



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(выпускная квалификационная работа)

На тему

**Использование
математических моделей
для оценки выноса
загрязняющих веществ**

Исполнитель

Козьмин Григорий Григорьевич

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Викторова Наталья Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович

(фамилия, имя, отчество)

« 12 » июль 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Физико-географическая характеристика района.....	6
1.1 Географическое положение	6
1.2 Геологическое строение и рельеф	6
1.3 Растительный покров	9
1.4 Климатическая характеристика	10
1.5 Гидрографическая характеристика.....	13
1.6 Гидрологический режим	15
2 Современные проблемы Балтийского моря и пути их решения.....	16
3 Гидрологическая модель НУРЕ	20
3.1 Настройка модели.....	21
3.2 Исходные данные	22
3.3 Процессы на поверхности земли.....	23
3.3.1 Температура	23
3.3.2 Осадки.....	24
3.3.3 Расчет жидких осадков и снегопадов.....	24
3.3.4 Испарение.....	25
3.3.5 Атмосферное осаждение.....	28
3.3.5.1. Влажное осаждение.....	28
3.3.5.2. Атмосферное осаждение на почву	28
3.3.5.3. Атмосферное осаждения на реки и озера	28
3.4 Почвенные процессы.....	29
3.4.1 Моделирование устройства почвы	29
3.4.2 Рассчитываемые переменные.....	30
3.5 Процессы в снежном покрове	31
3.5.1 Снеготаяние	31
3.5.2 Снежный покров.....	31

3.5.3	Температуры почвы и высота снежного покрова	33
3.6	Почвенная влага.....	33
3.6.1	Сток грунтовых вод.....	33
3.6.2	Инфильтрация	34
3.7	Реки	34
3.7.1	Основные понятия	34
3.7.2	Речные процессы	35
3.7.3	Притоки реки	37
3.7.4	Основная река	37
3.8	Биогенные вещества в наземных процессах.....	37
3.8.1	Источники биогенных веществ.....	39
3.8.2	Растительность и процессы на поверхности почвы.....	40
3.9	Азотно-фосфорные процессы в водоемы.....	42
3.9.1	Денитрификация.....	43
3.9.2	Первичная выработка и минерализация	43
3.9.3	Седиментация	44
4	Модель Fyris	46
4.1	Данные временных рядов	47
4.2	Данные о землепользовании в суббасейнах	49
4.3	Данные потока	50
4.4	Атмосферное осаждение.....	50
4.5	Второстепенные точечные источники	50
5	Модель ИНОЗ РАН.....	52
6	Расчет биогенной нагрузки.....	63
6.1	Исходные данные.....	63
6.2	Калибровка модели	66
6.3	Расчет нагрузки реки Селезневка.....	68
6.4	Применение модели на реках Черная и Гороховка.....	69
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	80
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	82

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БПК ₅	–	биохимическое потребление кислорода
вдхр.	–	водохранилище
ВО	–	водный объект
ГНС	–	Государственная наблюдательная сеть
НП	–	нефтепродукты
оз.	–	озеро
р.	–	река

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация водных ресурсов неизбежно сказывается на состоянии всех водных объектов. Сохранить первозданное экологическое состояние морей, рек и озер можно только с помощью рационального подхода к использованию их ресурсов. Балтийское море – не исключение в этом вопросе.

Бездумная эксплуатация природных ресурсов Балтики в прошлом привела к трагическим изменениям в жизни множества морских и прибрежных экосистем. Их последствия мы наблюдаем до сих пор. Самой главной проблемой остается эвтрофикация Балтийского моря из-за чрезмерного поступления разнообразных органических веществ.

Сегодня страны, имеющие выход к Балтийскому морю, создают множество совместных программ, призванных не допустить развития опасных ситуаций, предотвратить возникновение новых и минимизировать последствия уже случившихся бедствий. Одним из таких проектов стала Хельсинкская конвенция, подписанты которой обязуются уделять особое внимание состоянию балтийских экосистем.

Целью этой работы стала оценка эффективности расчетов биогенного загрязнения, попадающего в Балтийское море вместо с речным стоком с материковой части Российской Федерации. Были изучены программы, рекомендованные HELCOM, а именно модели HYPE и FyrisNP. С помощью этих моделей была рассчитана биогенная нагрузка со стороны реки Селазневка, а также со стороны нескольких малых рек Ленинградской области.

Исходными данными послужили расходы воды на исследуемых реках, значения непосредственного мониторинга за концентрациями органических веществ в реках, а также характеристики подстилающей поверхности исследуемых водосборов.

1 Физико-географическая характеристика района

1.1 Географическое положение

В работе рассматриваются реки северо-восточного побережья Финского залива, которое простирается от российско-финляндской границы до г. Санкт-Петербурга. Общая водосборная площадь рек, впадающих в Финский залив, составляет 5,3 тысяч км². Наиболее крупными реками являются: Перовка, Гороховка, Чёрная, Селёзневка, Сестра. Часть рек трансграничны между Россией и Финляндией.

Одной из наиболее изученных является река Селёзневка, протекающая по территории двух государств – России и Финляндии. Исток находится вблизи города Лаппенранта, устье на северном побережье Выборгского залива. Общая протяженность реки – 53 км, только 20 из которых находится на территории России. Общая площадь водосбора составляет примерно 600 км² [1]. Река обладает несколькими притоками, крупнейшим из которых является река Бусловка.

1.2 Геологическое строение и рельеф

Рельеф Северо-Запада, к которому относится Ленинградская область, разделяют на две части: северо-западная низменность и юго-восточная возвышенность. Западная часть области расположена в пределах низменности, которая дальше уходит в Эстонию и Литву. К востоку лежит Силурийское плато, а северо-восточнее уходит Лужская возвышенность.

На севере располагается Центральная Карельская возвышенность, сложенная моренными отложениями.

Ордовикское плато, расположенное между рекой Нарвой и рекой Сясь, является плоской возвышенной равниной. Его наиболее приподнятая западная

часть именуется Ижорским плато. Сложено плато известняками и доломитами, в которых активно развиваются карстовые процессы. Северный край ограничен глинтом, высота которого меняется от 50 метров в западной части до 15 метров на востоке. За глинтом начинается предглинтовая низменность.

Возвышенности Северо-запада, например, Лужская, являются ледниковыми образованиями и сложены моренными отложениями. Эти ледниковые образования приурочены к разным стадиям Валдайского оледенения. Состоят возвышенности из разнообразных холмов и гряд, высота которых варьируется от 100 до 150 метров [1].

Низменности рельефа располагаются в основном на севере, западе и в центральных областях региона. Сюда входят: Вуоксинская низменность, Предглинтовая низменность, низменности Ладожского и Онежского озер, Приильменная низменность, Псковско-Чудская низменность. Отметки высот в этих районах варьируются от 0 до 50 метров, изредка опускаясь ниже нуля.

Выделяется также Прибалтийская низменность. Она наделена густой сетью рек и разнообразных водоемов. Долины рек залегают очень неглубоко и лишь изредка могут врезаться в поверхность на глубину до 50 метров. В низменностях характерно образование болот.

Возвышенная часть Северо-Запада расположена в восточных и южных районах. Возвышенность окаймляет Балтийскую низменность. Граница эта протягивается от Онежского озера до западных границ России, где дальше уходит в Беларусь. Эти возвышенности являются границей древнего ледника и приурочены к карбонному плато. Сложено плато в основном из известняков. Состоит возвышенность из холмов и гряд, которые разделяются множеством долин и рек. Средние отметки высоты составляют 100 – 200 метров. Для этих районов характерны карстовые процессы, выражающиеся во множестве оврагов, долин, рек и озер.

Северо-запад почти полностью находится на территории Русской платформы, которая состоит из дочетвертичных осадочных пород. Лежат эти породы на кристаллических протерозойских структурах, а сверху покрыты слоем

четвертичных отложений. Однако на севере наблюдаются выходы Балтийского щита, чьи структуры сложены разнообразными гнейсами и сланцами.

Коренные осадочные породы сложены палеозойскими отложениями, в основном кембрием, ордовиком, силуром и девонем. Эти слои под углом 15 градусов погружаются под более молодые породы в направлении юго-востока.

Ордовикское плато сложено известняками и доломитами, мощность которых примерно 150 метров. Глинт, обрывающий плато на севере, обнажает кембрийские глины, лежащие в основании возвышенности.

К востоку от Ордовикского плато лежит регион, сложенный девонскими отложениями. Этот район занимает примерно 60% от всей площади Северо-запада. Данные отложения делятся на два слоя: Верхний девон и средний. Отложения верхнего девона состоят в основном из известняков, а средний слагают доломиты и мергели. Общая мощность этих слоев составляет 350 - 450 метров [1].

На рисунке 1.1 представлена геологическая карта Северо-западного региона.

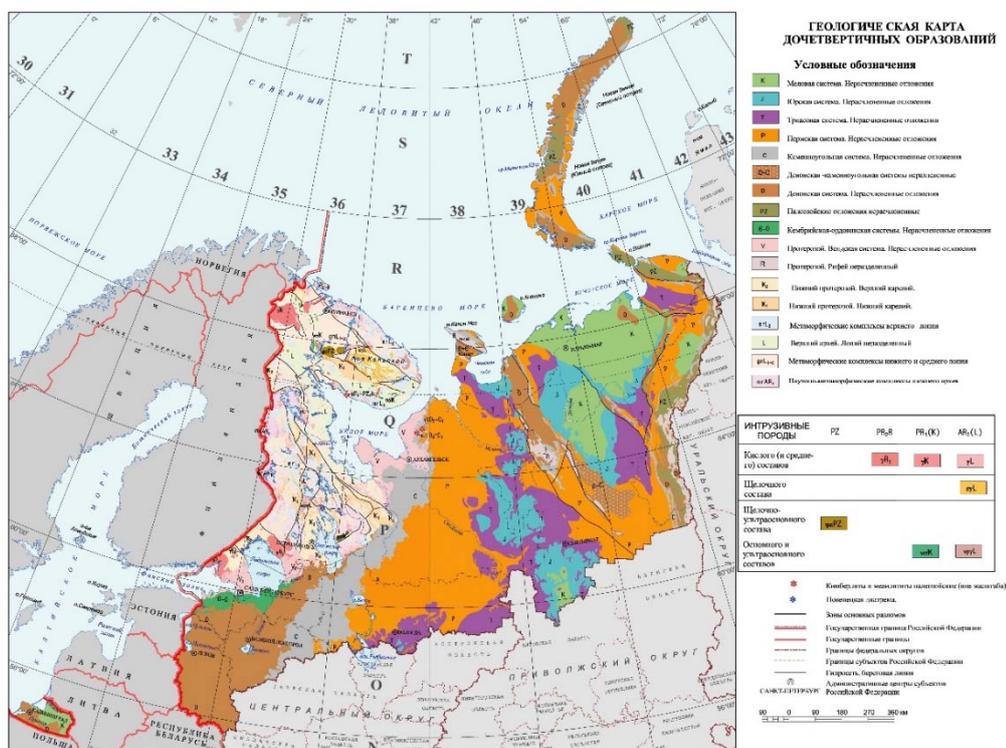


Рисунок 1.1 – Геологическая карта Северо-Западного региона

На востоке находится Карбоновое плато, сложенное породами каменноугольного периода. Отложения карбона делятся на нижний и средний ярус. Породы нижнего карбона состоят из известняков и доломита, средний карбон представлен теми же породами. Мощность нижнего карбона достигает 95 метров, мощность среднего колеблется от 12 до 80 метров. В этих породах часто встречаются карстовые явления [1].

