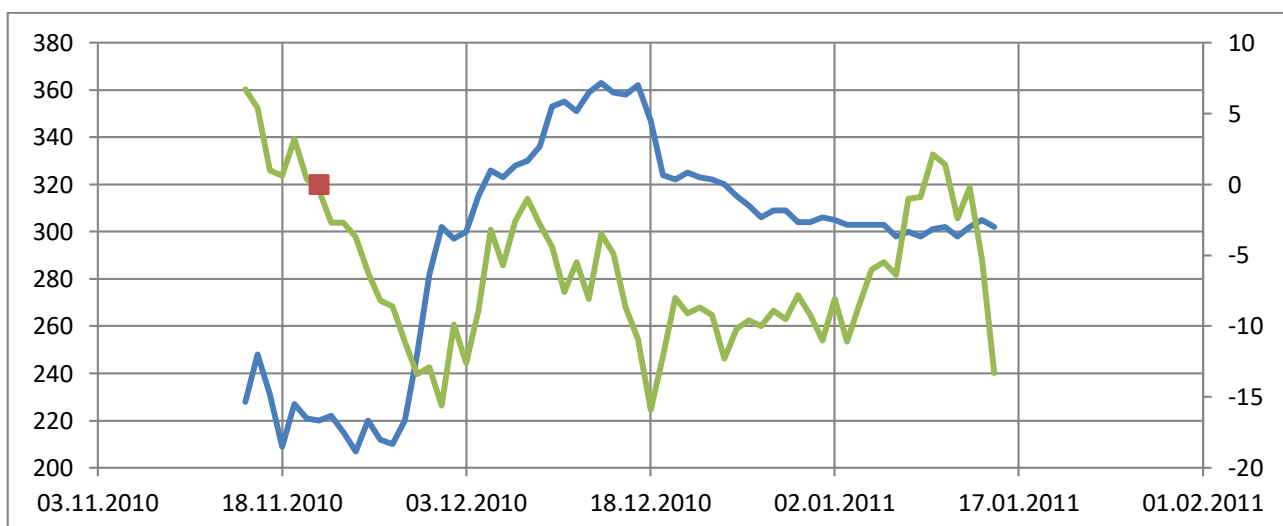


Рисунок Б12. 2010 год

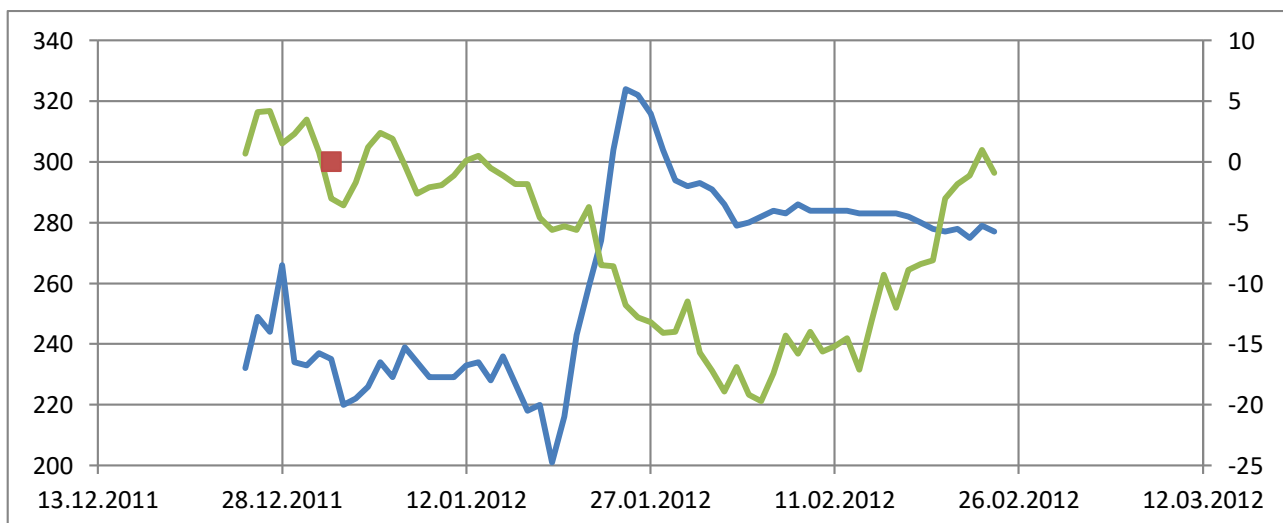


Рисунок Б13. 2011 год

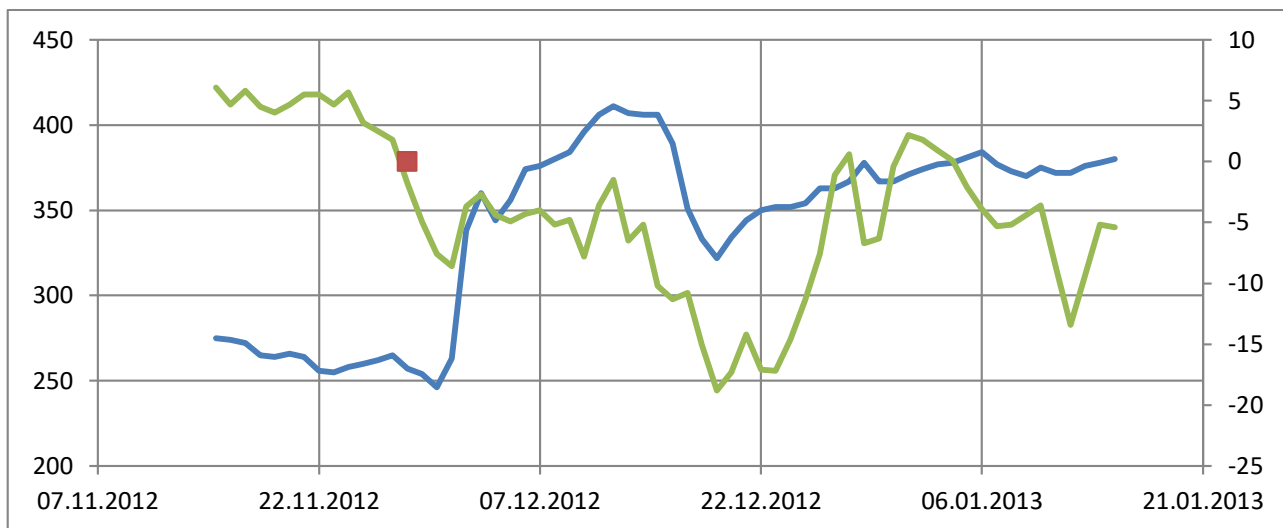


Рисунок Б14. 2012 год

