



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)

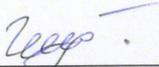
На тему Оценка динамики гидрохимических  
показателей в устье реки Лена

Исполнитель \_\_\_\_\_ Гычева Диана Игоревна  
(фамилия, имя, отчество)

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

\_\_\_\_\_ Хаустов Виталий Александрович  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_   
(подпись)

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

\_\_\_\_\_ Гайдукова Екатерина Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«30» мая 2025 г.

Санкт-Петербург  
2025

## Содержание

Введение.....	3
1. Физико-географическое описание бассейна реки Лены .....	5
1.1 Географическое положение .....	5
1.2 Геологическое строение.....	7
1.3 Почва и растительность .....	9
1.4 Климатическая характеристика .....	10
1.5 Гидрологический режим.....	11
1.6 Гидрологическая изученность.....	12
2. Гидрохимия .....	13
2.1 Минеральный состав воды .....	14
2.1.1 Кальций .....	15
2.1.2 Магний.....	15
2.1.3 Кремний.....	16
2.1.4 Аммоний.....	17
2.1.5 Нитраты .....	18
2.1.6 Фосфор общий .....	19
2.1.7 Сульфаты.....	19
2.1.8 Натрий .....	20
2.1.9 Калий .....	21
2.1.10 Хлор .....	21
3. Методика расчетов .....	22
3.1 Метод прогноза.....	22
3.1 Оценка эффективности методики прогнозирования.....	23
4. Прогноз гидрохимических показателей .....	24
4.1 Хронология.....	24
4.2 Построение связи за период .....	27
4.3 Прогноз на независимом материале .....	32
4.4 Оценка прогноза .....	34
Заключение .....	36
Список используемых источников.....	37
Приложения .....	38

## Введение

Гидрохимический сток в устье реки Лены — ключевой показатель, отражающий взаимодействие природных процессов в ее бассейне и влияющий на экосистемы Арктики. Объектом изучения является устье реки Лена, на примере данных по посту Кюсюр. Кюсюр является замыкающим створом на реке, он несет важность как для гидрологической стороны, так и для изучения океана.

Актуальность темы важна по нескольким причинам:

Устье Лены аккумулирует вещества со всей территории водосбора (около 2,5 млн км<sup>2</sup>), включая: тающие вечномёрзлые грунты – вынос органики, питательных элементов и минеральных солей; антропогенные загрязнения, хотя их влияние пока не так велико; природные геохимические процессы (выветривание пород, почвообразование). Анализ состава воды в устье позволяет оценить общие изменения в экосистеме бассейна, включая последствия климатических сдвигов.

### Влияние на Северный Ледовитый океан

Лена — вторая по водоносности арктическая река (после Енисея), ежегодно выносящая в море Лаптевых: растворенный органический углерод (DOC) и значительные объемы кремния, железа, биогенов (азот, фосфор). Эти вещества стимулируют продуктивность фитопланктона в прибрежной зоне, меняют оптические свойства воды, ускоряя таяние льда за счет поглощения солнечного тепла, влияют на баланс CO<sub>2</sub>.

Изучение химического состава воды может послужить индикатором климатических изменений:

- Рост стока DOC – связан с таянием вечной мерзлоты и усиленным вымыванием органики из почв.
- Изменение сезонности – более раннее половодье и увеличение зимнего стока из-за потепления.
- Сдвиги в ионном составе – могут указывать на изменение источников питания реки (грунтовые и поверхностные воды).

Основа для сравнения с другими арктическими реками. Данные по Лене входят в международные программы (ArcticGRO, PARTNERS), позволяя оценить вклад Сибири в изменение Арктики на фоне рек Маккензи (Канада) или Юкона (Аляска).

Эти причины дают понять ценность и важность исследований динамики гидрохимических показателей в особенности рек Арктической зоны.

В современное время, количество химических анализов и постов, на которых они проводятся выросло незначительно, и ограниченность в данных остается. Сложность заключается в том, что систематический отбор проб происходит только на крупных реках, и в год таких заборов в среднем не больше десяти. Такая ситуация не дает в полной мере оценить химический сток. В данной исследовательской работе предлагается методика прогнозирования и частичного восстановления данных концентраций химических элементов.

## 1. Физико-географическое описание бассейна реки Лены

### 1.1 Географическое положение

Река Лена принадлежит Лено-Индигирскому речному бассейну, расположенной на территории Восточной Сибири, протекает через такие субъекты Российской Федерации – Иркутская область и Республика Саха (Якутия). Длина реки – 4400 км, а площадь водосбора составляет 2,49 млн км<sup>2</sup>.

Река Лена течет с юга на северо-восток, а после города Якутск на север. Берет начало с небольшого болота, расположенного на склонах Байкальского хребта, и течет на северо-восток до Северного Ледовитого океана по территории России, впадая в море Лаптевых. При впадении в море река образует самую большую в России дельту (площадь более 30 тыс. км<sup>2</sup>), расчленённую множеством рукавов и протоков. Верховье реки расположено в горной местности, где преобладают смешанные леса, а по мере продвижения на север лесной покров становится все более разреженным, переходя в тундру. В среднем и нижнем течении реки преобладают равнинные ландшафты с мерзлыми грунтами.

Климат в регионе реки Лена континентальный и характеризуется сильными колебаниями температур в течение года. Летом температура может достигать плюс 30 °С, а зимой опускаться до минус 50 °С и ниже. Это влияет на гидрографический режим реки, так как в зимний период происходит образование льда, а весной – массовое половодье и ледоход.

Бассейн реки Лена включает множество притоков, таких как Витим, Олёкма, Алдан и Вилюй, которые собирают воды с огромной территории. Река Лена и ее притоки являются важными экосистемами, обеспечивающими среду обитания для множества видов флоры и фауны. На рисунке 1.1 представлен бассейн р. Лены, на рисунке 1.2 – снимок дельты реки.

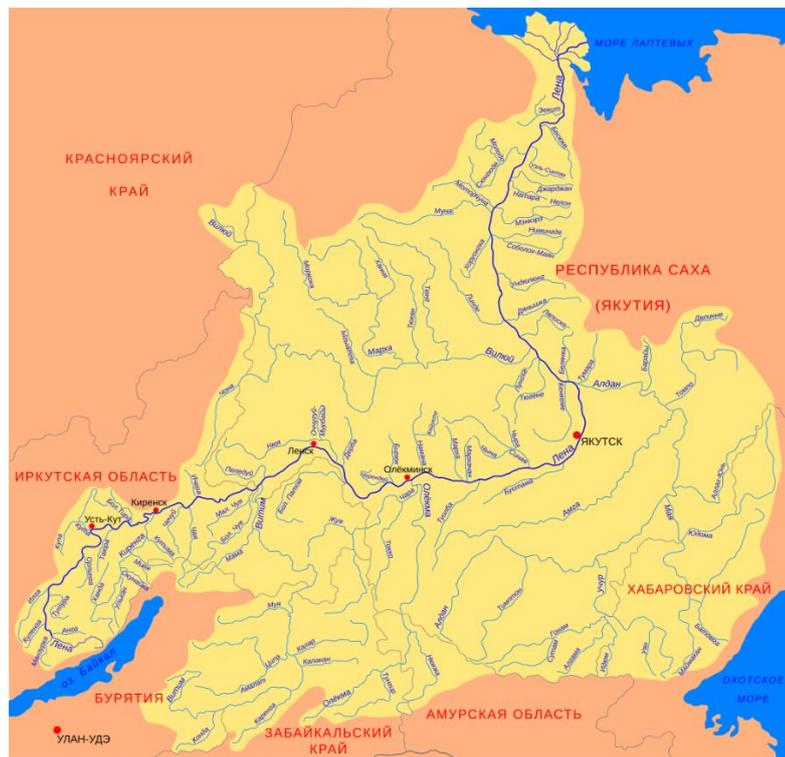


Рисунок 1.1 – Ленский бассейновый округ

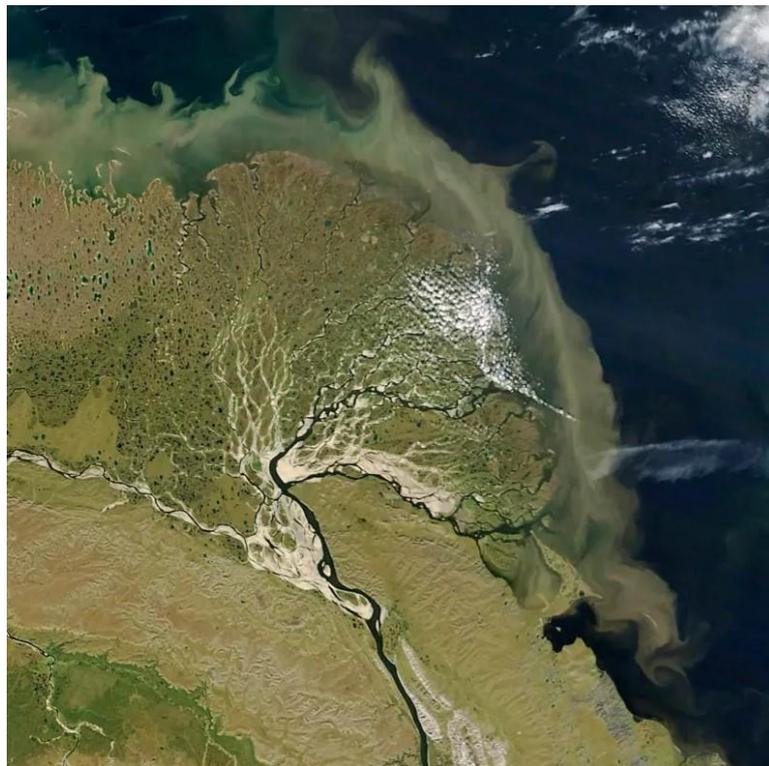


Рисунок 1.2 – Спутниковый снимок дельты р. Лена

## 1.2 Геологическое строение и рельеф

Основная площадь Восточной Сибири, где расположен бассейн реки Лена, располагается на древнейшем фрагменте континентальной коры – Сибирской платформе. На Сибирской платформе преимущественно развиты плоскогорья, пластовые плато и равнины, и только на ее окраине в южной части находится нагорье со сравнительно интенсивно расчлененным рельефом (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Физическая карта Восточной Сибири

Верховье реки Лена и большая часть бассейнов её правых рукавов расположена в горной местности Прибайкалья, Забайкалья и на Алданском нагорье. Основная часть левобережного бассейна реки расположена на Среднесибирском плоскогорье.