На территории Северо-запада палеозойские породы перекрываются четвертичными отложениями, мощность которых варьируется от 0.5 до 200 метров. В большинстве своем это разнообразные ледниковые образования, однако наблюдаются и постледниковые структуры. Древнейшим четвертичным отложением на этой территории считается московская морена. На ней покоятся разнообразные позднеледниковые песчано - глинистые отложения. Завершается разрез постледниковыми и современными отложениями.

На обозначенной территории очень часто встречаются карстовые процессы. В число закарстованных пород входят: известняки, доломиты, мергели и гипсы. В основном карст локализуется на Ордовикском и Карбоновом плато.

1.3 Растительный покров

Северо-запад расположен в южной подзоне тайги, однако на севере небольшие территории попадают в зону средней тайги, а на юге есть области, относящиеся к зоне смешанных лесов. Леса занимают почти половину всего региона.

Севернее Пскова в основном встречаются хвойные массивы с редкими примесями лиственных пород, например, березы, ольхи или осины. Леса обладают обильным надпочвенным покровом из мхов. Также широко распространены заболоченные еловые массивы. В долинах встречаются ельники, обладающие густым травяным покровом.

На супесчаных почвах часто можно встретить сосновые леса, на песках сформировались боры – беломошники с преобладанием брусники и вереска.

Не редко можно встретить смешанный лес, состоящий из ели и сосны с редкими вкраплениями лиственных деревьев [2].

Лиственные породы Северо-Запада представлены в основном березой, ольхой и осиной, однако на юге встречаются широколиственные породы: липы, дубы, ясени и вязы. Очень редко встречаются дубравы. Из-за сельскохозяйственной деятельности, вырубок и пожаров местами начали формировать природные сообщества, состоящие из мелколиственных пород, местами такие формирования полностью заменяют собой изначальный хвойный лес [2].

Освоение региона заметно отобразилось на лесистости региона. Можно проследить четкую взаимосвязь между заселенностью и залесенностью территории. Таким образом, на западе леса постепенно отступают, а северные территории практически полностью покрыты лесом.

Значительные территории заняты разнообразными культурными видами растительности. Под распашку отдано около 12% всей территории. На западе процент пашен может достигать до 30%, а на севере и востоке обычно не превышает 1 – 5%.

1.4 Климатическая характеристика

Большая часть региона обладает умеренно континентальным климатом, а на побережье Балтийского наблюдаются элементы морского климатического режима. Все это приводит к теплоте и дождливости лета и относительно мягкой зиме.

На Северо-Запад оказывают влияния и арктические воздушные массы, и те, что приходят с юга, а также морские течения. Следствием постоянной смены доминирующих факторов является непостоянность погодных и климатических условий данного региона.

Радиационный баланс

На территории Северо-Запада значение годового радиационного баланса составляет 32 – 35 ккал/кв. см. Эти показатели составляют примерно 40% от суммарной радиации. Период положительного периода радиационного баланса длится от третьей декады марта до первой декады ноября. Максимальные значения радиационного баланса наблюдаются в июне, достигая отметки в 7 – 8.5 ккал/кв. см. Минимальные отметки зарегистрированы в декабре и равны 0.5 – 1.2 ккал/см² [1].

Температура воздуха

Средняя годовая температура воздуха колеблется от 2 до 4 градусов. На островах Финского залива средняя температура может превышать 5 градусов.

Самым холодными месяцами является январь и февраль. Средняя температура составляет около минус 7 на западе региона и минус 11 на востоке.

Абсолютный минимум на территории Псковской и Новгородской областей достигает минус 52, на территории близ Финского залива температура никогда не опускалась ниже минус 48, на побережье Ладожского озера ниже минус 34.

Самым теплым месяцем является июль, средняя температура которого 16 – 17 градусов. Абсолютный максимум составляет 36 градусов [2].

Весна в регионе наступает в момент, когда среднесуточные температура переходят через нулевую отметку. Обычно это происходит в середине апреля. С момента наступления положительных средних температур до разрушения постоянного снежного покрова проходит около 7 – 10 дней. Для весны характерно частое возвращение холодов, а иногда и новое установление постоянного снежного покрова, однако к концу апреля вся территория освобождается от снежных масс [1].

За начало лета принимается момент перехода средних температур через 10 градусов. Для основной части Северо-Запада это середина мая. Обычно лето продолжается примерно 3.5 месяца. Для начальных этапов характерны заморозки. Средняя температура составляет 15 градусов.

Осень наступает в второй декаде сентября, однако на островах Финского залива она откладывается до третьей декады. Продолжается осень примерно 2 месяца.

Зима наступает конце октября – начале ноября. Первая половина зимы характеризуется ненастной погодой, выпадением большого количества осадков. Средняя температура зимнего периода обычно составляет примерно -5 градусов. Первый снежный покров регистрируется в конце октября, однако держится он очень недолго. В среднем зима продолжается 3 месяца [2].

Из-за географического расположения регион обладает большой изменчивостью циркуляционных процессов, которые могут привести к тому, что в отдельные годы погодные условия могут разительно отличаться от средних показателей.

Осадки

Северо-Запад относят к избыточной зоне увлажнения. Это связано с большим приходом тепла и хорошо развитой циклонической деятельностью.

На характер распределения осадков оказывают большое влияние подстилающие поверхности, именно из-за них регион отличается отсутствием плавного изменения осадков.

В среднем в регионе выпадает 600 – 750 мм осадков. На территории Северо-Запада прослеживается изменение количества осадков с юго-запада на северо-восток.

Минимальная сумма осадков в регионе 600 мм осадков отмечается близ Онежского и Ладожского озер. Также уменьшение количества осадков отмечается при дальнейшем продвижении на юг, в среднем здесь выпадает менее 700 мм, а в низовьях реки Великой бывает менее 650 мм.

Наибольшие суммы наблюдаются на Валдайской возвышенности, где они достигают 800 – 900 мм [1].

Снежный покров

В среднем снежный покров на территории региона составляет 140 – 200мм, а в районах, расположенных у крупных водоемов, уровень может опуститься до 100мм. Держатся снежные массы примерно 110 дней. Таяние покровов начинается в конце марта, окончательно снег пропадает к середине апреля, однако эти сроки могут сильно колебаться [1].

1.5 Гидрографическая характеристика

Северо-Западный регион и Южная Карелия имеют развитую гидрографическую сеть, относящуюся к бассейну Балтийского моря. Средняя густота сети составляет 0.56 км/км². Причинами наличия большого количества рек, озер и болот служит избыточная увлажненность региона и его геологическая история.

Главной водной артерией региона служит река Нева, площадь общего водосбора которой составляет 281 000 км². Нева имеет обширную долину, именуемую Приневской впадиной или Приневской низменностью. Русло сложено песчаными грунтами. Средняя ширина реки – 500 м, глубина – 10 м, скорость течения 1 м/с.

Реки Южной Карелии, к которым относится и Селезневка, приурочены к тектоническим рвам в теле Балтийского кристаллического щита, смягченным последующим воздействием ледника. Ледниковые процессы также создали особый характер протирания карельских рек. Особенно заметно северо-западное протирание многих речных потоков.

Общее количество рек в Карелии и на Карельском перешейке составляет 26700. Общая их протяженность примерно равна 83000 км. Длина каждой реки в среднем составляет 10 км.

Реки Карелии и Карельского перешейка, не смотря на малую протяженность, имеют достаточно большие водосборы. Их размеры обусловлены большим количеством озер и болот. Этим же можно объяснить особый гидрологический режим многих карельских рек.

Водоразделы рек Карелии обычно значительно приподняты, что в комбинации с близко расположенными базисами эрозии, приводит к значительному падению рек. Выражается это большим количеством разнообразных порогов.

Водоразделы карельских рек узки и заболочены. Это создает благоприятные условия для переброски стока из одного бассейна в другой в периоды повышенных расходов воды.

Большинство рек Северо-Запада и Южной Карелии, так или иначе, несут свои воды в Финский залив, формируя тем самым биогенный сток, поступающий не только в залив, но и во все Балтийское море.

Река Гороховка. По данным государственного водного реестра России, река относится к Балтийскому бассейновому округу, к речному бассейну Невы (включая бассейны рек Онежского и Ладожского озер), к речному подбассейну – Нева и реки бассейна Ладожского озера (без 0.1.04.01 и 01.04.02, российская часть бассейнов), к водохозяйственному участку – реки и озера бассейна Финского залива от границы РФ с Финляндией до северной границы бассейна р. Нева.

Река берет свое начало из озера Александровское (Хатьялахден-ярви), впадает в Выборгский залив в районе поселка Советский. Длина реки составляет 30 км, площадь водосборного бассейна – 731 км².