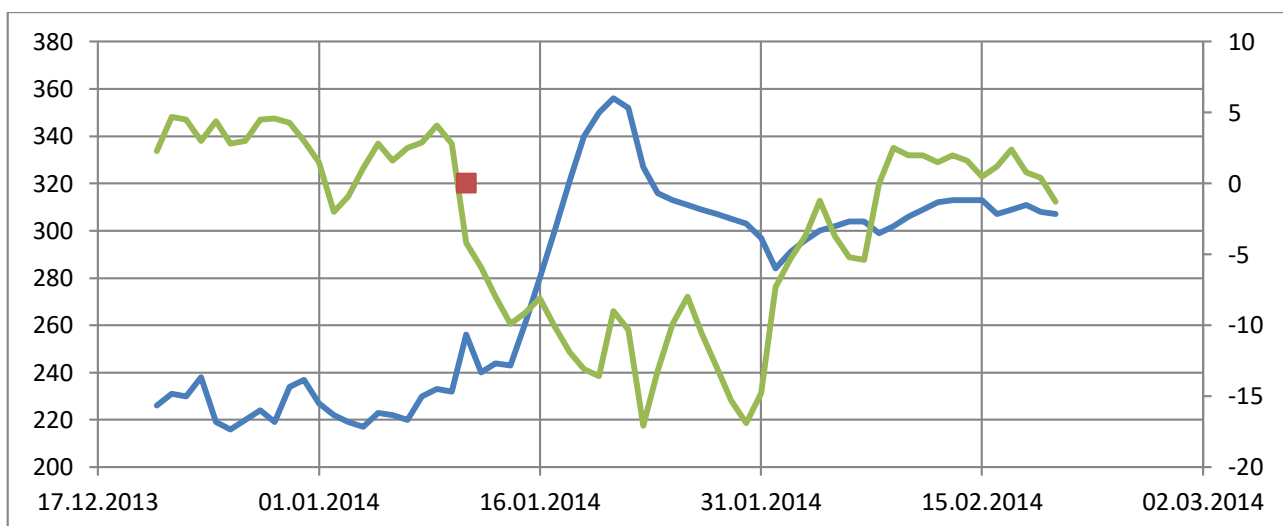


Рисунок Б15. 2013 год

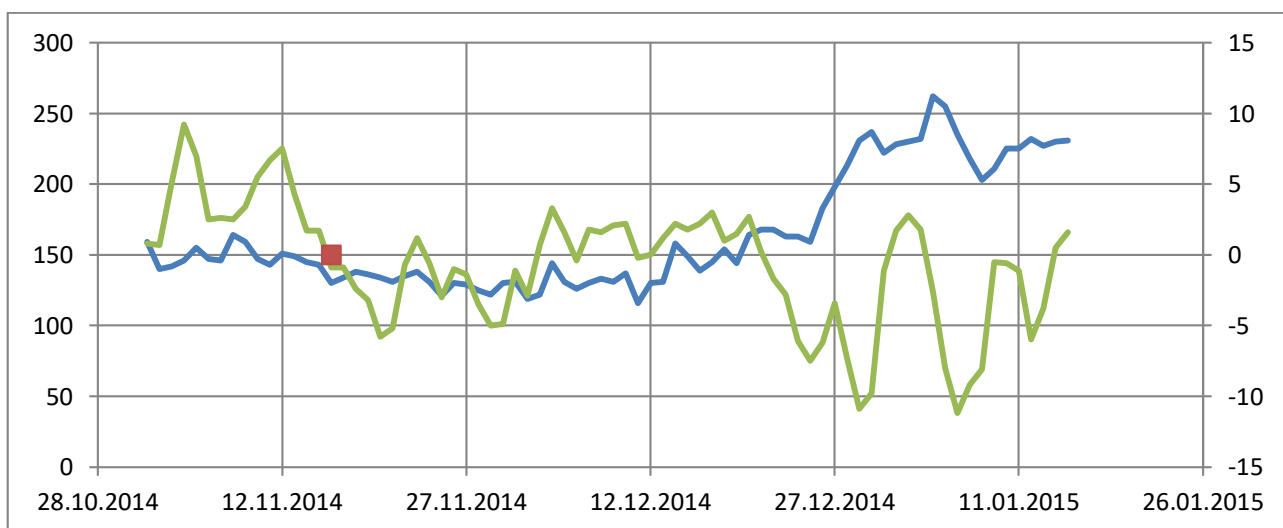


Рисунок Б16. 2014 год

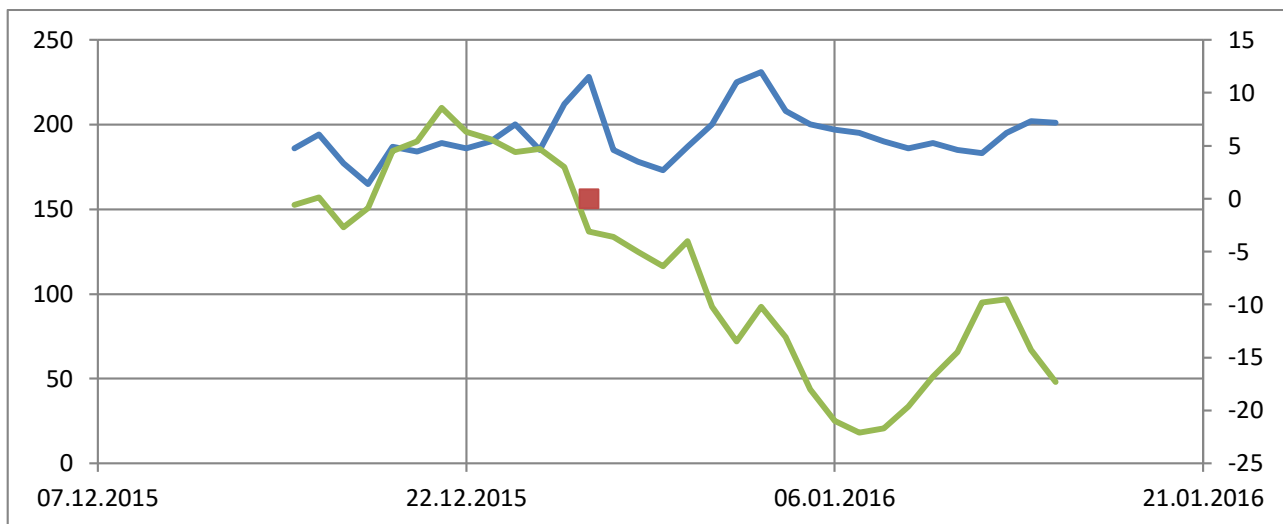


Рисунок Б17. 2015 год

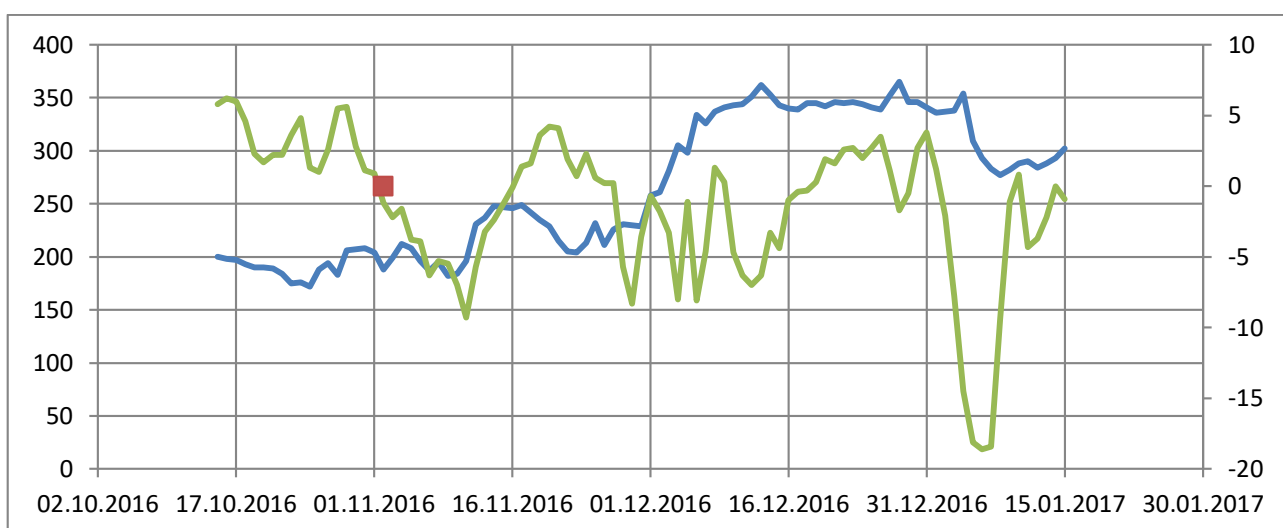