Рельеф вдоль реки Лена меняется от горных верховий до равнинных низовий и дельты. В процессе течения реки через разные ландшафты, рельеф тоже претерпевает значительные изменения. В верхнем течении реки, в Иркутской области, рельеф является горным.

Река Лена берет свое начало на восточных склонах Байкальского хребта, где преобладают горные массивы и возвышенности. В этом районе река текучая и быстрая, она протекает в глубоких ущельях и среди горных порогов. По мере продвижения на север, рельеф становится менее гористым и переходит в холмистую местность.

В среднем течении реки, на территории Республики Саха (Якутия), рельеф представляет собой плато, холмы и низкогорья. Здесь река Лена становится шире и медленнее, образуя излучины и водные пространства. В нижнем течении реки, где она впадает в Лаптевых море, рельеф переходит в равнинную местность с широкими поймами и болотистыми участками. Здесь река разветвляется на множество рукавов и каналов, образуя огромную дельту площадью около 45 тыс. км<sup>2</sup>. Дельта реки Лена является самой крупной дельтой в стране.

Наиболее пониженный участок реки лежит в среднем (Центрально Якутская низменность) и нижнем течении Лены. Низменность является областью устойчивого опускания и осадконакопления в мезозойское, а в центральной части и в кайнозойское время. В сложении ее участвуют преимущественно терригенные, в том числе угленосные отложения юрского, мелового и в отдельных впадинах неогенового возраста. Широко развиты четвертичные отложения – озерно-ледниковые и аллювий.

Рельеф дельты Лены состоит из низменных, в основном плоских участков с множеством островов, болот и пойм. Здесь происходит активное, образующих новые земли и изменяющих географию региона. Внутри дельты также можно встретить песчаные отмели и меловые бары, которые влияют на течение воды и формируют многочисленные каналы и рукава [3].

### 1.3 Почва и растительность

В бассейне реки Лены можно выделить несколько типов почв, которые различаются по химическому и физическому составу, структуре и другим параметрам.

Горные почвы: представлены в горных областях южной части бассейна Лены и характеризуются высокой кислотностью, низким содержанием питательных веществ и ограниченной плодородностью. В этих почвах растительный слой обычно очень тонкий и состоит преимущественно из трав и лишайников.

Тундровые почвы: распространены в северных равнинных областях бассейна Лены и характеризуются низким содержанием питательных веществ, малой плодородностью и ограниченной возможностью поддерживать разнообразную растительность. Растительность в тундровых почвах обычно представлена мхами, лишайниками, некоторыми травами и кустарниками;

Таежные почвы: представлены в северных равнинных областях бассейна Лены, где преобладает хвойный лес. Характеризуются разной степенью оподзоливания, малой тексотропностью и влажностью, повышенной засоленностью и сравнительно высоким плодородием. Растительность представлена из лиственных и хвойных деревьев, кустарников, мхов и трав.

Пойменные (аллювиальные) почвы: распространены в зонах пойм реки и характеризуются высоким содержанием питательных веществ и хорошей плодородностью. Эти почвы обычно состоят из гумуса, песка, глины и минеральных солей. Растительный покров в пойменных почвах обильно представлен травами, кустарниками, деревьями и другой растительностью.

Аллювиальные почвы покрывают пойменные террасы таких рек, как Лена, Алдана, Вилюя, Витима. Образование в понижениях рельефа солонцов, солончаков и засоленных почв связано с континентальным климатом (малое количество осадков, высокие летние температуры), наличием многолетней мерзлоты, препятствующей значительному выщелачиванию почв и удалению

из них солей, а также с богатством материнских пород карбонатами и отчасти другими солями. Наибольшую площадь засоленные почвы занимают в засушливой части Центральной Якутии [3].

#### 1.4 Климатическая характеристика

Климатическая характеристика бассейна реки Лены охватывает обширную территорию, расположенную в северо-восточной части России, в основном в Якутии. Этот регион отличается резко-континентальным климатом, проявляется это в значительных температурных колебаниях между сезонами. Зимы здесь очень холодные и продолжительные, с температурами, достигающими  $-50^{\circ}\text{C}$  и ниже, особенно в январе. Лето, напротив, короткое, но может быть довольно теплым, с температурами, превышающими  $+30^{\circ}\text{C}$  в июле.

Основными факторами, формирующими такую уникальность климата, являются удаленность региона и его изолированность от Атлантического и Тихого океанов горными системами, а также открытость перед Северо-Ледовитом океаном.

Снеговой покров формируется в конце октября и сохраняется до начала мая, что создает условия для значительного весеннего половодья. В это время река Лена и её притоки поднимаются, что связано с таянием снега и льда. Важной особенностью климата является наличие многолетней мерзлоты, которая влияет на гидрологические процессы и экосистему региона.

Осадки на территории бассейна реки распределены неравномерно, с максимальными значениями в летние месяцы, когда выпадает до 300 мм осадков. В зимний период осадки минимальны, что также способствует образованию устойчивого снежного покрова. Влияние арктических воздушных масс приводит к частым метелям и сильным морозам, особенно в северной части бассейна.

Нижнее течение реки Лены характеризуется резко континентальным климатом, с холодными зимами и коротким, но теплым летом. Температуры зимой могут опускаться до  $-40^{\circ}\text{C}$ , а летом достигать  $+35^{\circ}\text{C}$ . Ледостав начинается в конце сентября, а вскрытие реки происходит в середине мая, что приводит к значительному весеннему половодью.

### 1.5 Гидрологический режим

Для реки Лены характерен Восточно-Сибирский тип гидрологического режима. Здесь выражено весеннее половодье, которое начинается одновременно с ледоходом, значительные и резкие подъёмы уровней вод в летне-осенний период и сравнительно низкая и устойчивая межень в холодную часть года.

По характеру течения русло реки условно делят на 3 участка: первый участок – от истока до устья реки Витим; второй участок – от устья реки Витим до места впадения реки Алдан; третий участок (низовье) – от впадения реки Алдан до устья.

На среднем и нижнем течении реки преобладает снеговое питание, в верхней – дождевое. Питание реки грунтовыми водами осложнено присутствием на территории вечной мерзлоты.

Процесс льдообразования на Лене начинается с низовий, распространяясь вверх по течению, в период с 1 по 20 октября. Продолжительность ледостава в среднем 175 – 240 суток, толщина льда варьируется от 60 до 100 см. Замерзание некоторых участков сопровождается зажорами, вызывающими кратковременные подъёмы уровня воды.

За зимний период на реке образуется около 10 – 20 км<sup>2</sup> льда, что составляет 3% от ее годового стока. Летом его поступление вместе с большими объёмами паводковой воды в мелкую южную часть моря Лаптевых приводит к явлению инверсии, то есть к локальному опреснению моря и к более позднему освобождению от льда его близлежащей акватории.

Процесс разрушения ледяного покрова происходит в порядке от устья до верховья реки, и длится от 30 до 50 дней. Продолжительность весеннего ледохода составляет в среднем 4 – 6 суток.

#### 1.6 Гидрологическая изученность

Гидрологический мониторинг в пределах дельты и поймах нижнего течения Лены основан на данных, получаемых с гидрологического поста Кюсюр (площадь 2430 тыс. км<sup>2</sup>), расположенного на 70°41' северной широты и 127°24' восточной долготы перед вхождением реки в Ленскую трубу, на 145 км выше вершины дельты и в 361 км от моря, или на расстоянии 2220 км от Вилюйской ГЭС-1,2. С 1934 года на посту производятся полные гидрологические измерения. За период 1936–2023 гг. средний многолетний сток нижней Лены у с. Кюсюр составил 542 км<sup>3</sup> в сутки.

Гидрологический пост Кюсюр расположен на берегу реки Лена в одноименном селе. Правый берег поймы характеризуется заболоченностью и кустарниковой растительностью, затапливается при уровне воды 2995 см. Русло реки на участке прямолинейно устойчивое. Правый берег низкий, переходит в заболоченную лесотундру; левый берег – крутой, высотой 200 м. Весенний ледоход проходит бурно, сопровождается большими навалами льда на берегах, наблюдаются образования заторов льда. Сам пост находится на правом берегу, состоит из свай и трех реперов. Отметка нуля графика – 0,05 м абс.



Рисунок 1.4 – Пост с. Кюсюр - р. Лена.

## 2. Гидрохимия

Значительное разнообразие природных условий на водосборе реки обуславливает неоднородность химического состава ее воды на различных участках.

Основным источником питания реки, в нижнем течении, являются поверхностные воды отличающиеся малой (менее 50 мг/л) минерализацией с преобладанием ионов  $\text{HCO}_3$  и Ca. По классификации О.А. Алекина, воды реки Лены относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу. Наиболее значимая корреляция общей минерализации ( $R^2 > 0,67$ ,  $p < 0,05$ ) установлена с содержанием хлоридов и натрия. Предположительно, это связано с влиянием

на ионный состав вод реки Лены в меженный период хлоридно-натриевых подземных вод Вилюйского бассейна [4].

Роль подземных вод незначительна из-за условий вечной мерзлоты. В значительной мере состав воды на данном участке определяется составом транзитных вод с ее верхнего и среднего течений, а также вод крупных притоков (рек Вилюя и Алдана).

Содержание солей в воде меняется от 50-100 до 350-615 мг/л – в зависимости от времени года: в период половодья и зимней межени соответственно. В весеннее половодье вода содержит преимущественно ионы гидрокарбонатов ( $\text{HCO}_3$  29-37% экв.) и кальция (Ca 25-28% экв.), а также заметное количество хлоридов и натрия с калием. Во время зимней межени, особенно во второй ее половине, преобладают ионы хлора (Cl) (18-25% экв.) и натрия с калием (Na + K) (19-29% экв.). Уровень ионов магния в течение года находится в диапазоне от менее 4 до 18% экв. Значение pH воды варьируется в пределах 6,90-8,00 по всей протяженности реки, чаще всего составляя 7,20-7,80.

Для проведения химического анализа отбирают пробы воды в разные этапы весеннего половодья и летних паводков (начало, пик, спад), а также в периоды летне-осенней и зимней межени. Анализ включает в себя определение основных ионов ( $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Cl, Ca, Mg, Na + K). Кроме того, в ряде проб измеряют концентрацию биогенных веществ ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ; P, Si, Fe), окисляемость, цветность, содержание растворенных газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) и pH.