Река Черная (Гладышевка, Ваммелсун-йоки). По данным государственного водного реестра России, река относится к Балтийскому бассейновому округу, к речному бассейну Невы (включая бассейны рек Онежского и Ладожского озер), к речному подбассейну – Нева и реки бассейна Ладожского озера (без 0.1.04.01 и 01.04.02, российская часть бассейнов), к водохозяйственному

участку – реки и озера бассейна Финского залива от границы РФ с Финляндией до северной границы бассейна р. Нева.

Вытекает из Гладышевского озера и, сливаясь с Рошинкой на территории посёлка Серово (Курортный район Санкт-Петербурга), образует Чёрную речку. Водосбор имеет среднехолмистый рельеф. Относительная высота холмов – 20 – 45 м. Грунты преимущественно супесчаные и песчаные. Водосбор покрыт сосновыми лесами, луга встречаются небольшими участками по берегам.

Долина реки слабообработанная, трапецеидальная. Склоны долины умеренно пересеченные, в основном высотой от 3 до 10 м. Сложены склоны супесями и песками, покрыты смешанным лесом. Пойма прерывистая, на некоторых участках отсутствует. Грунт песчаный и супесчаный, местами суглинистый, на заболоченных участках торфянистый. Покрыта пойма лугами с кустарником. Весной пойма затопляется слоем воды 0.1 – 1.5 м, вода на пойме стоит 2 – 5 дней, а на заболоченных участках – 10 – 15 дней.

1.6 Гидрологический режим

На реке Селезневка в настоящее время действует всего один гидрологической пост, расположенный в поселке Лужайка Селезневского сельского поселения Ленинградской области.

Большинство рек Северо-Запада и Карелии являются равнинными. Для них характерно смешанное питание с преобладанием снегового. В годовом цикле ярко выражены четыре фазы: весеннее половодье, летне-осенняя межень, изредка прерываемая дождевыми паводками, и зимняя межень, которая может быть прервана оттепелью.

Весеннее половодье обычно начинается в конце марта-начале апреля и длится примерно 2 месяца. Летне-осенняя межень начинается в июне и длится до ноября. Зимняя межень совпадает с календарной зимой и продолжается до вскрытия рек.

2 Современные проблемы Балтийского моря и пути их решения

Балтийское море, куда несут свои воды многие реки Северо-Запада и Южной Карелии, имеет весьма ограниченный водообмен с Мировым океаном из-за своего особого географического расположения. Кроме того, Балтийское море окружено передовыми промышленными странами, чьи города, расположенные на побережье, сбрасывают сточные воды прямо в море или в реки, впадающие в него. Все это приводит к колоссальной антропогенной нагрузке [3].

Воды Балтики сильно загрязнены. Эта ситуация уже не одно десятилетие вызывает опасения всех водопользователей Балтийского моря. Опасения включают в себя вопросы эвтрофикации, загрязнения токсичными веществами, металлами, органикой. Причинами этого загрязнения являются сбросы сточных вод городов и предприятий, смыв с сельскохозяйственных угодий токсичных удобрений, судоходство, аварии техногенного характера, захоронения разнообразных токсичных отходов, а также повышенная плотность населения вдоль береговой линии [4].

Сочетание всех этих опасных факторов может, рано или поздно, привести к катастрофическим последствиям и для многочисленных морских обитателей, и для всей экосистемы в целом.

С 80-ых годов прошлого века многие страны региона предпринимают разнообразные меры по восстановлению экосистем Балтики. Уже в середине 90-ых годов 20-го века состояние Балтийского моря значительно улучшилось [3].

Но опасность не миновала. По сей день сохраняются факторы, которые продолжают подвергать опасности морскую экосистему Балтики. На балтийском побережье располагаются 6 атомных электростанций, на территориях которых располагаются склады и захоронения ядерных и токсичных отходов, загрязняющих почву и воды вдоль берегов.

Активное развитие сельского хозяйства также представляет опасность для Балтийского моря. Огромное количество химически активных удобрений смывается в морские воды прямо сейчас [4].

Эвтрофикация остается одной из главных проблем Балтики. Основными органическими веществами, поступающими в Балтийское море, являются фосфор и азот, большая часть которых поступает вместе со стоком с суши [5].

Эвтрофикация приводит к усилению цветения разнообразных растительных организмов, увеличению осадения органических веществ на дно, повышению массы планктона и других микроскопических организмов. Все это приводит к уменьшению кислорода, растворенного в воде, замутнению воды и многим другим неблагоприятным процессам [5].

В связи с тем, что большая часть органических веществ поступает с суши, повышение концентрации органики чаще всего наблюдается вдоль берегов. Цветущие вдоль берега водоросли и размножающийся планктон приводят к возникновению пленки на поверхности воды, появлению запахов, а, если цветущие организмы токсичны, то и к мору местных водоплавающих организмов и птиц [5].

Страны, окружающие Балтийское море, следят за состоянием морских вод и предпринимают разнообразные меры по охране и восстановлению балтийских экосистем.

Таковыми мерами могут быть разнообразные экологические проекты, например, установка водоочистных сооружений в крупных городах. Санкт-Петербург пропускает через такие сооружения 93% своих сточных вод, не допуская в морскую воду разнообразные органические вещества.

Однако, очевидно, что для решения экологических проблем Балтийского моря необходим комплексный международный подход. Для объединения всех стран, заинтересованных в достойном состоянии экосистем Балтики, была создана международная организация HELCOM [6].

В 1992 году была подписана Хельсинкская конвенция, которая объединила в рамках новообразованной Хельсинкской комиссии все страны балтийского побережья. Целью этой комиссии является защита морской среды Балтийского моря. Комиссия разрабатывает и регулирует проведение разнообразных международных мероприятий, направленных на улучшение состояния экосистем Балтики.

Уже проведенные мероприятия Хельсинкской комиссии показали свою очевидную эффективность. Воды Балтийского моря стали значительно чище, а популяции многих видов многих морских организмов и птиц начали восстанавливать свою популяцию [6].

Проведена также работа по сокращению сброса органических веществ в морскую воду. Однако, последние исследования показывают, что сокращение сбросов фосфора и азота на 40% не приводит к удовлетворительным результатам. Для достижения наилучших показателей необходимо сокращение сбросов азота и фосфора в Балтику на 18% и 40% соответственно.

Именно проблема эвтрофикации является сегодня самой актуальной для Балтийского моря. И именно ей уделяют большую часть своего внимания страны-члены Хельсинкской конвенции.

Сегодня HELCOM разрабатывает новые подходы к решению накопившихся проблем. Направлены они на прекращение цветения водорослей и восстановление жизнедеятельности популяций, пострадавших от эвтрофикации Балтийского моря. Основаны эти подходы на самых современных и эффективных научных знаниях [6].

Для достижения поставленных задач предпринимается ряд международных мер, которые можно разделить на региональные, межрегиональные и глобальные.

Все эти меры будут эффективны только в том случае, если в них будут принимать участие все страны, входящие в Хельсинкскую комиссию. Для привлечения всех государств к активной работе над восстановлением Балтийского

моря были разработаны системы поощрения и наказания, позволяющие вовлечь и сами страны, и крупные корпорации, использующие балтийские берега, в работу перспективной наградой или угрозой экономических санкций.

Сама идея проведения подобных мероприятия была одобрена многими европейскими и российскими политиками, а площадка HELCOM используется для создания все новых и новых проектов по защите экосистем Балтийского моря [6].

По инициативе Российской Федерации в рамках Хельсинкской конвенции был создан международный форум «День Балтийского моря». Ежегодная конференция, проходящая в Санкт-Петербурге, служит платформой для обмена мнениями и знаниями, для создания и реализации новых проектов, а также для демонстрации уже достигнутых результатов.

Для проведения многочисленных мероприятий в рамках Хельсинкской комиссии требуется большое количество информации о состоянии всех водных объектов, входящих в бассейн Балтийского моря. Особенно важна информация о биогенных загрязнителях, поступающих в воды Балтики [6].

Сегодня эти данные можно получить путем использования разнообразных математических моделей, позволяющих смоделировать гидрологические процессы, приводящих к поступлению в морские воды органических веществ. В рамках разнообразных международных процессов чаще всего используются модели Fyris и Нуре. Используя именно эти две модели, будут проводиться все расчеты в данной работе.

3 Гидрологическая модель HYPE

HYPE – гидрологическая модель с распределенными параметрами, описывающая сток воды и развитие ее качественных характеристик. Код модели позволяет моделировать поведение стока и рассчитывать концентрацию разнообразных веществ в воде. Пространственное деление модели позволяет учитывать в ходе работы характерные подбассейны, растительный покров, тип почвы, подземный сток, влияние озер и болот, высоту водосбора над уровнем моря и даже антропогенное воздействие со стороны населения исследуемых территорий. Также модель может учитывать влияние рядов осадков и температуры, распределяя их воздействие с помощью настраиваемого временного шага [7].

Основной мотивацией для создания модели послужило стремление соотносить моделирование водного баланса с путями переноса разнообразных веществ, влияющих на качественные характеристики воды.

Модель HYPE была разработана Шведским институтом гидрологии и метеорологии (SMHI) в 2011 году, как открытый исходный код.

Модель разрабатывалась для достижения следующих целей:

- моделирование стока воды и ее качественных характеристик на всех этапах моделирования;
- моделирование стока в неосвещенных водосборах;
- возможность развития модели и создания глобальных моделей для, например, Европы.

Внутри модели водосборы разделяются на, покрывающие всю поверхность большого водосбора, но не перекрывающие друг друга, отсеки (подбассейны). Располагаются они вдоль основного водотока, соединяясь друг с другом в каких-либо характерных точках, например, в месте пересечения водотоков или в месте впадения водотока в озеро [7].

Каждый подбассейн разделяется на фракции, описывающие разнообразные характеристики выделенного участка территории. Такой подход позволяет описать множество различных параметров, например, залесенность, заболоченность, заозеренность, степень вовлеченность территории в сельское хозяйство, населенность, количество выпавших осадков и многие другие характеристики, влияющие на гидрологический режим исследуемого объекта.

Модель HYPE уже доказала свою эффективность в вопросах гидрологических прогнозов. Сегодня она используется в службе предупреждения наводнений SMHI, предоставляя прогнозы разной заблаговременности.