Рисунок Б18. 2016 год

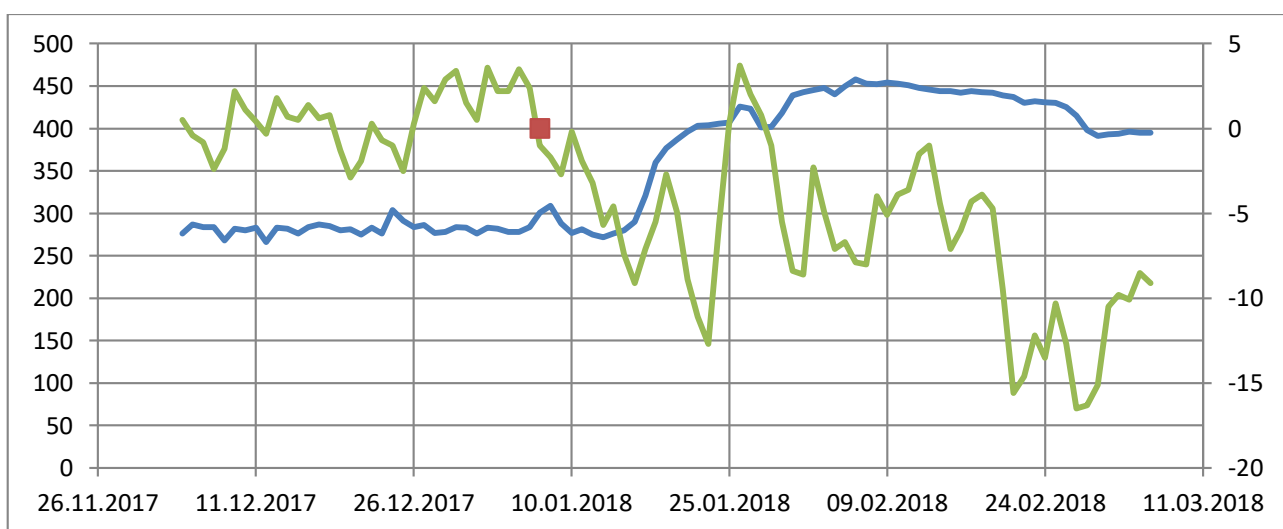


Рисунок Б19. 2017 год

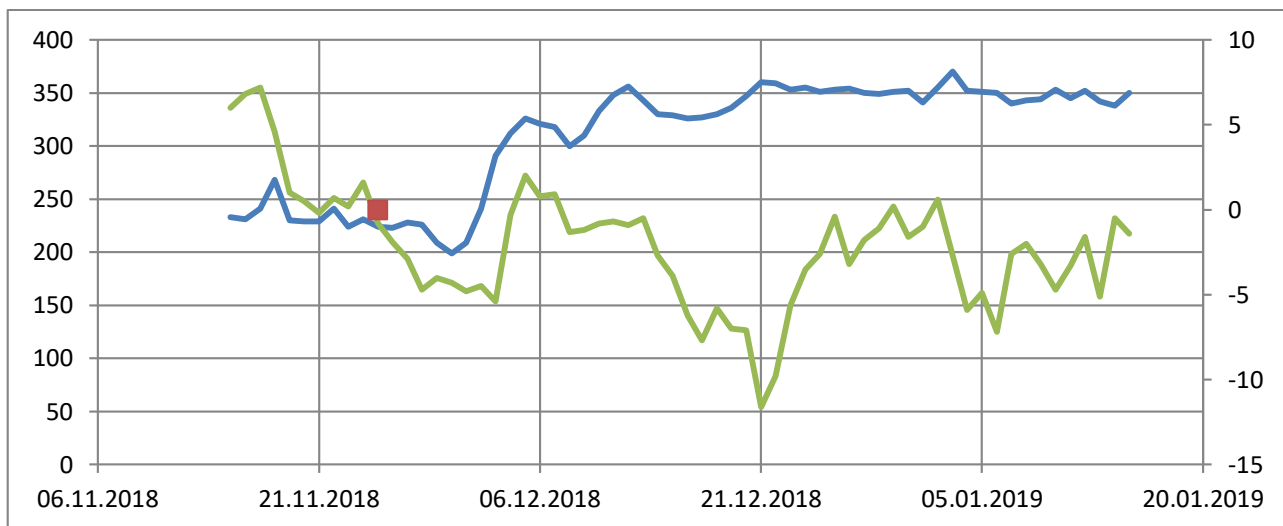


Рисунок Б20. 2018 год

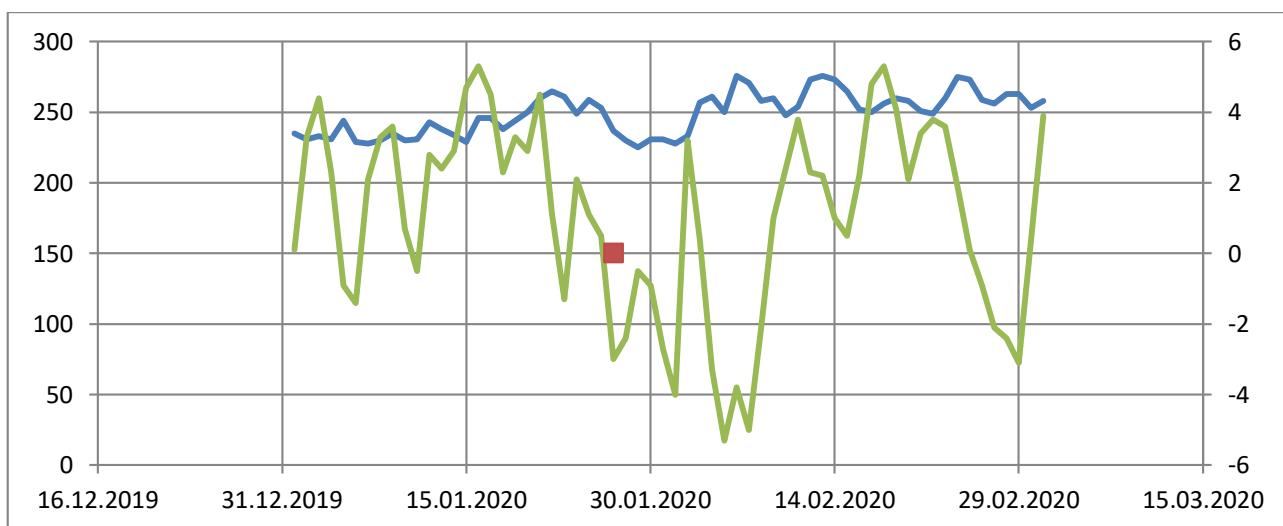


Рисунок Б21. 2019 год