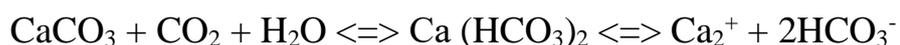
## 2.1 Минеральный состав воды

Минеральный состав является результатом взаимодействия воды ее физической формы с остальной средой: твердой (прибрежные, подстилающие и почвообразующие минералы и породы) и газообразной, включая воздушную среду и содержащиеся в ней водные и минеральные составляющие.

В рамках данного исследования ключевыми элементами минерального состава воды считаются: натрий ( $\text{Na}^+$ ), калий ( $\text{K}^+$ ), магний ( $\text{Mg}^{2+}$ ), кальций ( $\text{Ca}^{2+}$ ), аммоний ( $\text{NH}_4^+$ ), хлорид ( $\text{Cl}^-$ ), сульфат ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), нитрат ( $\text{NO}_3^-$ ), ортофосфат ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ).

### 2.1.1 Кальций

В поверхностные воды кальций попадает главным образом за счет химического разрушения горных пород и растворения минералов, особенно известняков, доломитов, гипса, а также пород, содержащих силикаты кальция, и других осадочных и метаморфических пород.



Значительное количество кальция выносится со сточными водами силикатной, металлургической, стекольной, химической промышленности и со стоками сельскохозяйственных угодий, особенно при использовании кальцийсодержащих минеральных удобрений.

В речных водах содержание кальция обычно не превышает 1 г  $\text{Ca}^{2+}$ /л.

Концентрация кальция в поверхностных водах подвержена заметным сезонным колебаниям. Весна – это период понижения минерализации, но здесь ионы кальция занимают преобладающую роль. Связано это с легкостью выщелачивания растворимых солей кальция из поверхностного слоя грунтов.

ПДКв кальция составляет 180 мг/л.

### 2.1.2 Магний

Магний также поступает в поверхностные воды посредством химического выветривания и растворения доломитов, мергелей и других минералов. Существенные количества магния могут попадать в водоемы со

сточными водами промышленных предприятий, в том числе металлургических, силикатных и текстильных. В речных водах концентрация магния варьируется от нескольких единиц до десятков миллиграммов на литр.

Концентрации магния зависят от сезонных колебаний, как правило максимальные значения наблюдаются в меженный период, а минимальные в половодье. ПДК<sub>вр</sub> ионов  $Mg^{2+}$  составляет 40 мг/л.

### 2.1.3 Кремний

Кремний является постоянным компонентом химического состава природных вод. Этому способствует в отличие от других компонентов повсеместная распространенность соединений кремния в горных породах, и только малая растворимость последних объясняет малое содержание кремния в воде.

Основными источниками кремниевых соединений в природных водах являются процессы химического выветривания и растворения кремнесодержащих минералов. Значительное количество кремния попадает в природные воды в результате разложения наземных и водных растений, атмосферных осадков, а также в результате человеческой деятельности, включая сточные воды от предприятий, производящих керамику, цемент, стекло, силикатные краски и кремнийорганический каучук.

Формы соединений, в которых находится кремний в растворе весьма многообразны и меняются в зависимости от минерализации, состава воды и значений pH. Часть кремния находится в истинно растворенном состоянии в виде кремниевой кислоты и поликремниевых кислот:



Поликремниевые кислоты имеют переменный состав типа  $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , где  $m$  и  $n$  — целые числа. Кроме того, кремний содержится в природных водах в виде коллоидов типа  $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ .

Концентрация кремния в речных водах колеблется обычно от 1 до 20 мг/л; в подземных водах его концентрация возрастает от 20 до 30 мг/л.

Низкая концентрация кремния в поверхностных водах, значительно превосходящая растворимость диоксида кремния (125 мг/дм<sup>3</sup> при 26 °С и 170 мг/дм<sup>3</sup> при 38 °С), говорит о том, что в водоемах происходят явления, снижающие его количество. Среди них — использование кремния водными жителями, например, диатомовыми водорослями, которые используют его для формирования скелета.

Поведение кремния в поверхностных водах в какой-то мере напоминает поведение азотных и фосфорных соединений, но он не оказывает ограничивающего действия на рост растений. Предельно допустимая концентрация кремния составляет 10 мг/дм<sup>3</sup>.

#### 2.1.4 Аммоний

Содержание ионов аммония в природных водах варьирует в интервале от 10 до 200 мкг/л в пересчете на азот. Присутствие в незагрязненных поверхностных водах ионов аммония связано главным образом с процессами биохимической деградации белковых веществ, дезаминирования аминокислот, разложения мочевины под действием уреазы. Основными источниками поступления ионов аммония в водные объекты являются животноводческие фермы, хозяйственно-бытовые сточные воды, поверхностный сток с сельхозугодий в случае использования аммонийных удобрений, а также сточные воды предприятий пищевой, коксохимической, лесохимической и химической промышленности.

Предельно допустимая концентрация в воде водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДКв) установлена в пределе 2 мг/л по азоту или 2,6 мг/л в виде иона  $\text{NH}_4^+$ .

### 2.1.5 Нитраты

Присутствие нитратных ионов в природных водах связано:

- С воздействием кислорода и нитрифицирующих бактерий, при котором ионы аммония превращаются в ионы нитратов;
- С атмосферными осадками, которые поглощают оксиды азота из атмосферных электрических разрядов;
- С промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами, в особенности, прошедшие биологическую очистку;
- Со стоком с сельскохозяйственных угодий и со сбросными водами с орошаемых полей, на которых применяются азотные удобрения.

Главными процессами, направленными на понижение концентрации нитратов, являются потребление их фитопланктоном и денитрофицирующими бактериями, которые при недостатке кислорода используют кислород нитратов на окисление органических веществ.

В поверхностных водах нитраты находятся в растворенной форме. Концентрация нитратов соответствует сезонным колебаниям: минимальная в вегетационный период, она увеличивается осенью и достигает максимума зимой, когда при минимальном потреблении азота происходит разложение органических веществ и переход азота из органических форм в минеральные.

В незагрязненных подземных водах содержание нитратных ионов обычно выражается сотыми, десятыми долями миллиграмма и реже единицами миллиграммов в литре.

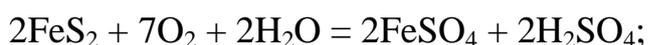
### 2.1.6 Фосфор общий

Фосфор - важнейший биогенный элемент, чаще всего лимитирующий развитие продуктивности водоемов. Поэтому поступление избытка соединений фосфора с водосбора в виде минеральных удобрений с поверхностным стоком с полей, со стоками, с недоочищенными или неочищенными бытовыми сточными водами, а также с некоторыми производственными отходами приводит к резкому неконтролируемому приросту растительной биомассы водного объекта (это особенно характерно для непроточных и малопроточных водоемов).

В соответствии с требованиями глобальной системы мониторинга состояния окружающей среды (ГСМОС/GEMS) в программы обязательных наблюдений за составом природных вод включено определение содержания общего фосфора (растворенного и взвешенного, в виде органических и минеральных соединений). Фосфор является важнейшим показателем трофического статуса природных водоемов.

### 2.1.7 Сульфаты

В поверхностных водах сульфаты образуются благодаря химическому разрушению горных пород и растворению минералов, содержащих серу, в первую очередь гипса. Также значительный вклад вносит окисление сульфидов и серы:



Существенное количество сульфатов попадает в водоемы в результате разложения органических остатков, окисления растительных и животных веществ, как в земле, так и в воде. В больших количествах сульфаты

присутствуют в сточных водах предприятий, использующих серную кислоту. Они также выносятся с бытовыми и сельскохозяйственными сточными водами.

Содержание сульфатов в воде ограничено низкой растворимостью сульфата кальция. При небольшом количестве кальция, а также в присутствии других солей, концентрация сульфатов может быть значительно выше.

Уровень сульфатов в природных водах может сильно варьироваться. В реках и пресноводных озерах он обычно находится в пределах 5-60 мг/л, в дождевых водах – от 1 до 10 мг/л. В подземных водах концентрация сульфатов часто бывает гораздо выше.

Содержание сульфатов в поверхностных водах подвержено сезонным изменениям и обычно связано с колебаниями общей минерализации. Основным фактором, влияющим на уровень сульфатов, являются изменения в соотношении поверхностного и подземного стока. Важную роль играют окислительно-восстановительные процессы, состояние живых организмов в водоеме и антропогенное воздействие. Предельно допустимые концентрации (ПДК) сульфатов составляют 500 мг/л для воды общего назначения и 100 мг/л для воды в водных объектах.

#### 2.1.8 Натрий

Натрий является одним из главных компонентов химического состава природных вод, определяющих их тип.

Основным источником поступления натрия в поверхностные воды суши являются изверженные и осадочные породы и самородные растворимые хлористые, сернокислые и углекислые соли натрия. Большое значение имеют также биологические процессы, протекающие на водосборе, в результате которых образуются растворимые соединения натрия. Кроме того, натрий поступает в природные воды с хозяйственно-бытовыми и промышленными сточными водами и с водами, сбрасываемыми с орошаемых полей.

В поверхностных водах натрий мигрирует преимущественно в растворенном состоянии. Концентрация его в речных водах колеблется от 0,6 до 300 мг/л в зависимости от физико-географических условий и геологических особенностей бассейнов водных объектов. ПДКв натрия составляет 200 мг/л, ПДКвр - 120 мг/л.

#### 2.1.9 Калий

Калий является важным элементом в химическом составе природных вод. В поверхностные воды он попадает из таких пород, как полевошпат и слюда, а также из растворимых солей. Различные соединения калия также образуются под влиянием биологических процессов, происходящих в земной коре и почве. Калий имеет свойство адсорбироваться на мелких частицах почвы, горных пород и донных отложений, а также удерживается растениями в процессе питания и роста. Это снижает его подвижность по сравнению с натрием, поэтому в природных, особенно поверхностных водах, калий содержится в меньших концентрациях, чем натрий.

В природные воды калий также попадает с бытовыми и промышленными сточными водами, а также с водой, используемой для орошения и поверхностным стоком с сельскохозяйственных полей.

Концентрация калия в речных водах обычно не превышает 18 мг/л, в подземных водах она может колебаться от миллиграммов до граммов и даже десятков граммов в зависимости от состава водоносных горизонтов, глубины залегания грунтовых вод и других факторов гидрогеологической обстановки. Предельно допустимая концентрация (ПДК) калия в воде водных объектов составляет 50 мг/л.