Модель продолжает развиваться и каждый год в исходный код добавляется множество новых строк, помогающих моделировать самые разнообразные гидрологические ситуации. Каждый год выпускается от 5 до 10 новых модификаций кода [7].

Сегодня модель доступна для загрузки и использования абсолютно всем. Загрузки производится из базы Sourceforge, где хранится исходный код модели, исполняемые файлы и пробные версии моделей, снабженные подробными инструкциями по настройке и использованию модели. Все это позволяет новому пользователю быстро познакомиться с основными принципами работы модели.

3.1 Настройка модели

Настройка модели осуществляется с помощью изменения текстовых файлов, образующих файловую структуру модели. В качестве входных данных используются временные ряды тех или иных параметров, а также некоторые константы, описывающие, например, рельеф, тип почвы и многие другие относительно стационарные параметры [8].

3.2 Исходные данные

Исходные данные указываются в нескольких текстовых файлах. Всего таких файлов пять: GeoData.txt, GeoClass.txt, Pobs.txt, Tobs.txt, Par.txt.

GeoData.txt – файл, содержащий информацию о подбассейнах. Каждому суббассейну соответствует одна строка в текстовом файле. Здесь отображается идентификационный номер подбассейна, его площадь и его площадь, выраженная в долях от площади общего бассейна, маршрут течения, т.е. суббассейн, в который перетекает этот подбассейн, длина основной реки, средняя высота самого суббассейна и подбассейна, расположенного ниже по течению, средняя высота над уровнем моря озера – истока суббассейна. Для моделирования стока питательных веществ также указываются культуры, возделываемые на берегах этого подбассейна, атмосферное осаждение органических веществ, а также источники загрязнения от, расположенных на берегах реки, домохозяйств.

GeoClass.txt - файл, определяющий свойства почв, характер землепользования и тип района, в котором протекает река. Классы почв определяются глубиной дренажа водотока, количеством слоев почвы и их толщиной. Сюда же включаются вносятся информация о питательных веществах, сток которых моделируется. Типы районов выделяются следующие: исходные озера, местные озера и ледники. Характер землепользования подразумевает указание характера местности: город, ледник, лес, сельскохозяйственные поля, болота. Этот файл тесно связан с GeoData.txt и предоставляет ему данные, необходимые для описания подбассейна [8].

Pobs.txt и Tobs.txt – файлы, содержащие в себе данные о временных рядах осадков (мм/шаг времени) и температуры (°C/шаг времени).

Par.txt – файл параметров. Он содержит в себе параметры модели, которые можно настраивать для достижения различных целей. Сюда вносятся и общие параметры, применяемые ко всей модели, и параметры, зависящие, например, от класса почвы или характера землепользования [8].

3.3 Процессы на поверхности земли

3.3.1 Температура

Модель HYRE позволяет настраивать осадки и температуру, указанные в файлах Pobs.txt и Tobs.txt. Эта калибровка проводится из-за того, что данные могут быть получены на разных высотах, могут быть ошибочны или для компенсации не смоделированных процессов [9].

Корректировка температуры может быть проведена следующим образом:

1. Температура воздуха на суббассейне зависит от средней высоты суббассейна (elev). Параметр tcelevadd (°/100 м) позволяет внести поправку, основанную на зависимости температуры от высоты суббассейна. Подразумевается, что наблюдения были совершены на уровне моря.

2. Альтернативным путем может послужить корректировка, основанная на разнице высот между суббассейнами и повышением наблюдаемой температуры. За это отвечает параметр tcobselev (°/100м). Наблюденная температура должна быть указана в параметре obselev.

3. Температура может быть также отрегулирована с помощью параметра monthlapse (°/100 м), который основан на месячной зависимости.

Эти три типа корректировки не могут быть использованы вместе.

Температура подбассейна может быть также скорректирована на всех подбассейнах сразу в зависимости от регионального параметра tempcorr

$$\mathbf{tempgc} = \mathbf{temp_i} + \mathbf{tempcorr} - \frac{\mathbf{tcelevadd} * \mathbf{elev}}{100} - \frac{\mathbf{tsobselev} * (\mathbf{elev} - \mathbf{obselev})}{100} - \frac{\mathbf{monthlapse} * \mathbf{elev}}{100} \quad (3.1)$$

где: Temp_i – температура воздуха на подбассейне;

Tempcorr – региональный параметр, (°/100 м) ;

Tcelevadd – параметр, учитывающий перепад высот, (°/100 м) ;

$T_{cobselev}$ – параметр, отображающий повышение температуры с изменением высоты, ($^{\circ}/100$ м) ;

$Elev$ – средняя высота суббассейна, м;

$Obselev$ – высота зафиксированной температуры, м;

$Monthlapse$ – месячный параметр зависимости.

Также можно скорректировать температуру в зависимости от превышения и понижения высоты суббассейна относительно средней высоты всех суббассейнов. Осуществляется это с помощью параметра t_{calt}

$$\mathbf{temp} = \mathbf{tempgc} - \frac{\mathbf{t_{calt}} * \mathbf{deltah}}{100} \quad (3.2)$$

где: $Temp$ – температура, зависящая от класса суббассейна;

T_{calt} – температурный параметр;

$Deltah$ – отклонение от средней высоты суббассейна.

3.3.2 Осадки

Количество осадков ($precip$) также может быть скорректировано для всех подбассейнов с помощью общего параметра $psaddg$ или регионального параметра $pscorr$. Также есть возможность настроить осадки для верхнего водосбора в зависимости от их агрегатного состояния ($psurain$, $psusnow$) [9].

Осадки, выпавшие на суббассейн ($precgc$) подразумеваются, как осадки на подбассейне на средней высоте ($basinelev$), но могут быть изменены с учетом перепадов высоты рельефа на подбассейне.

3.3.3 Расчет жидких осадков и снегопадов

Агрегатное состояние осадков определяется на основе температуры или задается в исходных данных. Порог преобразования осадков, зависящий от характера землепользования, определяет вид осадков [9]. Когда температура опускается ниже отрицательного порога $ttpi$, считается, что осадки имеют

твердый вид, а, когда температура превышает положительный порог $ttpi$, осадки воспринимаются, как жидкие. В случаях, когда температура занимает некие промежуточные значения, предполагается, что осадки имеют смешанный вид. Интервал смешанных осадков определяется суммой параметра $ttmp$, зависящего от характера землепользования, и общего параметра $ttpd$.

Доля жидких осадков определяется по следующей формуле:

$$a_{rain} = \begin{cases} 0 & \text{temp} < ttmp + ttpd - ttpi \\ 1 & \text{temp} > ttmp + ttpd + ttpi \\ \frac{(\text{temp} - (ttmp + ttpd - ttpi))}{(2 * ttpi)} & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (3.3)$$

где: A_{rain} – доля жидких осадков;

$Temp$ – температура воздуха, °C ;

$Ttmp$ – параметр, зависящий от характера землепользования;

$Ttpd$ – общий параметр;

$Ttpi$ – параметр для смешанных осадков.

3.3.4 Испарение

Испарение с территории водосбора и его подбассейнов ($epot$, мм) рассчитывается с помощью температуры. Также существует несколько альтернативных методов расчета. Когда температура воздуха превышает порог $ttmp$ происходит испарение [9]. Расчет транспирации, т.е. испарения с поверхности растений, производится на основе параметра ($epot_{base}$), зависящего от параметра $cevp$, определяемого в зависимости от характера землепользования в регионе.

$$cseason = 1 + cevpam * \sin\left(\frac{2 * \pi * (dayno - cevpph)}{365}\right) \quad (3.5)$$

$$epot_{base} = (cevp * cseason) * (temp - ttmp) \quad (3.6)$$

где: $e_{pot_{base}}$ – базовый показатель транспирации;

C_{season} – параметр, зависящий от сезона;

C_{evram} – фактор синусоидальности;

Day_{no} – количество дней;

C_{evrph} – фактор синусоидальности;

C_{evr} – потенциальная скорость испарения.

Сезонный фактор C_{season} определяет скорость испарения (c_{evr}), повышая его весной и понижая осенью. Синусоидальный фактор с двумя параметрами c_{evram} и c_{evrph} . Он используется только тогда, когда c_{evram} не равен нулю. В c_{evrph} около 45 дней дают максимальную коррекцию в середине мая ($day_{no} = 45+91=136$). Тогда минимальная коррекция будет через полгода в сентябре ($day_{no} = 136+182$). Для более раннего максимума уменьшается c_{evrph} [9].

Также показатель транспирации e_{pot} может быть отрегулирован с помощью регионального коэффициента ($c_{evrcorr}$). Этот коэффициент постоянен на протяжении всего года

$$e_{pot} = e_{pot_{base}} * (1 + c_{evrcorr}) \quad (3.7)$$

где: E_{pot} – потенциальное испарение, мм;

$C_{evrcorr}$ – региональный поправочный коэффициент.

Модель предполагает, что испарение осуществляется из двух верхних слоев почвы. Испарение экспоненциально уменьшается с глубиной. За это отвечает параметр ($e_{potdist}$).

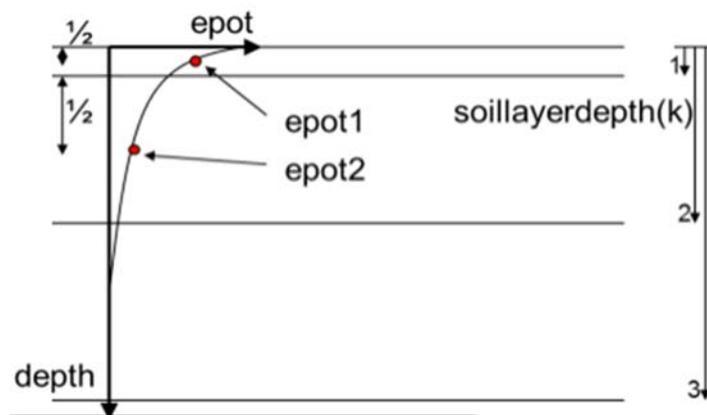


Рисунок 3.1 – Распределение показателя потенциального испарения между верхними слоями почвы

Расчет параметров испарения производится по следующим формулам:

$$\mathbf{epot1 = EXP(-epotdist * \frac{soillayerdepth(1)}{2})} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{epot2 = EXP(-epotdist * (soillayerdepth(1) + \frac{soillayerdepth(2) - soillayerdepth(1)}{2}))} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{area1 = soillayerdepth(1) * epot1} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{area2 = (soillayerdepth(2) - soillayerdepth(1)) * epot2} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{epotfrac1 = \frac{area1}{area1 + area2}} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{epotfrac2 = \frac{area2}{area1 + area2}} \quad (3.13)$$

где: Epotdist – косвенный параметр;

soillayerdepth(1)/

soillayerdepth(2) – глубина первого и второго слоя почвы;

$area1/area2$ – зона испарения первого и второго почвенных слоев;

$epot1/epot2$ – испарение с первого и второго слоя.