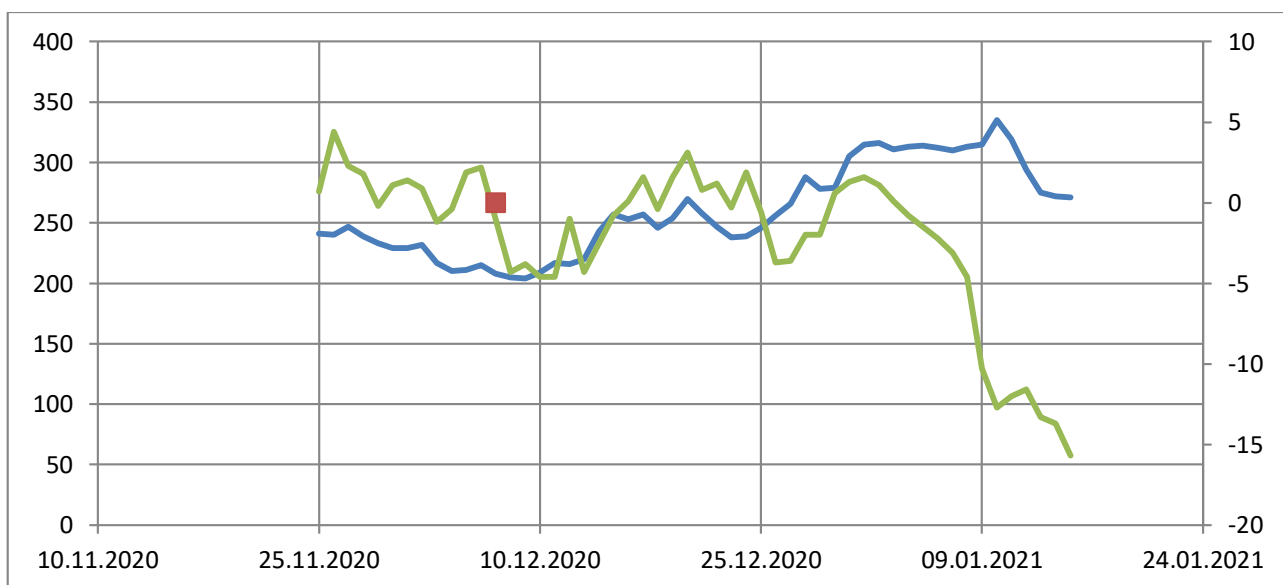


Рисунок Б22. 2020 год

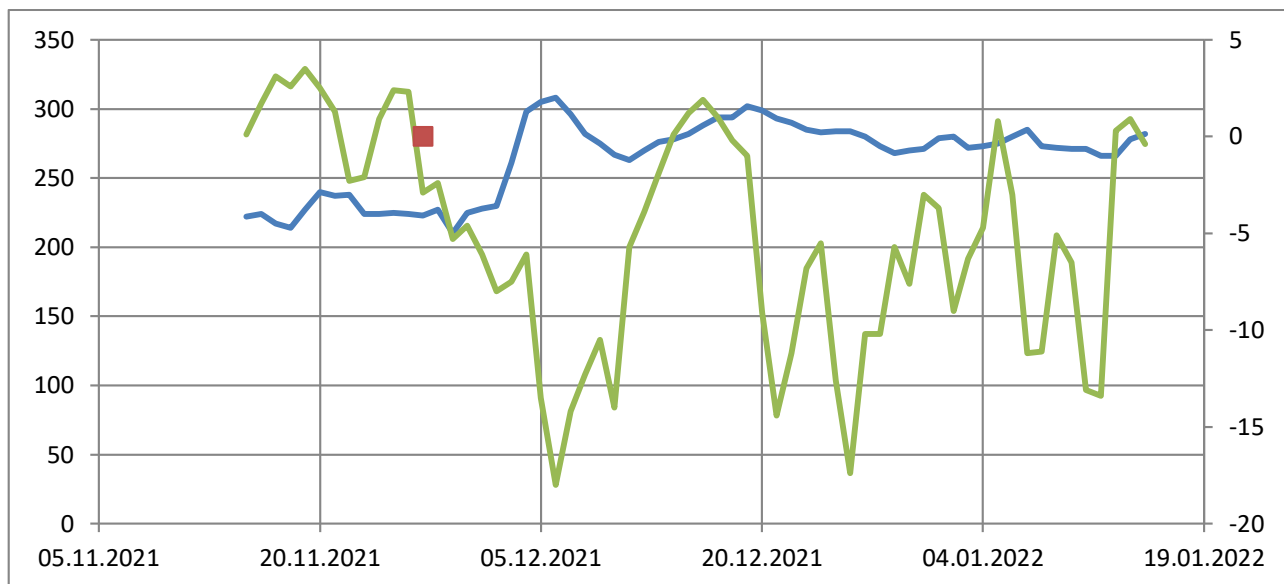


Рисунок Б23. 2021 год

Рисунки В1-В110 результаты математического моделирования с 2009 по 2018 гг.