#### 2.1.10 Хлор

Хлор, присутствующий в воде в виде хлорноватистой кислоты или иона гипохлорита, принято называть свободным хлором. Хлор, существующий в

виде хлораминов (моно- и ди-), а также в виде треххлористого азота, называют связанным хлором. Общий хлор – это сумма свободного и связанного хлора.

Свободный хлор достаточно часто применяют для дезинфекции питьевой и сточной воды. В промышленности хлор используют при отбеливании в бумажном производстве, производстве ваты, для уничтожения паразитов в холодильных установках и т.д. При растворении хлора в воде образуются соляная и хлорноватистая кислоты:



В зависимости от условий, таких как pH, температура, количество органических примесей и аммонийного азота, хлор может присутствовать и в других формах, включая ион гипохлорита ( $\text{OCl}^-$ ) и хлорамины.

Активный хлор должен отсутствовать в воде водоемов, лимитирующий показатель вредности общесанитарный.

### 3. Методика расчетов

#### 3.1 Метод прогноза

Прогноз гидрохимических показателей строится на нахождении эмпирических зависимостей расходов от концентрации вещества.

$$X=f(Q)$$

Где X – рассматриваемый химический показатель, Q – зафиксированный расход во время отбора проб.

По полученным зависимостям выявляется уравнение, наилучшим образом описывающее полученное поле точек. Уравнение связи можно использовать, если коэффициент детерминации равен или больше 0,49.

Производится серия поверочных прогнозов на независимом материале. Эти прогнозы отдельно оцениваются на оправдываемость. Оценивается эффективность методики.

### 3.2 Оценка эффективности методики прогнозирования

Оценка точности методики основывается на анализе распределения ошибок поверочных прогнозов или на степени их соответствия установленным нормам, то есть на вероятности того, что отклонения прогнозов от реальности окажутся ниже определенных пороговых значений.

В методе ГМЦ, в качестве критерия эффективности метода служит соотношение  $S/\sigma$ , т. е. отношение средней квадратической погрешности поверочных прогнозов к квадратическому отклонению предсказываемой величины либо к ее изменению.

Мерой точности методики служит средняя квадратическая погрешность поверочных прогнозов  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\phi} - Y_{\text{пр}})^2}{n - m}}$$

где  $Y_{\phi}$  – фактическое значение величины;  $Y_{\text{пр}}$  – предсказанное значение;  $n$  – число членов ряда;  $m$  – число параметров в прогностическом уравнении.

Прогнозирование считается достаточно надежным, если точность проверочных оценок не выходит за рамки допустимого с вероятностью не ниже 10%.

Методика прогноза считается надежной, если обеспеченность допустимой погрешности поверочных прогнозов не менее чем на 10 % превышает обеспеченность вероятного отклонения предсказываемой величины от среднего. Методика считается эффективной:

при  $n \leq 15$  должно быть  $S/\sigma \leq 0,70$ ; при  $15 < n \leq 25$  должно быть  $S/\sigma \leq 0,75$ ; при  $n > 25$  должно быть  $S/\sigma \leq 0,80$ . [6]

## 4 Прогноз гидрохимических показателей

Расчеты проводились по данным с сайта ArcticGRO по посту Кюсюр для следующих химических компонентов: Натрий ( $\text{Na}^+$ ), Калий ( $\text{K}^+$ ), Магний ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Кальций ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Аммоний ( $\text{NH}_4^+$ ), Хлорид ( $\text{Cl}^-$ ), Сульфат ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Нитрат ( $\text{NO}_3^-$ ), Ортофосфат ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Кремний ( $\text{SiO}_2$ ).

### 4.1 Хронология

Построены гидрографы по ежедневным данным расходов воды, за период с 2003 по 2021 гг. На эти графики были нанесены измеренные концентрации в дни отбора проб, чтобы наглядно осветить исходные данные по гидрохимии.

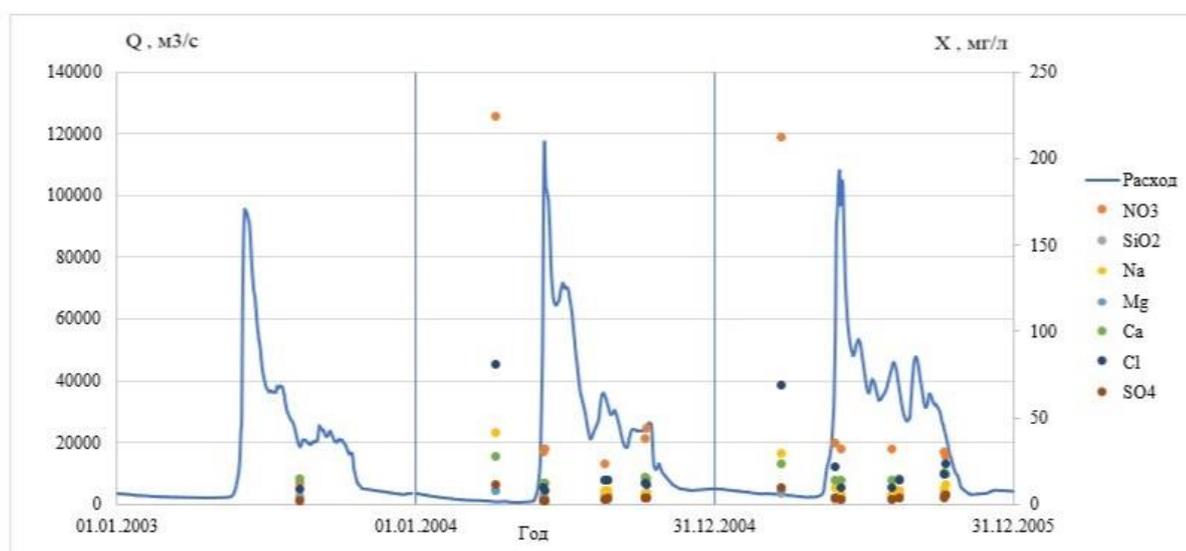


Рисунок 4.1 - Хронологический график расходов и концентраций хим. веществ (2003-2005 гг.).

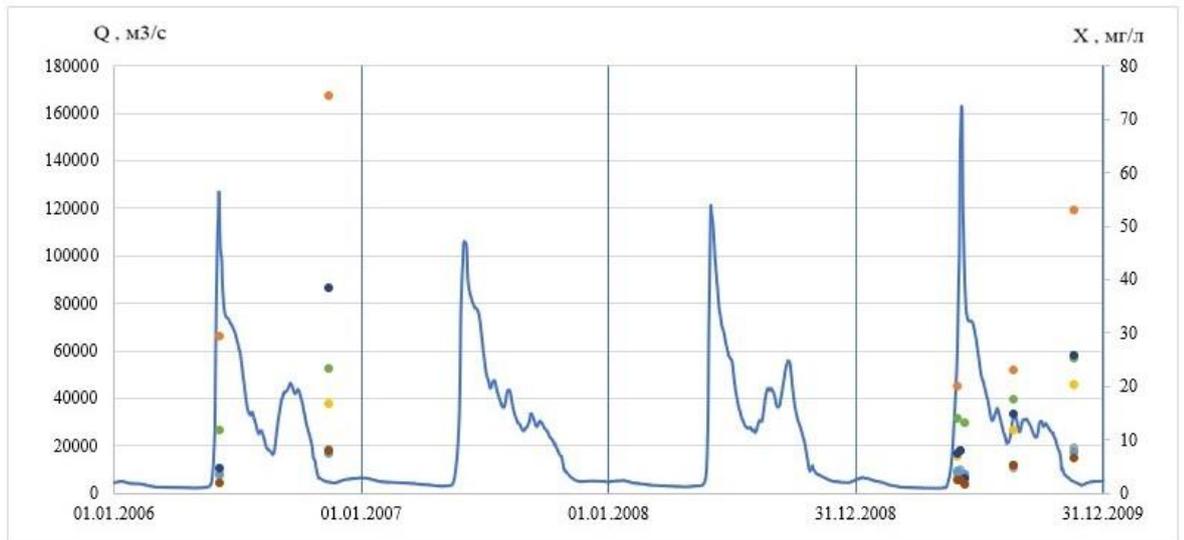


Рисунок 4.2 - Хронологический график расходов и концентраций хим. веществ (2006-2009 гг.).

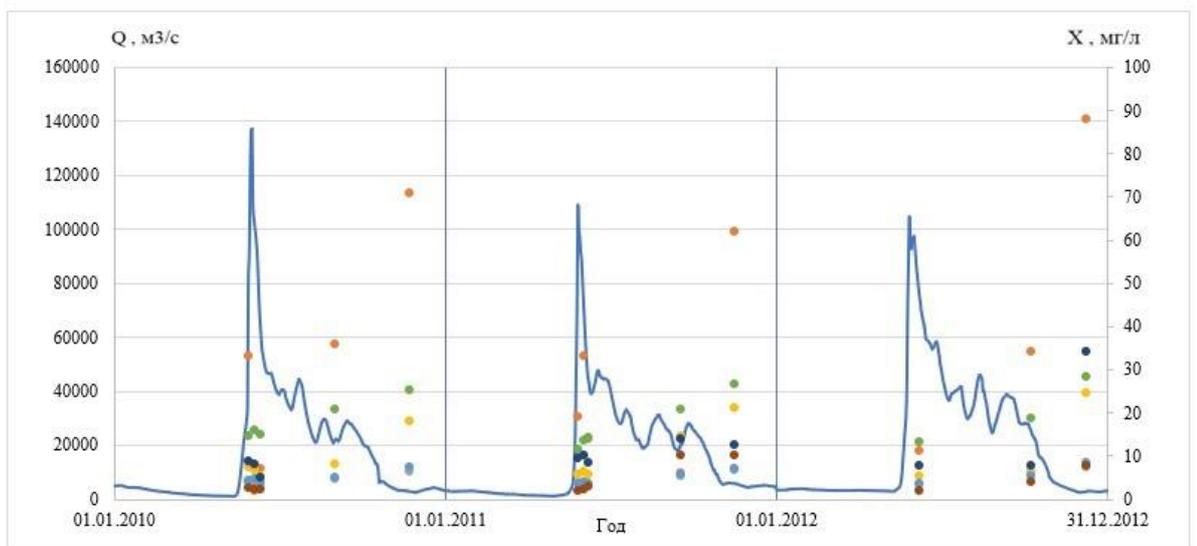


Рисунок 4.3 - Хронологический график расходов и концентраций хим. веществ (2010-2012 гг.).