Предполагается, что потенциально испарение из слоя почвы осуществляется только в случае, когда количество воды в почве превышает влагоемкость почвы (f_c , мм).

Потенциальное испарение с поверхности водоема и затопленных пойм ограничено лишь температурой и объемом водоема [9].

3.3.5 Атмосферное осаднение

3.3.5.1. Влажное осаднение

Влажное осаднение органических веществ указывается в исходных данных в виде ряда концентрации, зарегистрированной в осадках. Также можно указать концентрацию влажных осаднений отдельно для каждого подбассейна в дополнительном файле `AtmerData.txt` [9].

3.3.5.2. Атмосферное осаднение на почву

Сухое осаднение указывается для каждого подбассейна в файле `AtmerData.txt`. Осаднение может изменяться в зависимости от типа растительности или характера землепользования.

Сухое осаднение фосфора и азота добавляется в снег или прямо в почву.

Влажное осаднение на почву добавляется путем указания концентрации питательных веществ в осадках [9]. Осадки могут добавляться к снежному покрову или, если они жидкие, к потенциальной инфильтрации. В зависимости от характера инфильтрации влажные осаднения будут смешиваться с потоками воды, например, с поверхностным стоком, или уходить в почву.

3.3.5.3. Атмосферное осаднения на реки и озера

Осаднение на реки и озера также определяется с помощью данных, указанных в файле `AtmerData.txt`. В зависимости от типа землепользования и типа

растительности осадение на поверхность водоемов может иметь разные значения. Концентрация осадков указывается таким же образом, как и в случае сухого и влажного осадения [9].

3.4 Почвенные процессы

3.4.1 Моделирование устройства почвы

Подбассейны в модели разделены на классы (SLC – Soil Landuse Class) в зависимости от типа землепользования, типа почвы и многих других факторов.

Модель HYPE рассматривает почвы в виде трех слоев. Типы слоев и их мощности указываются в файле GeoClass.txt [10].

Удержание воды в почве определяется с помощью следующих параметров: точка увядания (w_{cwp}), емкость поля (w_{cfc}) и эффективная пористость (w_{cep}). Модель распределяет эти параметры между слоями почвы, в зависимости от их мощности.

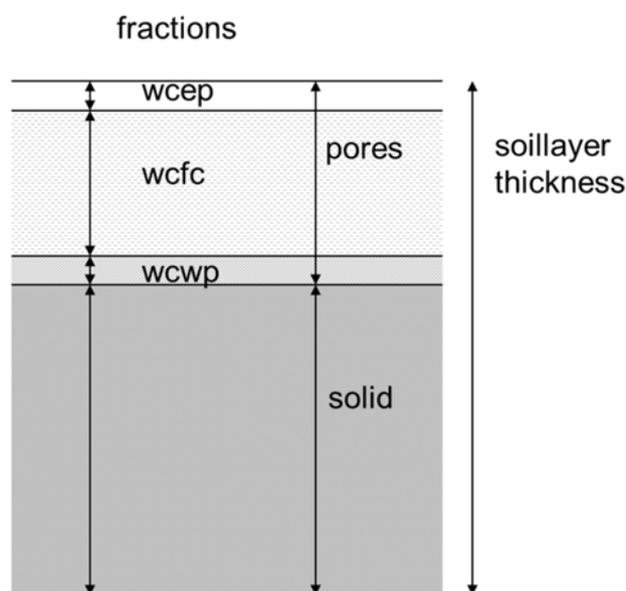


Рисунок 3.2 – Параметры удержания воды

Глубина другого потока может быть указана в GeoClass.txt. В нем может быть указана максимальная глубина дренажа к потоку. Грунтовые воды ниже этого уровня не участвуют в локальном стоке [10].

3.4.2 Рассчитываемые переменные

Некоторые параметры могут быть рассчитаны на основе переменных состояний почвы. К таким параметрам можно отнести уровень грунтовых вод, дефицит влажности почвы, глубину промерзания.

Уровень грунтовых вод (gwat) рассчитывается как водный столб из наполненных водой пор в почве. Если грунтовые воды выходят на поверхность, то заполненность пор принимается равной 100%.

Уровень воды измеряется как отрицательное относительно поверхности почвы значение. Положительное значение будет означать подтопление, т.е. выход грунтовых вод на поверхность. Нижний слой почвы, не полностью заполненный водой считается водоупором [10].

Дефицит влаги в почве (smd) рассчитывается для корневой зоны, т.е. для двух верхних слоев почвы. Дефицит влаги – это уровень воды (мм) в почве, необходимы для заполнения всех пор

$$\mathbf{smdf} = \sum_{k=1}^2 \mathbf{MAX}\{\mathbf{fc}_k + \mathbf{wp}_k - \mathbf{soil}_k, \mathbf{0}\} \quad (3.14)$$

где: Smd – дефицит влажности почвы, мм;

Fc – влагоемкость слоя, мм;

Wp – точка увядания, мм;

Soil – количество воды в почве.

Глубина промерзания почвы определяется только, если температура почвы опускается ниже нуля. Этот параметр зависит от температуры почвы (soiltemp), а также от количества воды внутри нее (soil), ее влагоемкости (fc), точки увядания (wp) и параметров frost и sfrost

$$\mathbf{frostdepth} = \frac{\mathbf{frost*sfrost*soiltemp*(fc+wp)}}{\mathbf{soil}} \quad (3.15)$$

3.5 Процессы в снежном покрове

3.5.1 Снеготаяние

Модель начинает рассчитывать снеготаяние в момент, когда температура воздуха переходит через соответствующий порог. Слой тающего снега (*melt*, мм) зависит от коэффициента снеготаяния (*cmlt*), пороговой температуры (*ttmp*) и температуры воздуха (*temp*)

$$\mathbf{melt} = \mathbf{MIN}(cmlt * (temp - ttmp), snow) \quad (3.16)$$

3.5.2 Снежный покров

Модель подразумевает, что, если снежный покров присутствует на территории бассейна, то он покрывает всю его площадь. Однако, существует альтернативный подход, в котором можно указать долю территорий (*fsc*), занимаемых снежным покровом, относительно общей площади бассейна. Покров будет рассчитываться на основе водосодержания в снеге [10].

Накопление снежной массы воспринимается моделью, как функция прироста снега до максимального значения (*fscmax*), рассчитываемый по следующей формуле:

$$\mathbf{fsc} = \mathbf{fscmax} * \mathbf{tanh} (0.1 * \mathbf{snow}) \quad (3.17)$$

Fsc – доля снежного покрова;

Fscmax – максимальные снеготаяния.

Это уравнение используется на протяжении всей зимы, если снежный покров не достигает своих максимальных значений (*snowmax*).

Также снежный может быть рассчитан, как зависимость от максимального снежного покрова в зимний период ($snowmax$) и коэффициента перераспределения снежного покрова, зависящего от изменения высоты ($stdelev$) и землепользования

$$fsc = \frac{snow}{snowmax * fscdist}, \quad (3.18)$$

$$fscdist = fscdist0 + fscdist1 * stdelev, \quad (3.19)$$

где: $Snwmax$ – максимальный снежный покров в зимний период;

$Fscdist$ – коэффициент распределения снега;

$fscdist0$, $fscdist1$ – параметры, зависящие от типа землепользования;

$Stdelev$ – коэффициент перераспределения снега в зависимости от перепадов высоты.

Коэффициент распределения снега ($fscdist$) зависит от параметров, определяемых землепользованием ($fscdist0$, $fscdist1$), и их максимальным значением ($fscdistmax$).

С концом снежного сезона переменная $snwmax$ постепенно уменьшается вплоть до своего полного обнуления

$$snowmax = snowmax - (fscck1 * snowmax - snow) * \frac{1 - e^{-fscckexp * ts}}{fscck1}, \quad (3.20)$$

$$\frac{snow}{snowmax < fscck1} \quad (3.21)$$

Уравнение находится в зависимости от параметров $fscck1$ и $fscckexp$, которые зависят от временного интервала моделирования.

3.5.3 Температуры почвы и высота снежного покрова

Температура почвы рассчитывается, как баланс трех температурных параметров: температуры слоя почва за предыдущий временной шаг, температуры почвенного слоя, залегающего глубже, и температуры воздуха. Значение температуры нижележащего слоя задается постоянной, а значение температуры воздуха зависит от высоты снежного покрова (*snowdepth*) и его параметров. Температуры почвы за предыдущий временной шаг (*soilmem*) зависит от глубины залегания и параметров землепользования [10].

Плотность снега (*snowdens*) зависит от показателя возраста снежного покрова (*snowage*). Плотность снега свежеснегавшего снега (*sdnsnew*) и повышение плотности с возрастом (*snowdensdt*) обычно принимаются равными 0.1 и 0.002 соответственно. Возраст снега увеличивается с каждым временным шагом

$$\mathbf{snowage} = \frac{(\mathbf{snowage}+1)*\mathbf{oldsnow}}{(\mathbf{oldsnow}+\mathbf{snowfall})} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{nowdens} = \mathbf{sdnsnew} + \mathbf{snowdenstd} * \mathbf{snowage} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{snowdepth} = \frac{0.1*\mathbf{snow}}{\mathbf{snowdens}} \quad (3.24)$$

3.6 Почвенная влага

3.6.1 Сток грунтовых вод

Сток подземных вод рассчитывается в зависимости от уровня грунтовых вод по отношению к глубине дренажа. Сток начинает моделироваться в момент, когда почвенная влага превышает влагоемкость слоя почвы, расположенного выше уровня потока. Сток зависит от количества воды в эффективной пористости и коэффициента спада (*rc*).