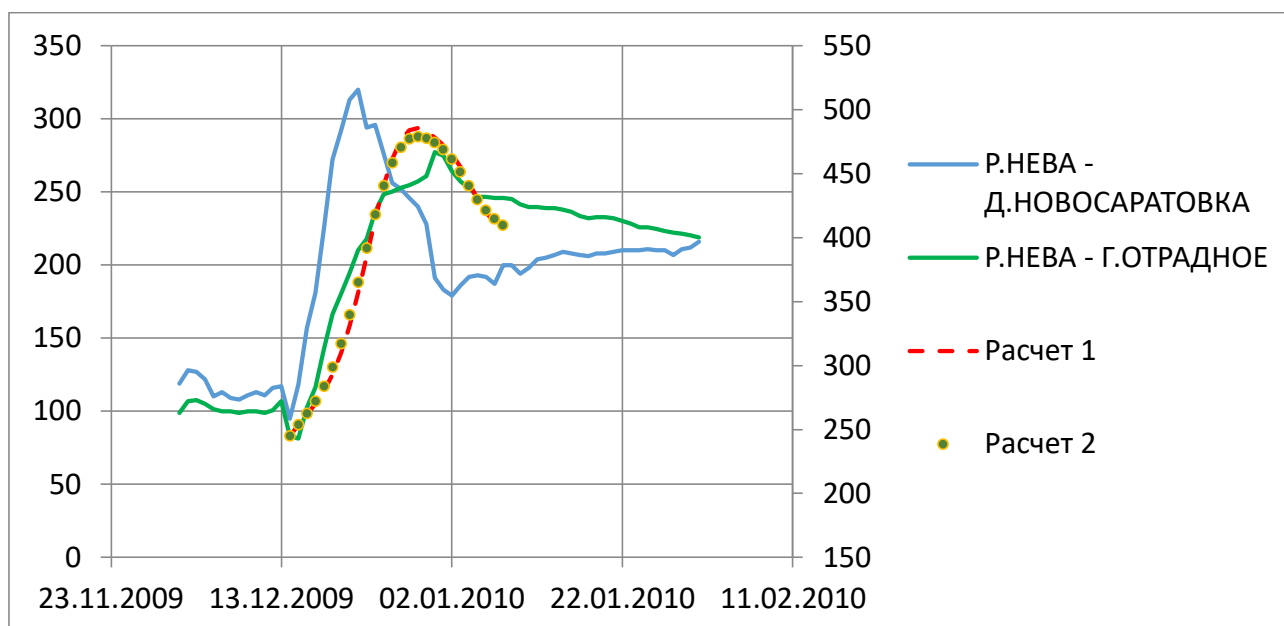


Рисунок В1. 2009 год

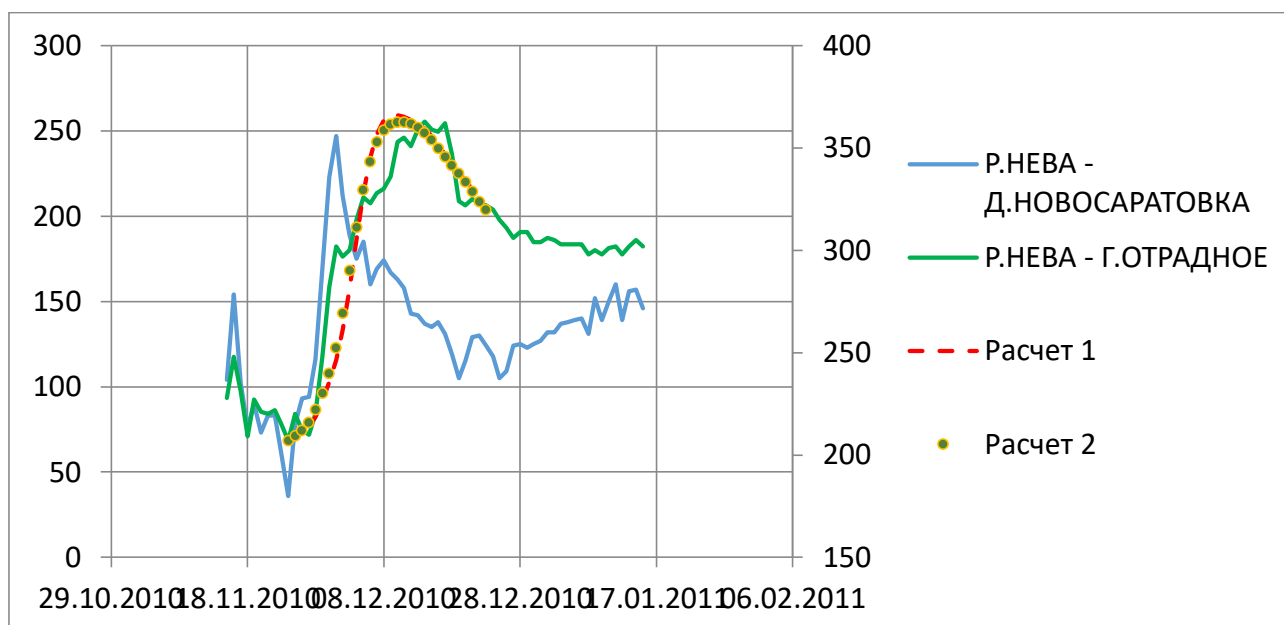


Рисунок В2. 2010 год

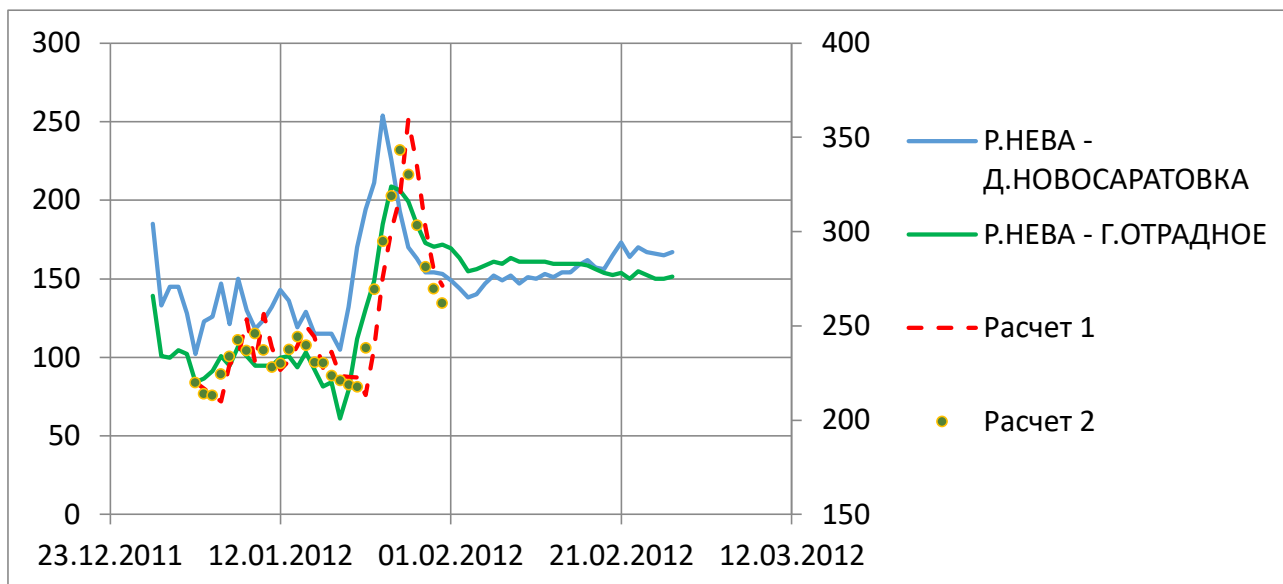