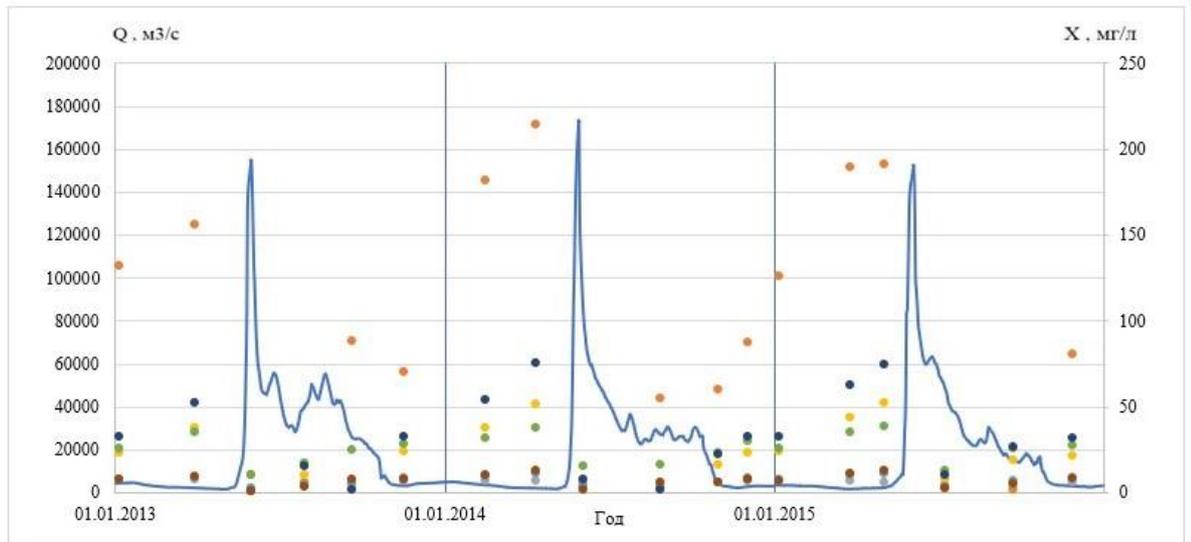


Рисунок 4.4 - Хронологический график расходов и концентраций хим. веществ (2013-2015 гг.).

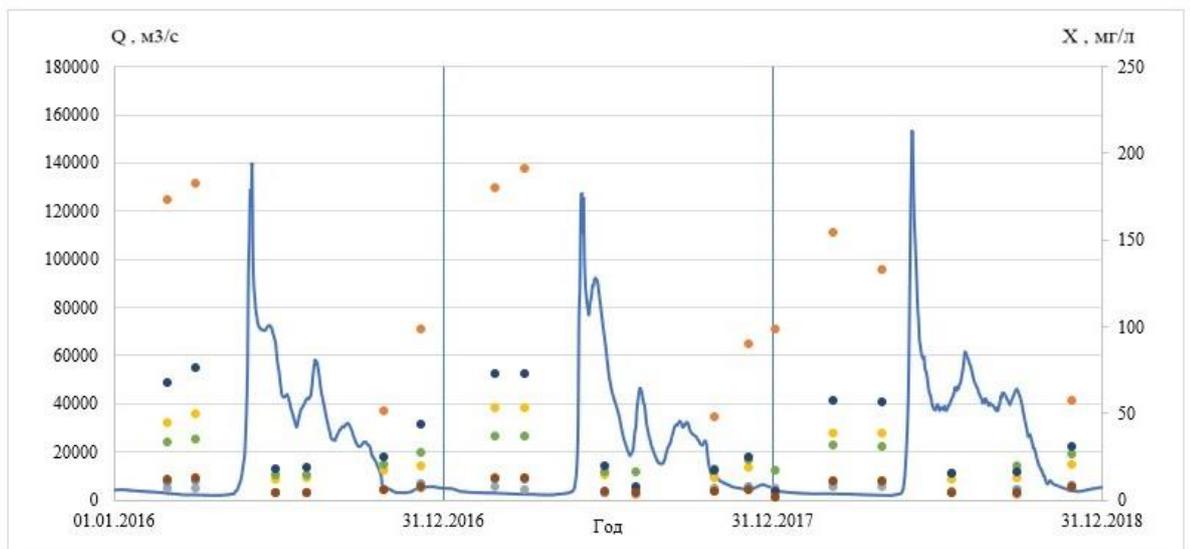


Рисунок 4.5 - Хронологический график расходов и концентраций хим. веществ (2016-2018 гг.).

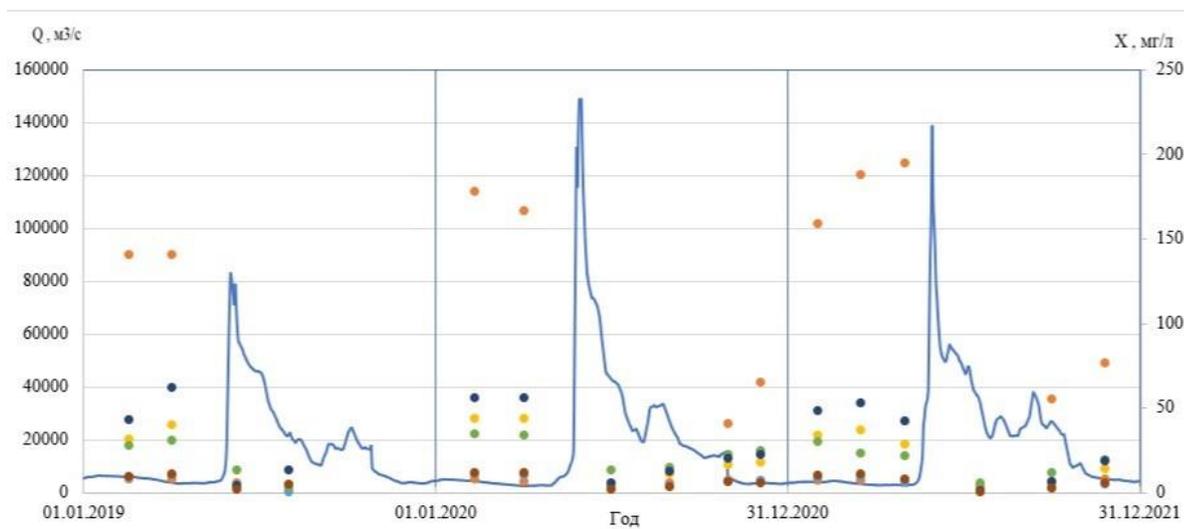


Рисунок 4.6 - Хронологический график расходов и концентраций хим. веществ (2019-2021 гг.).

#### 4.2 Построение связи за период

Для построения связи зависимости от расхода, был выбран период с 2003 по 2019 год. На рисунках также указаны уравнения зависимостей и коэффициенты детерминации (Рисунок 4.7 – 4.13). Ниже представлены графики, с выявленными зависимостями:

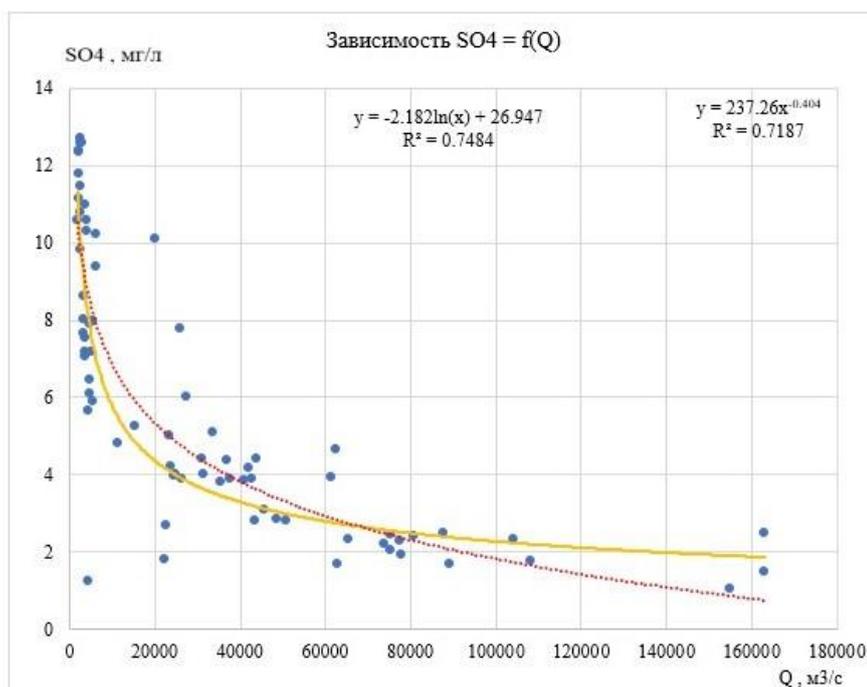


Рисунок 4.7 – График связи  $SO_4 = f(Q)$ .

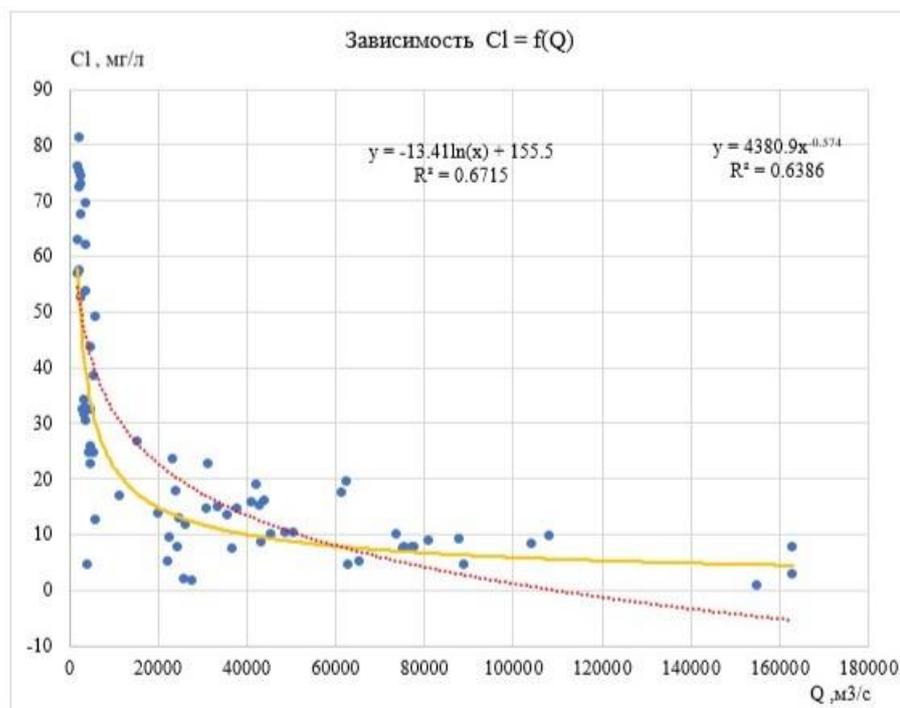


Рисунок 4.8 - График связи  $Cl = f(Q)$ .