Если почва не насыщена, то подземный сток будет учитывать только воду внутри этого слоя почвы, не затрагивая нижележащие пласты.

Сток рассчитывается для всех трех слоев почвы вплоть до глубины дренажа, соответствующей уровню реки.

Если, уровень дренажа (streamdepth) находится на уровне третьего слоя, но слой почвы при этом не насыщен, то сток будет зависеть только от уровня воды, залегающей выше дренажа потока [10].

Коэффициент спада рассчитывается с помощью двух параметров: $grcs1$ и $grcs2$, зависящих от типа почвы и общего параметра $grcs3$. Подразумевается, что коэффициент спада уменьшается с увеличением глубины, и параметры $grcs1$ и $grcs2$ указывают его значения в самом верхнем и в самом нижнем слое соответственно. Параметр $grcs3$ регулирует значение коэффициента спада в верхнем слое в зависимости от уклона суббассейна.

3.6.2 Инфильтрация

Расчет инфильтрации проводится с помощью значений суммы осадков и снеготаяния ($infiltr0$).

Если сумма превышает способность почвы к инфильтрации, то часть воды не будет проникать в почву и будет переходить в поверхностный сток.

При расчете инфильтрации учитывается поверхностный сток, поток в порах почвы и мерзлый грунт.

Если инфильтрация окажется больше нуля, то к верхнему слою прибавится грунтовая вода. Это происходит независимо от того, есть ли в порах свободное пространство или нет. Если в порах нет пространства, то вода выливается на поверхность почвы, но все равно остается частью верхнего ее слоя [10].

3.7 Реки

3.7.1 Основные понятия

НУРЕ содержит два типа рек: местный поток и главную реку. Эти водотоки присутствуют во всех суббассейнах. Длина главных рек задается в исходных данных. Местные реки же принимают в себя весь местный сток, который

соединяется с таковым с вышележащих суббассейнов, и поступает в главную реку [11].

3.7.2 Речные процессы

Осадки. Осадки, выпадающие на поверхность, причисляются, рано или поздно, к речному стоку, формируя новые концентрации биогенных веществ.

Испарение. Испарение, осуществляющееся с поверхности реки, влияет на концентрации растворенных веществ, вынуждая модель рассчитывать новые значения после каждого изменения [11]. Испарение зависит от площади водной поверхности, которая обычно принимается постоянной. Однако, можно смоделировать ее изменение, связанное с уменьшением или изменением объема воды.

Задержка воды в водотоке. Задержка (*transtime*) в днях определяется длиной водотока (*rivilin*) и максимальной скоростью воды (*rivvel*). Задержка воды в местной реке рассчитывается в зависимости от размера суббассейна, т.к. длина водотока определяется на основе его площади. Задержка делится на целые дни (*ttday*) и части дня (*ttpart*)

$$\mathbf{transtime} = \frac{\mathbf{rivlen}}{\mathbf{rivvel} * 8.64 * 10^4}, \quad (3.25)$$

$$\mathbf{ttday} = \mathbf{INT}(\mathbf{transtime}), \quad (3.26)$$

$$\mathbf{ttpart} = \mathbf{transtime} - \mathbf{REAL}(\mathbf{ttday}). \quad (3.27)$$

Приток реки записан в двух массивах (*riverq* и *riverc*), и находится он там до момента своего стока в основной поток. Сток рассчитывается с помощью частей дня, привязанных к временному шагу. После расчета оттока значения в массивах смещаются вперед на один день

Задержка и затухание. Если задержка воды в водотоке включается в себя еще и затухание пиков, то часть задержки рассматривается, как перенос, а другая его ее часть принимается за затухание [11]. Вначале рассчитывается перенос воды, а после учитывается затухание. Время задержки в блоке затухания учитывается параметром **damp**

$$\mathbf{totaltime} = \frac{\mathbf{rivlen}}{\mathbf{rivvel} * 8.64 * 10^4}, \quad (3.28)$$

$$\mathbf{transtime} = (1 - \mathbf{damp}) * \mathbf{totaltime}. \quad (3.29)$$

Результат от переноса (**transq** и **transc**) идет в блок затухания. Время задержки в блоке затухания (**kt**) переводится в коэффициент спада (**riverrc**). Коэффициент спада, применяемый для расчета стока из коробки (**dampq**) является функцией объема (**riverbox**)

$$\mathbf{kt} = \mathbf{damp} * \mathbf{totaltime}, \quad (3.30)$$

$$\mathbf{riverrc} = 1 - \mathbf{kt} + \mathbf{kt} * e^{-1/\mathbf{kt}}, \quad (3.31)$$

$$\mathbf{dampq} = \mathbf{riverrc} * \mathbf{riverbox}. \quad (3.32)$$

Сглаживание мертвого объема. Мертвый объем используется для дополнительного выравнивания концентрации биогенных веществ в водоеме. Уравнение стока для блока затухания в таком случае имеет следующий вид:

$$\mathbf{dampq} = \mathbf{riverrc} * (\mathbf{riverbox} - \mathbf{deadriver}). \quad (3.33)$$

Начальное значение блока затухания в таком случае равно мертвому объему. Потоки в блок смешиваются с общим объемом. Фактически, это означает разбавление концентрации, ведь начальное значение в блоке приравнивается к нулю. Расчетный мертвый объем будет зависеть от площади суббассейнов выше по течению реки. Глубина рассчитывается по параметру `dead` и площади территорий выше по течению. Ширина считается как значение глубины, увеличенное в 10 раз [11].

3.7.3 Притоки реки

Длина притока имеет длину, равную квадратному корню из площади суббассейна. Приток формируется стоком с суббассейна. Течения в притоках ослабляются и усиливаются методами, описанными выше. Сток из притока идет либо в основную реку, либо в озеро [11].

Процент стока, проходящий через местное озеро, указывается в `GeoData.txt (icatch)`.

3.7.4 Основная река

Именно вокруг основной реки проводится выделение суббассейнов. Длина этой реки указывается в `GeoData.txt` или принимается равно квадратному корню из площади суббассейна. Сток главной реки формируется из стока с суббассейна и стока из местного озера в суббассейнах, не имеющих подбассейнов выше по течению, и из стока с суббассейна, стока из местного озера и стока с подбассейна, расположенного выше по течению.

Течение в главной реке ослабляется и усиливается методами, описанными выше.

3.8 Биогенные вещества в наземных процессах

`НУРЕ` может имитировать наличие азота и фосфора в почве, как в виде неподвижных почвенных бассейнов, так и в виде растворенных в почвенной

влаге фракций. Все эти фракции могут изменять под воздействием внешних факторов и внутрипочвенных процессов [12].

Могут быть смоделированы следующие фракции:

- fastN – неподвижный бассейн азота в почве с быстрым оборотом ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);

- fastP – неподвижный бассейн фосфора органического происхождения в почве с быстрым оборотом ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);

- humusN – неподвижный бассейн азота органического происхождения в почве с медленным оборотом ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);

- humusP – неподвижный бассейн фосфора органического происхождения в почве с медленным оборотом ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);

- IN – концентрация азота неорганического происхождения в почвенной воде ($\text{мг}/\text{л}$);

- ON – концентрация растворенного азота органического происхождения в почвенной воде ($\text{мг}/\text{л}$);

- partP – неподвижный бассейн фосфора неорганического происхождения, адсорбированный к частицам почвы ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);

- PP – концентрация твердых частиц фосфора органического происхождения в почвенной воде ($\text{мг}/\text{л}$);

- SP – концентрация растворимого фосфора в почвенной воде ($\text{мг}/\text{л}$).

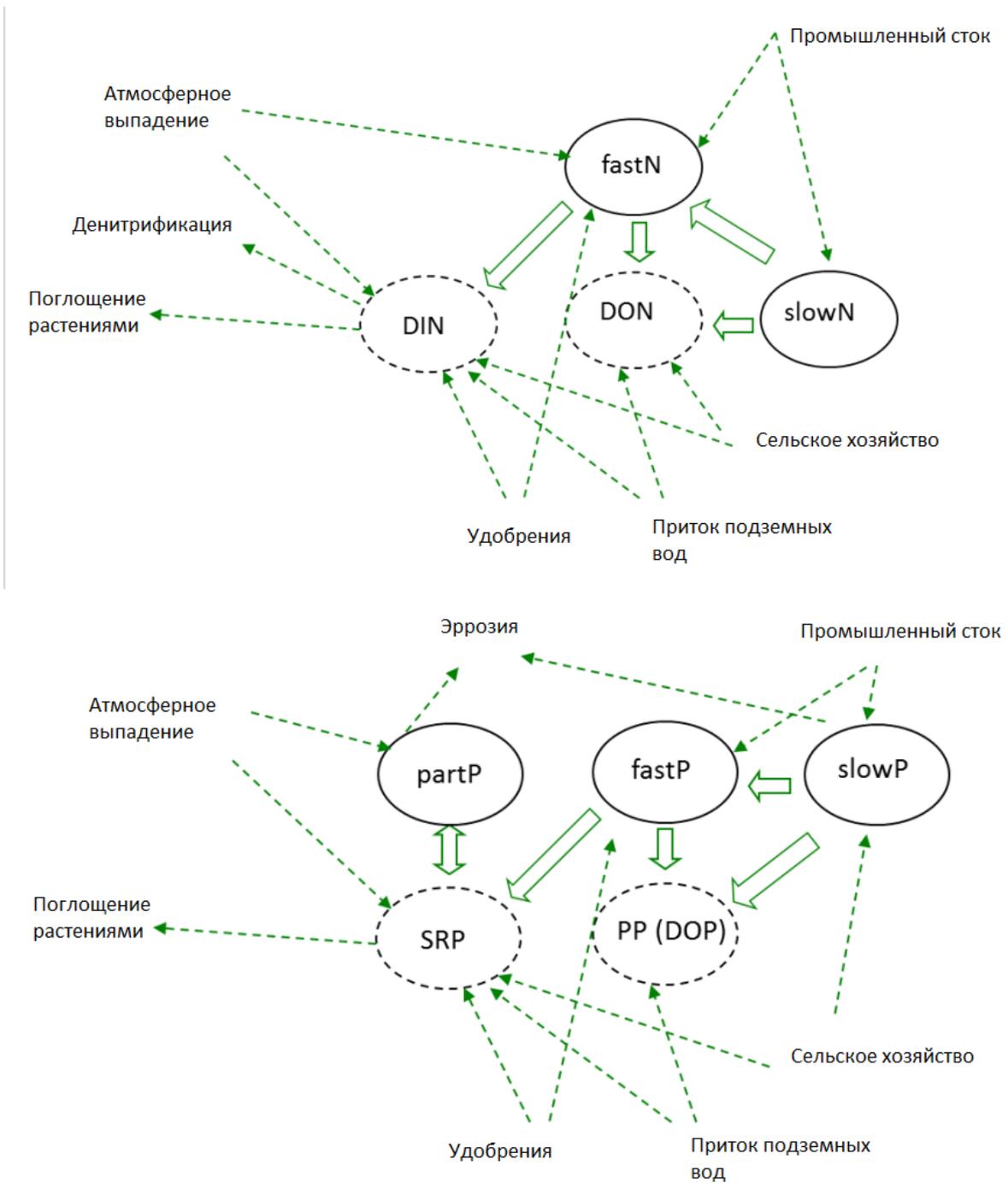


Рисунок 3.3 – Источники и поглотители биогенных веществ в почве

3.8.1 Источники биогенных веществ

Выделяют следующие источники биогенных веществ: удобрения, остатки растений, сельскохозяйственные диффузные источники.