Рисунок В3. 2011 год

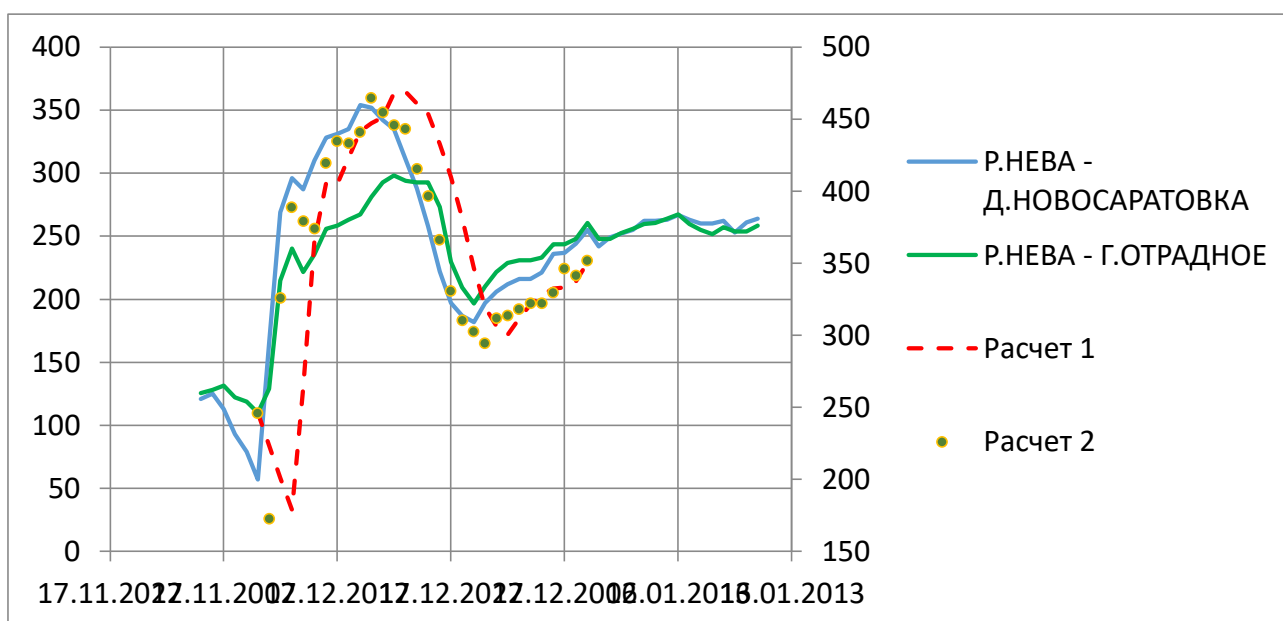


Рисунок В4. 2012 год

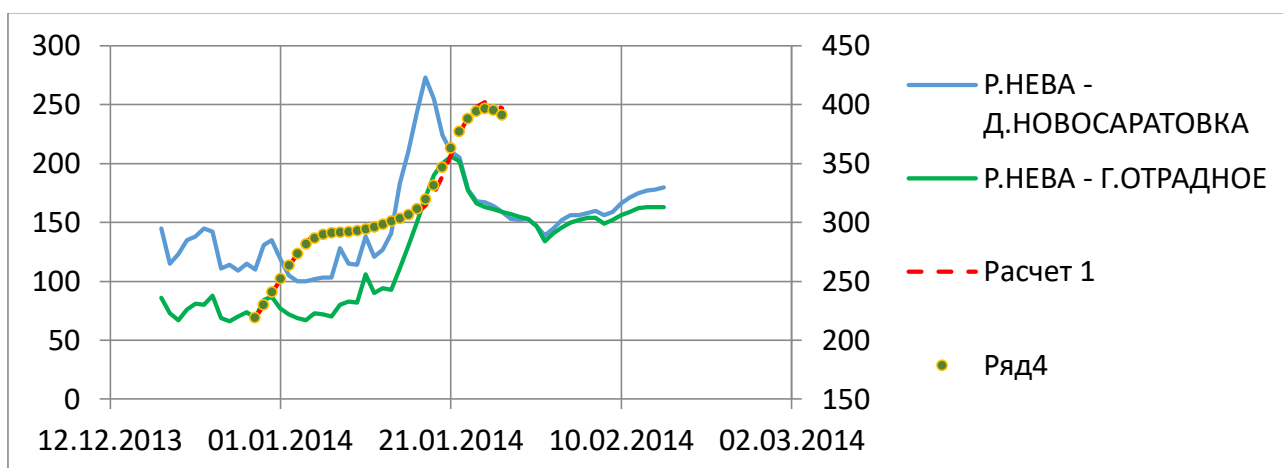


Рисунок В5. 2013 год