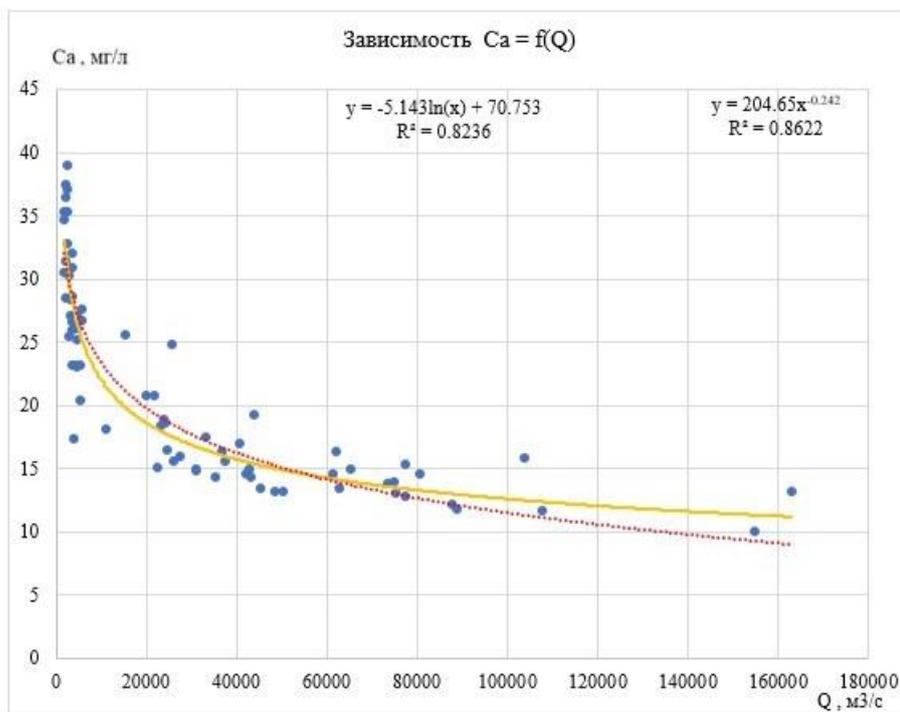


Рисунок 4.9 - График связи  $Ca = f(Q)$ .

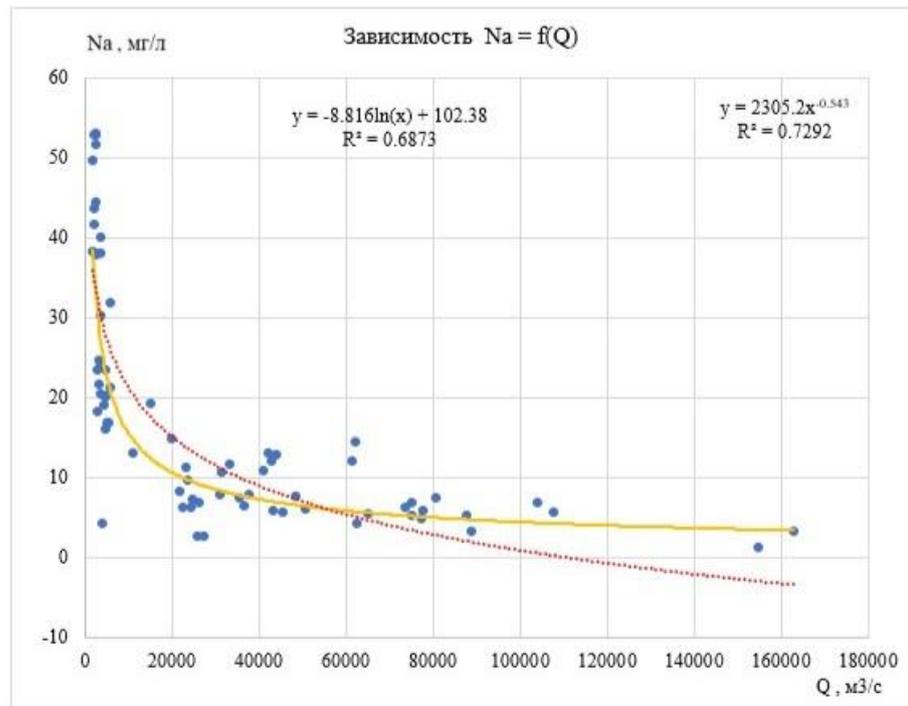


Рисунок 4.10 - График связи Na =f(Q).

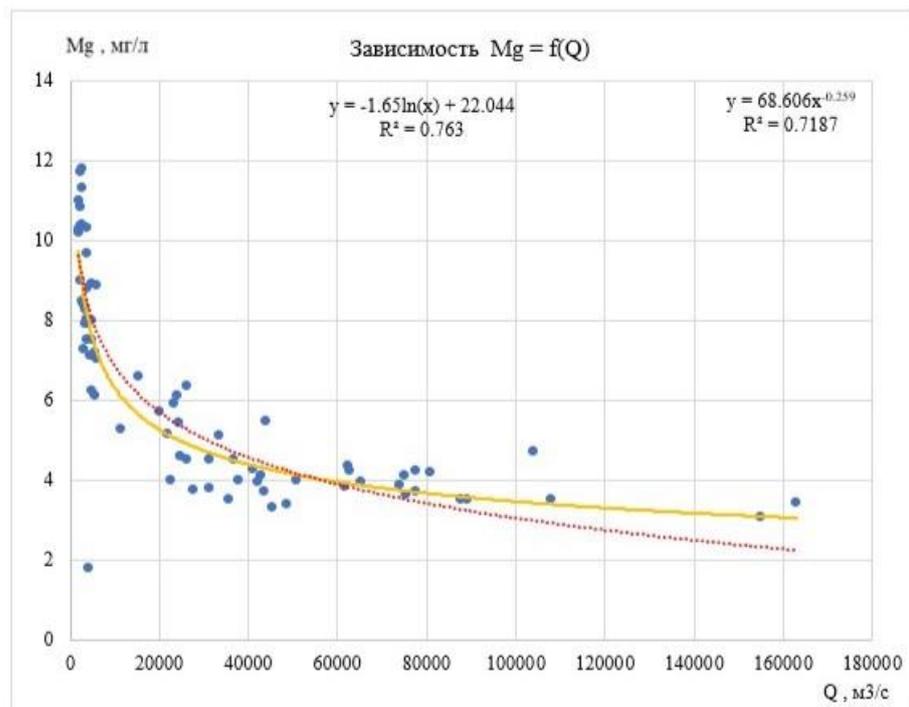


Рисунок 4.11 - График связи Mg =f(Q).

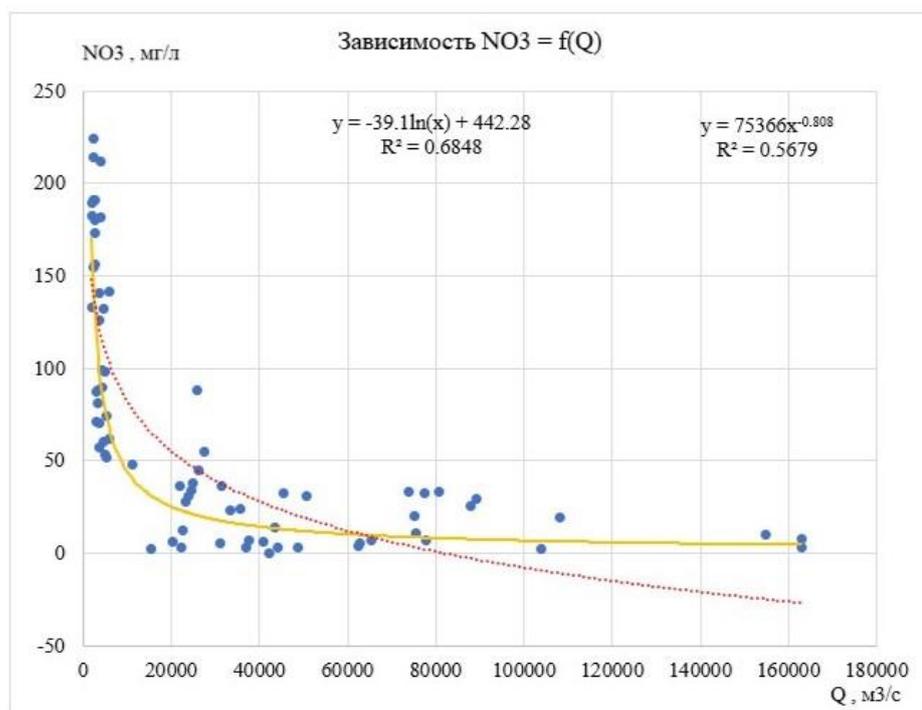


Рисунок 4.12 - График связи  $\text{NO}_3 = f(Q)$ .