Удобрения в модели делятся на две категории: заводские удобрения (fert) и природные (man). Для каждого применения удобрения необходимо указывать его дату и данные по сумме азота и фосфора (fert(inut,ife), man(inut,ife), где inut = N, P, а ife =1,2 (при внесении удобрений) обязательная добавка, и регулирующие показатели (fdown(ife), mdown(ife), определяющие количество удобрений в первом и втором слое почвы). Эти параметры указываются в CropData.txt и зависят от урожайности и географического расположения региона [12].

Общая сумма удобрений распределяется в течение определенного периода (fertdays) после даты внесения удобрений. Сумма удобрений, применяемая каждый день, остается постоянной на протяжении всего периода.

Остатки растений добавляются в определенную дату в течение года. Остатки вносятся в неподвижные почвенные бассейны (fastN, fastP, humusN и humusP) для получения задержки стока и накопления гумуса в грунте. Количество растительных остатков (resamount(inut), inut=N,P), а также дата их попадания в почву зависит от урожая и географического расположения региона. Данные указываются в файле CropData.txt.

Сельскохозяйственные диффузные источники, т.е. разнообразные точечные указываются в файле CropData.txt. Для источника указывается концентрация азота и фосфора. Вещества, поступающие из диффузного источника, распределяются между непосредственно исследуемым водотоком и почвенной водой в нижних слоях грунта.

3.8.2 Растительность и процессы на поверхности почвы

В текстовом файле CropData.txt содержится информация о разнообразных растительных культурах, доступных для моделирования. Каждый тип почвы или класс землепользования (SLC) может нести на себе две культуры - основную и вторичную. При сокращении числа используемых SLC схожие растительные культуры могут быть объединены в одну. Также для каждой

культуры может быть указано количество удобрений, внесенных в почву под ней.

Потенциальное поглощение, т.е. максимально возможное количество поглощенных веществ, позволяет рассчитывать поглощение IN и SP из почвенной воды. Фактическое же поглощение будет ограничено доступным количеством биогенных веществ [12].

Потенциальное поглощение азота растительностью в своей основе содержит трехпараметрическое уравнение. Азотное поглощение может быть рассчитано и для основных, и для вторичных культур. Полученные результаты добавляются к общей потенциальной функции поглощения (common_uptake, г/м²/сут) через процент от основной (part = 1.0) и вторичной культуры (part <1).

Потенциал поглощения разделен между первым (верхним) и вторым слоем почвы. Разделение осуществляется с помощью параметра фракции верхнего слоя почвы. Расчет потенциального поглощения рассчитывается в период между датой посева (bd2) и датой сбора урожая (bd3). Потенциальное поглощение зависит от трех параметров (up1, up2 и up3) и продолжительности периода созревания культуры.

Эрозия почв также может быть рассчитана и смоделирована. Расчет производится для определения переноса частиц фосфора (PP) и для моделирования переноса осадочных материалов. Для расчета переноса частиц фосфора применяется модель эрозии, зависящая от частиц фосфора, побуждаемых к передвижению дождем и поверхностным стоком. Эта схема первоначально использовалась для расчета аккумуляции отложений. Существует еще одна схема, основанная на индексе эрозии бассейна [12].

В первой схеме частицы фосфора попадают в воду вместе с поверхностным стоком и через дренаж микропор почвы. Расчет осуществляется в три этапа:

1. Расчет эрозии (передвижения) частиц почвы с поверхности земли;
2. Расчет количества частиц почвы, попавших в воду;
3. Расчет количества частиц фосфора, содержащихся в частицах почвы.

Частицы почвы и, соответственно, фосфора перемещаются за счет энергии падающих капель дождя и потоков поверхностного стока. Кинетическая энергия рассчитывается в зависимости от количества осадков и времени года. Если осадки выпадают в виде снега, или они падают на заснеженный грунт, или их интенсивность <5мм/сут, то эрозия не рассчитывается.

Часть энергии дождевой капли может подстилаяющей растительностью. Растительный покров защищает участок почвы под собой от эрозии. Коэффициент покрытия показывает какая часть исследуемого участка земной поверхности покрыта растительностью и, следовательно, не испытывает эрозии [12].

3.9 Азотно-фосфорные процессы в водоемы

Процессы поступления и переноса азота и фосфора в водоемах могут быть смоделированы как в реках, так и в озерах. Также модель позволяет описать обмен водоема и почвы.

При моделировании азотно-фосфорных процессов используются размеры рек. Ширина и глубина водотока может быть рассчитана по следующим формулам:

$$\mathbf{velocity} = 10^{\mathbf{rivvel1}} * \mathbf{meanflow}^{\mathbf{rivvel2}} * \left(\frac{\mathbf{flow}}{\mathbf{meanflow}}\right)^{\mathbf{rivvel3}} \quad (3.34)$$

$$\mathbf{width} = 10^{\mathbf{rivwidth1}} * \left(\frac{\mathbf{flow}}{\mathbf{velocity}}\right)^{\mathbf{rivwidth2} + \mathbf{rivwidth3} * \log_{10}\left(\frac{\mathbf{flow}}{\mathbf{velocity}}\right)} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{depth} = \frac{\left(\frac{\mathbf{flow}}{\mathbf{velocity}}\right)}{\mathbf{width}} \quad (3.36)$$

где: rivvel1, rivvel2, rivvel3, rivwidth1, rivwidth2 и rivwidth3 – озерные региональные параметры;

Flow- расход воды в водотоке м³/с;

Meanflow – осредненный сток за год;

Ширина реки ограничивается шириной мертвого объема и параметром максимальной ее ширины (maxwidth). Длина реки определяется как квадратный корень водосбора или указывается в файле GeoData.txt. Площадь реки определяется как произведение длины реки на ее максимальную ширину [13].

Температура воды (watertemp) также используется в расчетах. Она определяется путем сопоставления температуры воздуха и температуры воды за предыдущий день.

3.9.1 Денитрификация

Денитрификация, т.е. возвращение нитритов в атмосферу, является функцией донной области, концентрации IN (concfcn) в объеме воды, температуры воды и общих параметров denitwrl (местная река), denitwrm (главная река) и denitwl (озера). Денитрификация (denitri_water, кг/день) ограничена 50% (maxdenitriwater) от IN бассейна [13].

Площадь дна (area) рассчитывается как произведение ширины реки на ее длину. В случае озера площадь дна принимается равной площади водной поверхности.

3.9.2 Первичная выработка и минерализация

Первичная выработка в водоемах – источник органического азота и фосфора, а также поглотитель неорганического азота и растворенного в воде фосфора. Обратный процесс называется минерализацией.

Первичная выработка и минерализация зависят от температурных функций. Первая (tmpfcn1) зависит от температуры воды и имитирует повышение скорости протекания процессов при повышении температуры. Вторая (tmpfcn12) описывает связь между первичной выработкой и минерализацией, а также определяет какой из процессов доминирует в исследуемом водоеме [13].

Первичная выработка наиболее активна весной. Минерализацией же происходит преимущественно осенью, когда температура средняя температура за 10 дней (T10) становится меньше средней температуры за 20 дней (T20)

$$\mathbf{tmpfcn1} = \frac{\mathbf{watertemp}}{20}, \quad (3.37)$$

$$\mathbf{tmpfcn2} = \frac{\mathbf{T10-T20}}{5}, \quad (3.38)$$

$$\mathbf{tmpfcn} = \mathbf{tmpfcn1} * \mathbf{tmpfcn2}. \quad (3.39)$$

Минерализация и первичная выработка могут также регулироваться долгосрочными средними концентрациями фосфора в озере (TPconc) или в водотоке через функцию концентрации (TPfcn) с общим параметром половины насыщения hsatTP.

В случае, когда фосфор не моделируется, применяется долгосрочная осредненная концентрация фосфора в качестве параметра, зависящего от озерного региона (tpmean). Если концентрация фосфора известна, то средняя концентрация уменьшается по общему параметру limsedPP перед ее применением в функции концентрации

$$\mathbf{TPfcn} = \frac{(\mathbf{TPconc-limsedPP})}{(\mathbf{TPcons-limsedPP+hsatTP})}. \quad (3.40)$$

3.9.3 Седиментация

Седиментация – процесс накопления осадков в водоемах. В рамках модели седиментация воспринимается как сток твердых частиц фосфора и органического азота, а также взвешенных наносов и водорослей. Седиментация (sedON, sedPP, sedAE, sedSS, m/da) рассчитывается в зависимости от концентрации веществ в воде и площади водоема. Параметры sedON, sedPP, sedAE и

sedSS являются общими, но осадконакопление ON и PP может быть указана для каждого озера [13].