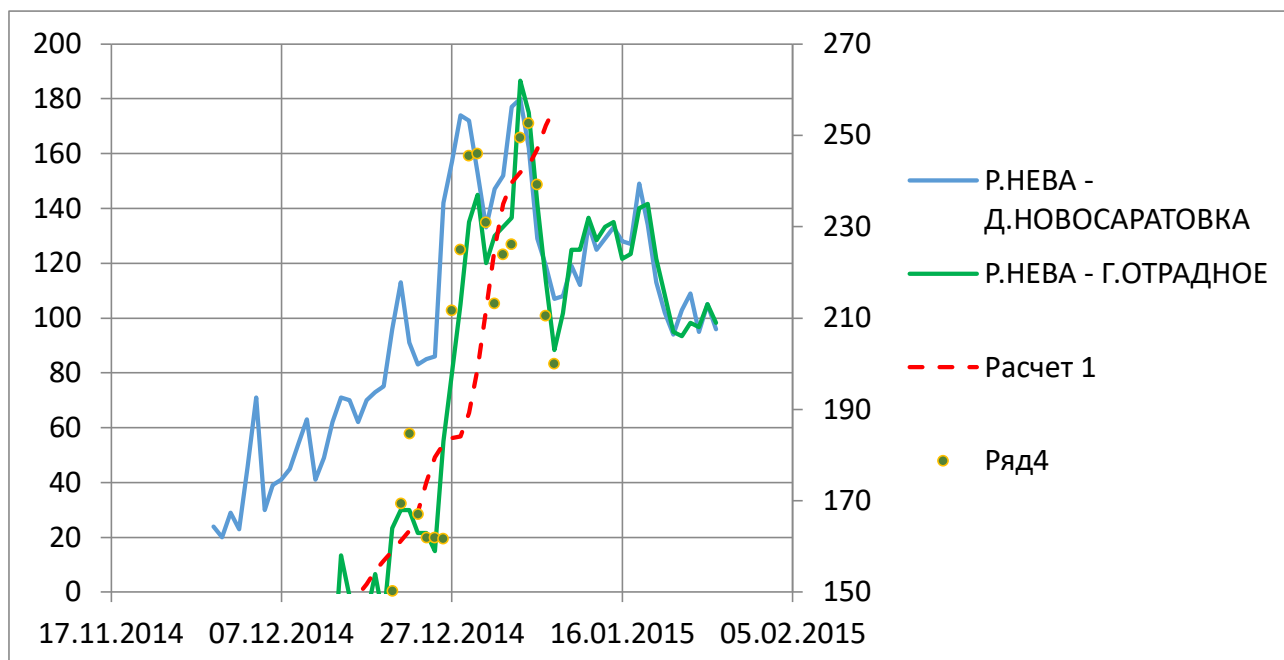


Рисунок В6. 2014 год

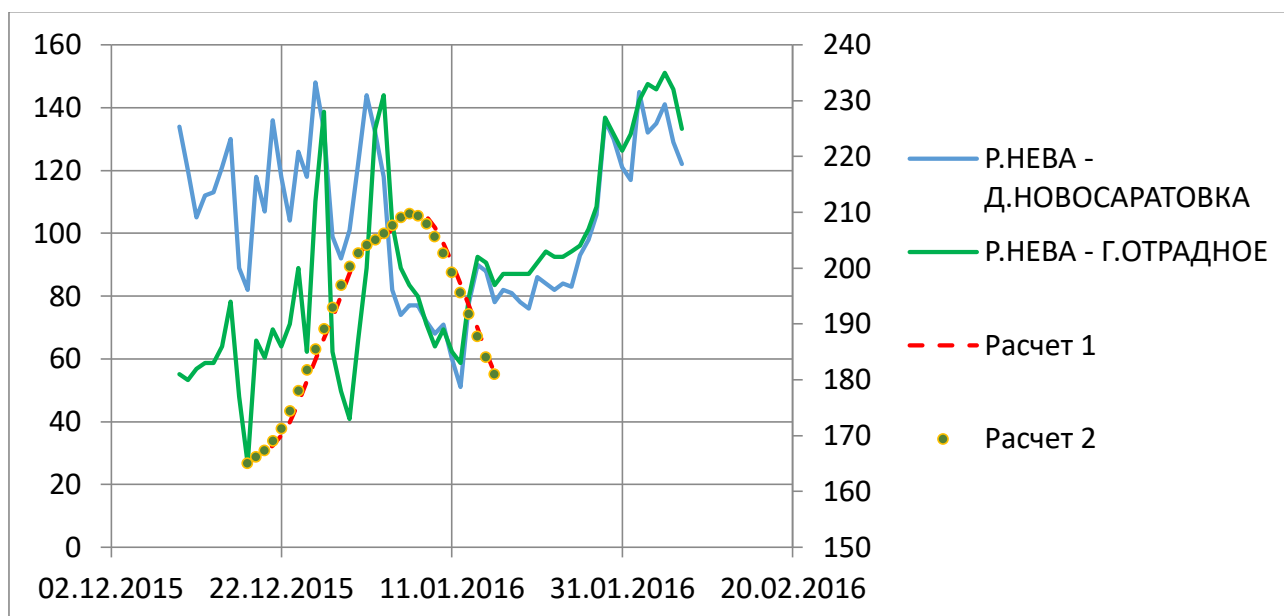


Рисунок В7. 2015 год

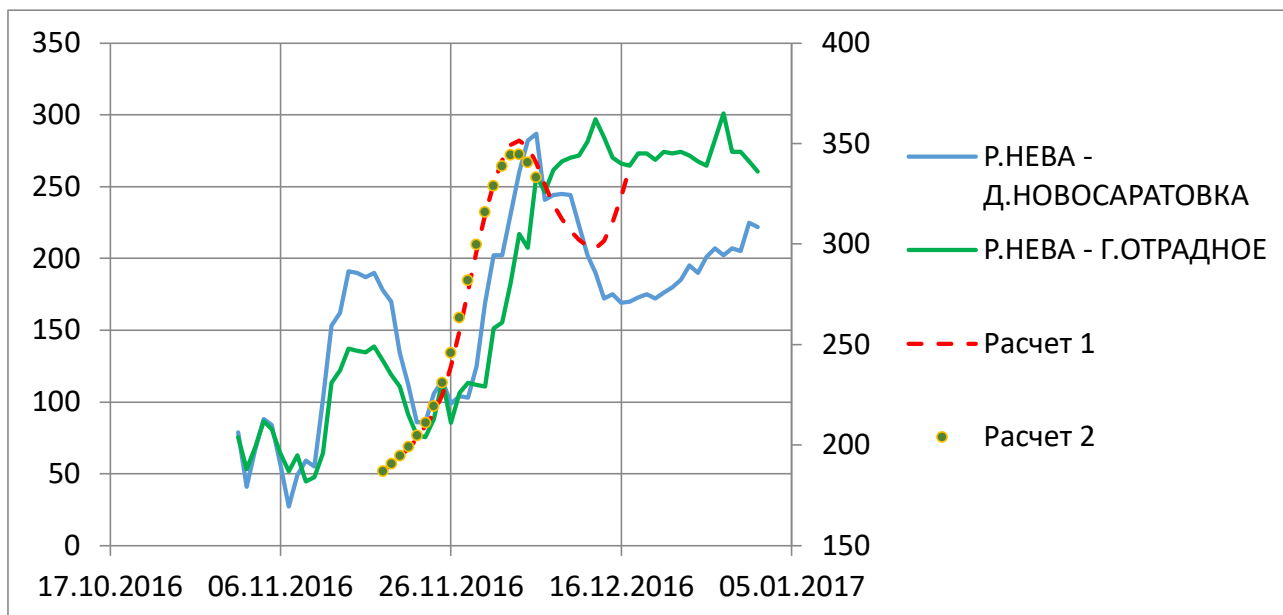