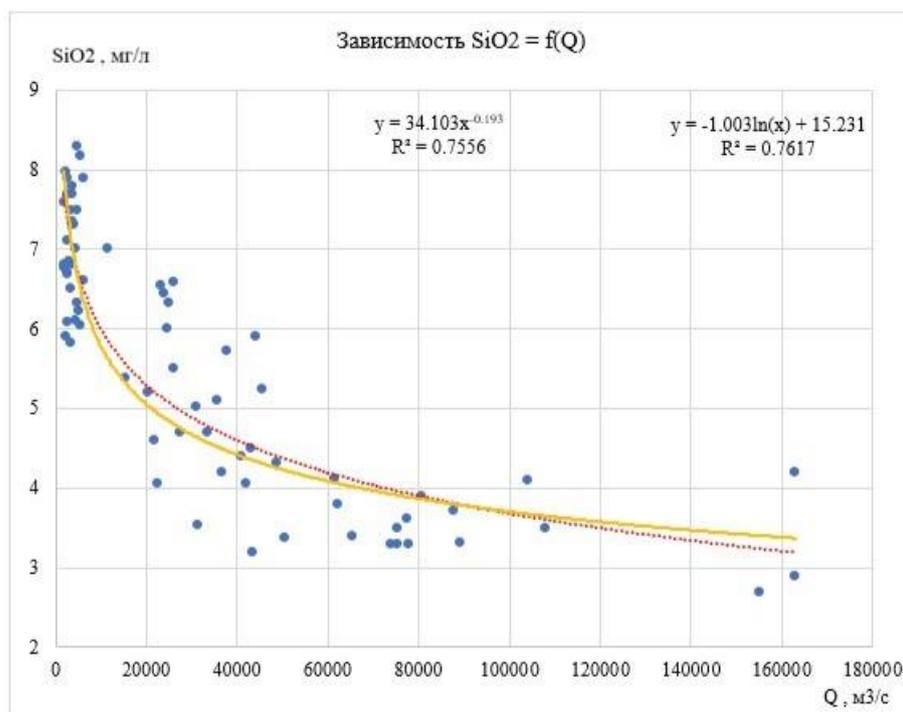


Рисунок 4.13 - График связи  $\text{SiO}_2 = f(Q)$ .

В большинстве случаев, между расходами и концентрациями веществ образуется обратная связь. Чем больше расход, тем меньше концентрация и наоборот. Для некоторых показателей связи с расходом не обнаружено, для таких как: DOC,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$  и К. Дальнейшие расчеты для них не производились.

На рисунке 4.14 представлен пример неоднозначной связи аммония с расходом воды. Остальные графики можно найти в приложении А.

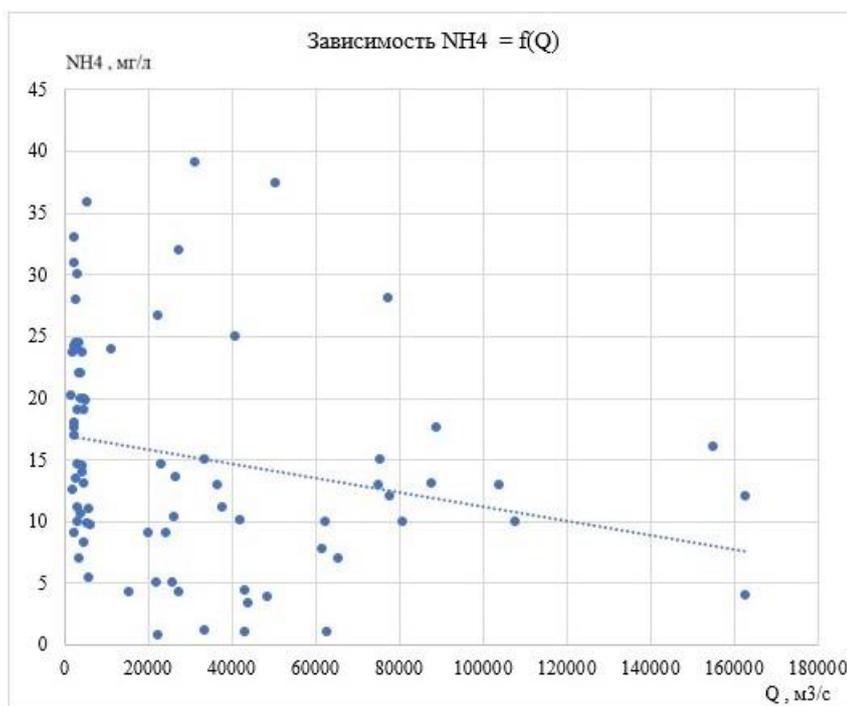


Рисунок 4.14 - График связи  $\text{NH}_4 = f(Q)$ .

Таблица № 4.1 - Коэффициенты детерминации для уравнений связи.

Зависимость	связь	$R^2$
$\text{SO}_4 = f(Q)$	Логарифмическая	0,75
	Степенная	0,72
$\text{Cl} = f(Q)$	Логарифмическая	0,67
	Степенная	0,64
$\text{Ca} = f(Q)$	Логарифмическая	0,82
	Степенная	0,86
$\text{Na} = f(Q)$	Логарифмическая	0,69
	Степенная	0,73
$\text{Mg} = f(Q)$	Логарифмическая	0,76
	Степенная	0,72
$\text{NO}_3 = f(Q)$	Логарифмическая	0,68
	Степенная	0,57
$\text{SiO}_2 = f(Q)$	Логарифмическая	0,76
	Степенная	0,76

Для всех видов связи, по представленным показателям, условие для коэффициента детерминации выполняется ( $R^2 \geq 0,49$ ).

### 4.3 Прогноз на независимом материале

Для химических данных по с. Кюсюр был произведен ряд поверочных прогнозов на независимом материале. Количество прогнозов: 7.

Результаты прогнозов представлены в виде хронологических графиков отклонений от нормы фактических и прогностических значений концентраций. Красной пунктирной линией отмечена граница ПДКв.

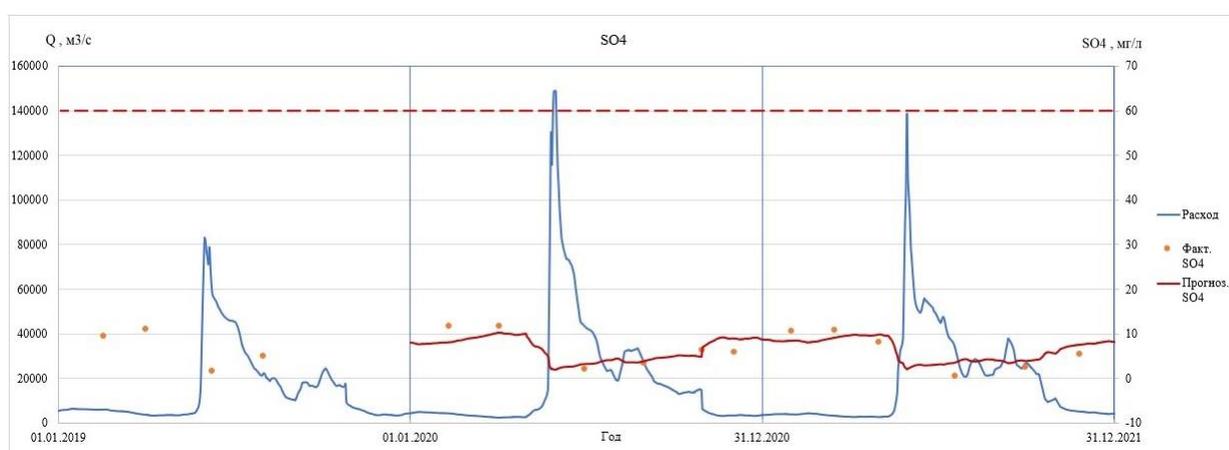


Рисунок 4.15 – Хронологический график хода фактической и прогностической концентрации  $SO_4$ .

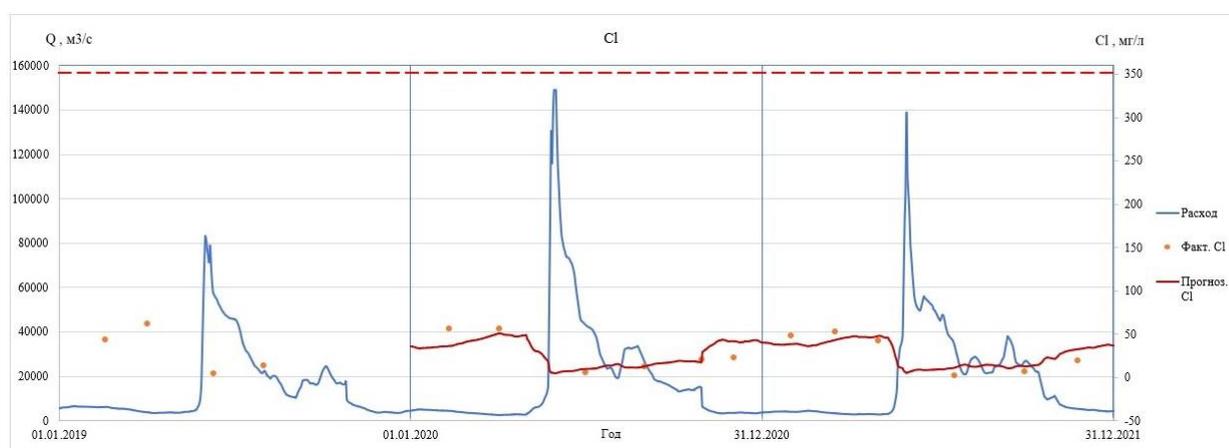


Рисунок 4.16 – Хронологический график хода фактической и прогностической концентрации  $Cl$ .

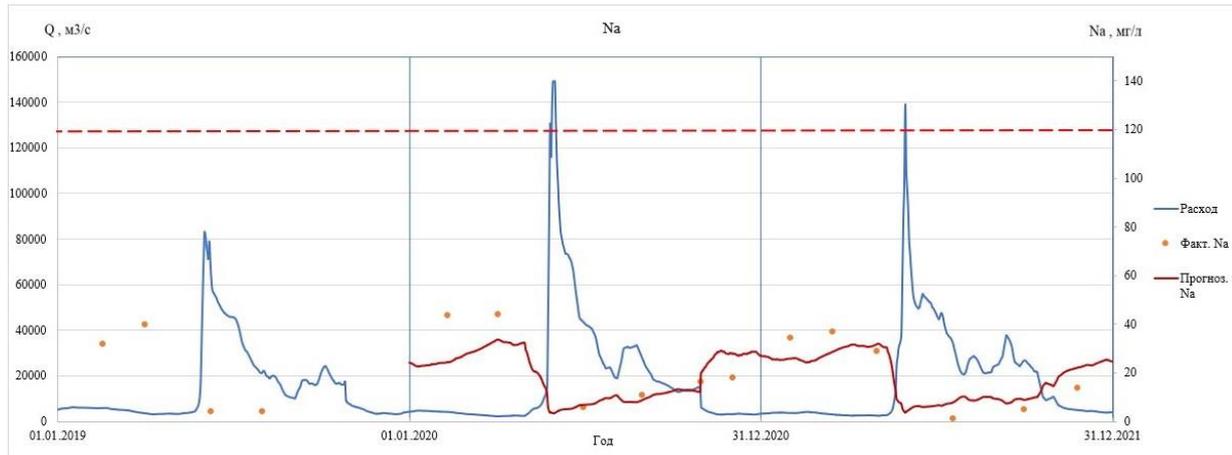


Рисунок 4.17 – Хронологический график хода фактической и прогностической концентрации Na.