Рисунок В8. 2016 год

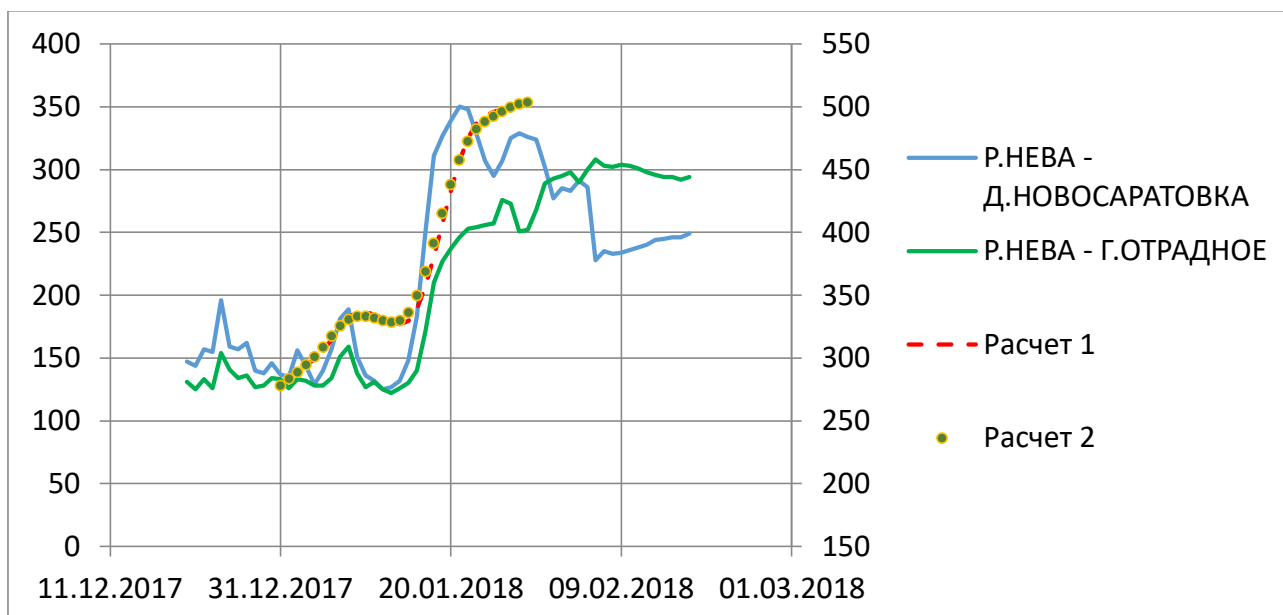


Рисунок В9. 2017 год

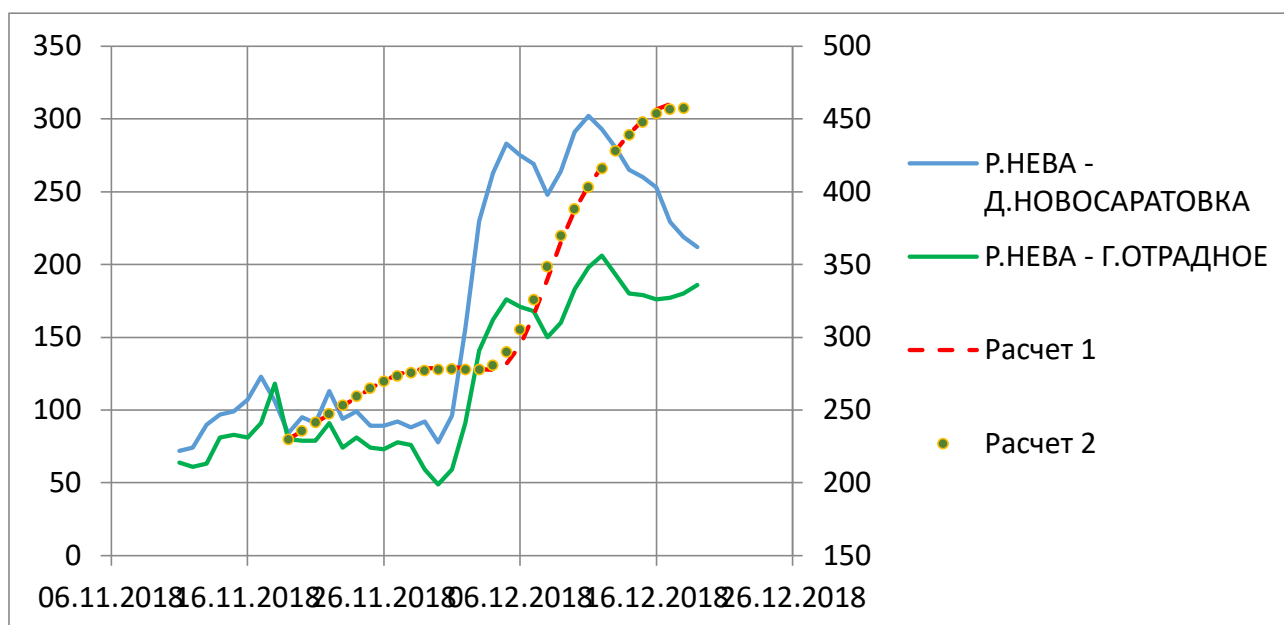


Рисунок В10. 2018 год