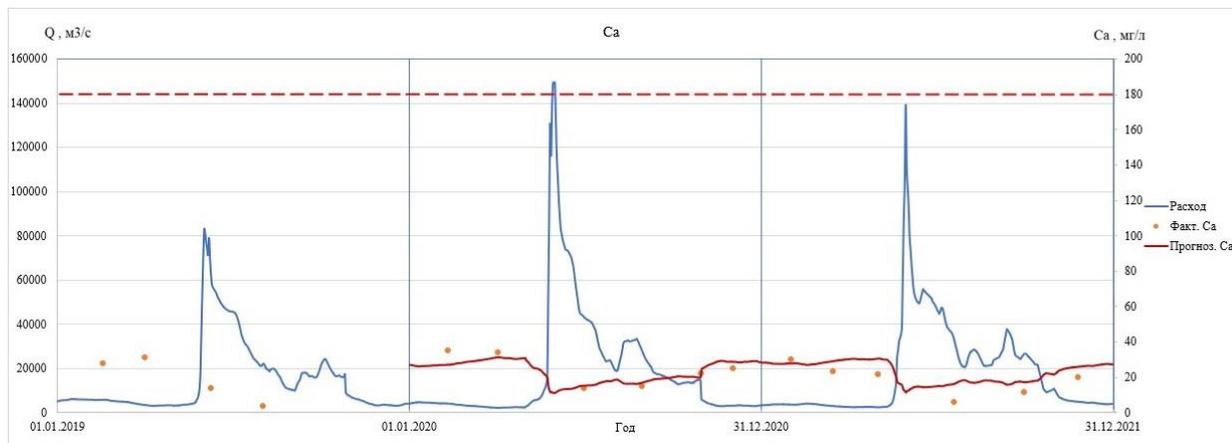


Рисунок 4.18 – Хронологический график хода фактической и прогностической концентрации Ca.

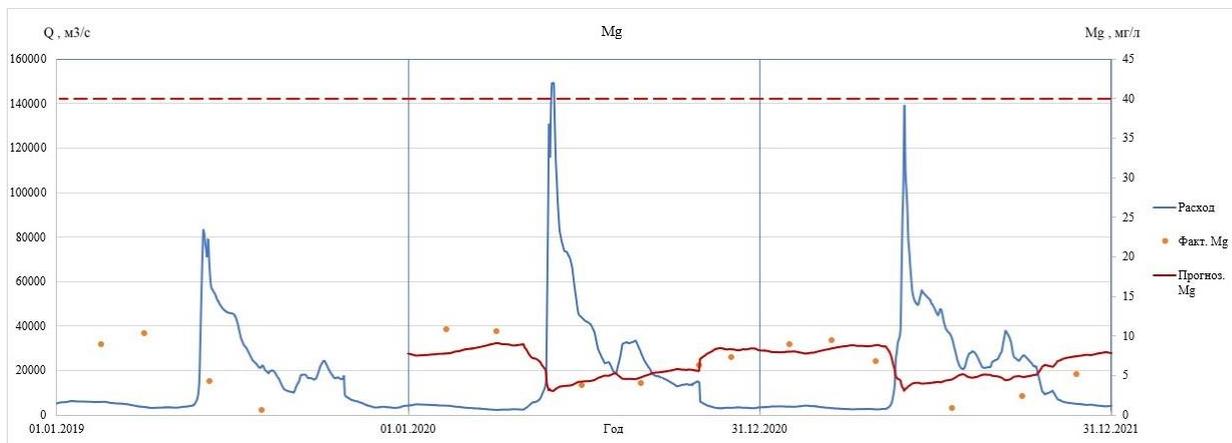


Рисунок 4.19 – Хронологический график хода фактической и прогностической концентрации Mg.

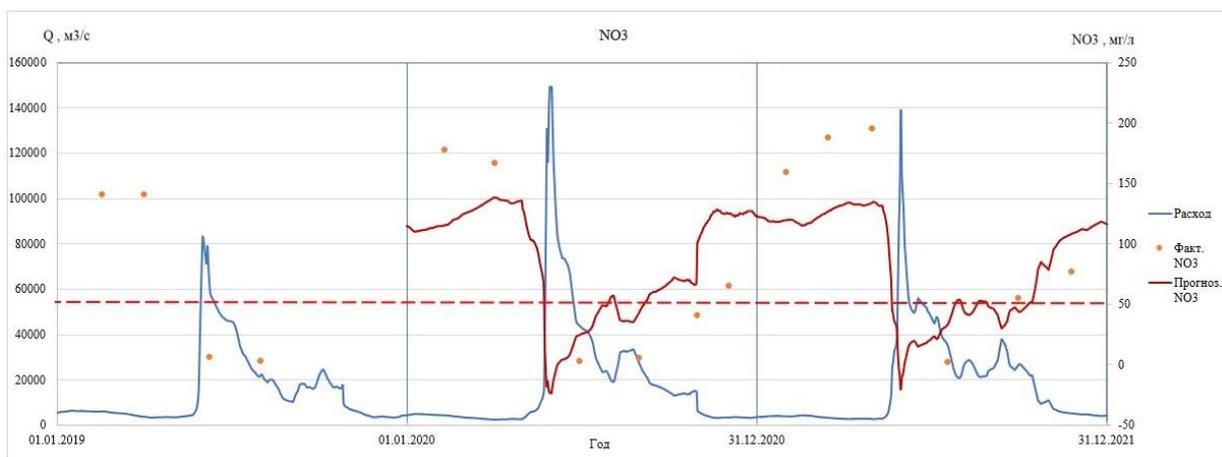


Рисунок 4.20 – Хронологический график хода фактической и прогностической концентрации  $\text{NO}_3$ .

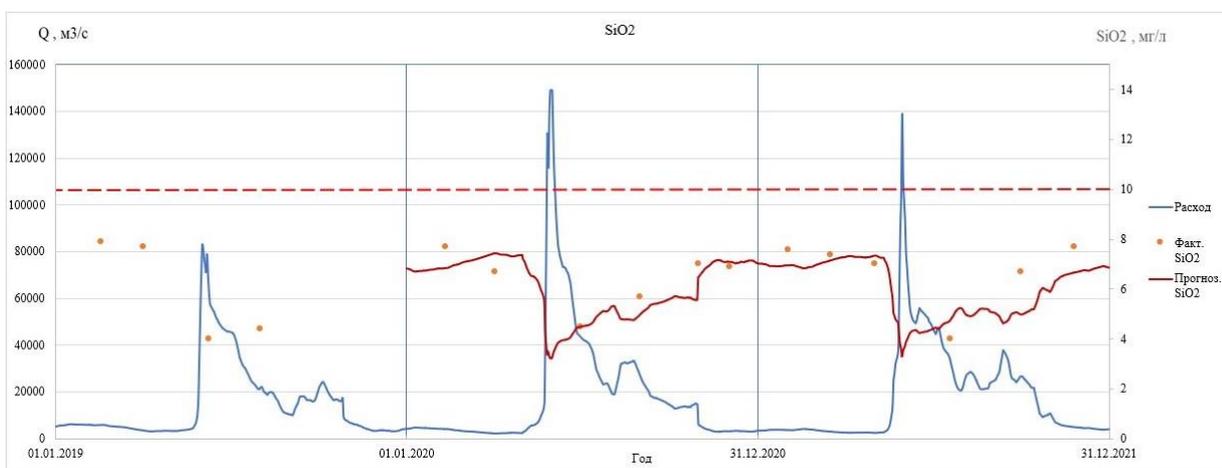


Рисунок 4.21 – Хронологический график хода фактической и прогностической концентрации  $\text{SiO}_2$ .

#### 4.4 Оценка прогноза

Поверочные прогнозы оценивались по критерию  $S/\sigma$ , результаты приведены в следующей таблице:

Таблица № 4.2 - Оценка прогноза

СВЯЗЬ	S	$\sigma$	S/ $\sigma$
Для $\text{SO}_4$			
LN	2,4	4,0	0,61
Степ	2,2		0,55

Для Cl			
LN	14,0	21,1	0,66
Степ	11,6		0,55
Для Ca			
LN	6,3	8,9	0,71
Степ	6,0		0,67
Для Mg			
LN	2,2	3,2	0,67
Степ	2,1		0,63
Для Na			
LN	9,3	15,3	0,61
Степ	8,9		0,58
Для NO <sub>3</sub>			
LN	47,8	77,4	0,62
Степ	49,7		0,64
Для SiO <sub>2</sub>			
LN	0,8	1,2	0,68
Степ	0,9		0,75

Для всех видов связи значение критерия -  $S/\sigma$ , вышло меньше 0,75 из чего можно сделать вывод, что методика прогноза оправдалась.

Данная методика краткосрочного прогнозирования рекомендуется к использованию для данного региона. В качестве прогностического уравнения можно использовать любое представленное уравнение связи.

## Заключение

В бакалаврской работе произведен прогноз стока гидрохимических показателей нижнего течения бассейна реки Лена. Анализ зависимостей: химические показатели реки от расхода имеют обратную связь, чем больше расход, тем меньше концентрация (происходит растворение вещества в воде). Полученные прогнозные значения, оценены на оправдываемость, и по результатам проверки такой прогноз можно считать эффективным.

По полученным зависимостям также были получены значения концентраций в дни, когда химический анализ не проводился, так данные можно считать восстановленными.

## Список использованных источников

1. Химические показатели / [Электронный ресурс]// ArcticGRO: [сайт]. – URL: <https://arcticgreativers.org/data/> (дата обращения: 10.02.2025).
2. Ежедневные расходы воды / [Электронный ресурс] // АИС ГМВО: [сайт]. — URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 20.12.2024).
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17. Лено-Индигирский район. – Гидрометеиздат. Л.: – 1972 год. – 651 с.
4. Основы гидрохимии. – Гидрометеиздат. Л.: – 1953 год. – 296 с.
5. Гидрохимический режим реки Лены в августе 2018 г. Статья. – А.Г. Георгиади, Н.И. Тананаев, Л.А. Духова – 2019 год.
6. Гидрологические прогнозы. – Шаночкин С.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. – СПб.: Астерион, 2017 год. – 32 с.
7. Оценка гидрохимической ситуации в поверхностных водотоках Восточной Якутии. Статья. – М.И. Ксенофонтова, П.Е. Ябловская – 2018 год.