Частицы вещества в отложениях моделируются как резервуары (PPsedimentpool, SSsedimentpool), которые могут быть определяться как части объема воды (PPsedimentpool, SSsedimentpool) при низких скоростях течения. Высокие скорости потока приводят к уменьшению седиментирования, ведь осевшие частицы вновь возвращаются в поток (resuspPP, resuspSS). Этот процесс зависит от параметра sedexp. Воздействие потока на процесс осадконакопления определяется в зависимости от значения этого параметра ($-1 < \text{sedresp} < 1$)

$$\text{sedresp} = \max \left(-1., \min \left(1., \frac{q_{\text{bank}} - \text{flow}^{\text{sedexp}}}{q_{\text{bank}}} - \frac{\text{flow}^{\text{sedexp}}}{q_{\text{bank}}} \right) \right) \quad (3.41)$$

$$\text{sedPP} = \begin{cases} \text{sedresp} * \text{PPpool} & \text{sedresp} > 0 \\ 0 & \text{sedresp} < 0 \end{cases} \quad (3.42)$$

$$\text{resusp} = \begin{cases} -\text{sedresp} * \text{PPsedimentpool} & \text{sedresp} < 0 \\ 0 & \text{sedresp} > 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

$$\text{sedSS} = \begin{cases} \text{sedresp} * \text{SSpool} & \text{sedresp} > 0 \\ 0 & \text{sedresp} < 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

$$\text{resuspSS} = \begin{cases} -\text{sedresp} * \text{SSsedimentpool} & \text{sedresp} < 0 \\ 0 & \text{sedresp} > 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

где: Flow – расход речного потока м³/с;

Qbank – потока, в максимально полноводной реке.

Qbank рассчитывается как второй по водности смоделированной поток за год.

4 Модель Fyris

Модель Fyris разработана Хансом Кварнесом в департаменте водных наук при Шведском институте сельскохозяйственных наук (SLU) для расчета распределения азота и фосфора в бассейне реки Фирис в Швеции. Позже модель получила развитие и нашла свое применение не только для реки Фирис, но и для многих других рек и озер [14].

Динамическая модель Fyris позволяет рассчитать объемы переносимого водными потоками азота и фосфора. Одно из главных предназначений модели – оценка эффективности различных мер, призванных снизить поступление органических веществ в реки и водоемы.

Временной шаг чаще всего устанавливается равным одному месяцу, а пространственный уровень соответствует водосбору. Объемы органических веществ, оставшихся в водоемах из-за осаждения или поглощения водной растительностью, рассчитывается в зависимости от температуры воды, концентрации биогенных веществ, расхода воды, площади поверхности озера или площади водной поверхности реки или ручья. Модель использует различные временные ряды параметров, применяемых в расчетах [14].

Данные, используемые для запуска модели, делятся на несколько категорий:

- данные, зависящие от времени, например, ряды наблюдений за концентрациями органики, ряды температуры воды или ряды расходов воды.
- независимые от времени данные, например, площадь озера, длина ручья и т.д.

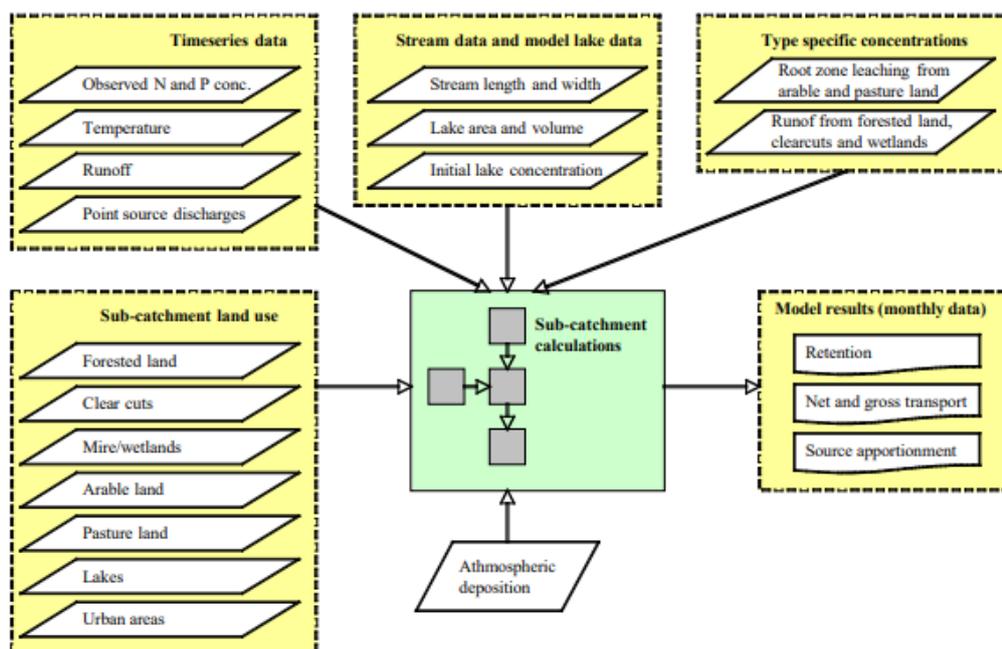


Рисунок 4.1 – Структурная схема исходных данных и получаемых результатов модели Fyris

4.1 Данные временных рядов

Очевидно, что такой подход требует очень большого количества входных данных. Эти данные должны описывать, как постоянные для всего водосбора параметры, так и характерные для определенного его участка. Учитывая то, что модель Fyris работает с временным шагом в один месяц, все наблюдения должны быть приведены к осредненному значению за месяц [15].

К таковым параметрам относятся:

- температура воды или воздуха.
- удельный расход воды.
- аккумуляция.
- точечные источники.

В самом лучшем случае при расчетах должна быть использована температура воды, но допустимо и использование температуры воздуха.

За удельный расход воды принимаются значения, измеренные непосредственно на водосборах. Однако, далеко не всегда расходы воды измеряются на

всех водотоках, включаемых в исследуемый водосбор. Эта проблема нивелируется с помощью допущения, которое позволит нам распределить расход, измеренный в устье характерного участка, по всем водотокам внутри этого участка [15].

Наглядный пример представлен на рисунке 4.2.

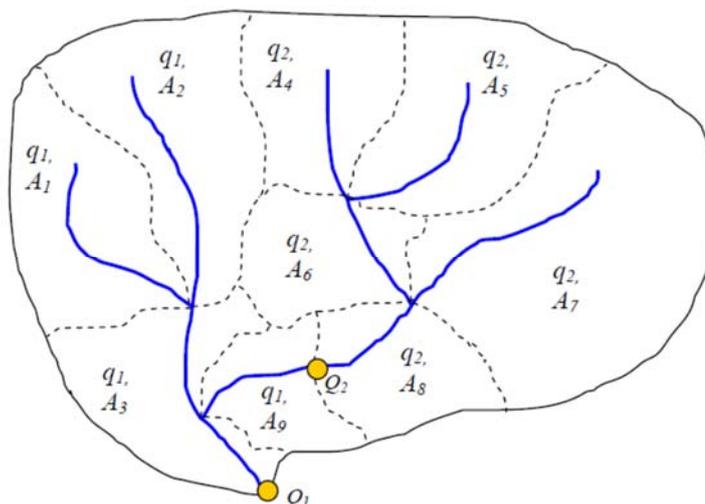


Рисунок 4.2 – Участки (А), посты с измеренными расходами (Q), удельные расходы каждого участка (q)

Как видно из рисунка, для каждого участка А расход q принимается равным значению Q, отнесенному к площади всех участков подбассейна

$$q_2 = \frac{Q_2}{A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8} \quad (4.1)$$

где: q_2 – удельный расход, применимый для подбассейнов 4, 5, 6, 7, 8;

A_i – площадь i-ого суббассейна.

Расход, измеренный на станции 1 (Q_1) включает расход, проходящий через станцию 2 (Q_2) и расход с суббассейнов 1, 2, 3, 9. Для определения q_1 надо вычесть из расхода Q_1 расход Q_2

$$q_1 = \frac{Q_1 - Q_2}{A_1 + A_2 + A_3 + A_9} \quad (4.2)$$

Аккумуляция также может быть включена в модель. Это позволит скорректировать значения расходов воды. Озера, чей оборот превышает несколько месяцев могут значительно влиять на транспортировку биогенных веществ. Изменение объемов озер тоже может влиять на транспортировку. Если имеются данные об изменении этих объемов, то они могут быть включены в модель [14].

Под основными точечными расходами подразумеваются разнообразные источники воды, ограниченные в пространстве. В основном они представлены точками сброса сточных вод с различных предприятий и сооружений.

Также модель учитывает множество разных характеристик, не распределяемых в рамках временного ряда. Сюда можно отнести:

- Параметры потока.
- Атмосферное осаждение органических веществ на поверхности воды.
- Второстепенные точечные источники.

Итоговым результатом работы всей модели является объем биогенных веществ, вынесенных с водосбора под влиянием всех учитываемых факторов.

4.2 Данные о землепользовании в суббасейнах

Каждый тип землепользования (i) имеет свой тип входной концентрации биогенных веществ c_i . Массовый расход биогенных веществ $S_i(t)$ для типа землепользования i получается путем умножения параметра концентрации c_i на площадь суббасейна (A) с соответствующим типом землепользования [14].

Некоторые источники входной концентрации могут испытывать изменения в течение моделируемого периода. Биогенная нагрузка для типов землепользования, где имеются подобные источники рассчитывается следующим образом:

$$S_i(t) = A_i * q(t) * c_i(\text{месяц}). \quad (4.3)$$

Таковыми территория могут быть горы, леса, вырубки, болота, города и деревни.

Тип концентрации антропогенной среды и городов часто принимается равным 0, а их сток рассматривается как один из второстепенных источников.

4.3 Данные потока

Длина и ширина потоков в рамках каждого водосбора. Площадь используется при расчете удержания и для определения атмосферного осаждения азота на поверхностные воды. Данные эти определяются с помощью геоинформационных систем [14].

4.4 Атмосферное осаждение

Общее выпадения азота на поверхность воды S_d в каждом суббассейне определяется при помощи удельного осаждение постоянно площади F_d , умноженного на сумму водотоков и площади поверхности водоема (озера) в подбассейне

$$S_d = (A_{lakes} + A_{stream}) * F_d \quad (4.4)$$

где: S_d – общее осаждение азота на поверхность воды;

A_{lakes} – площадь озер;

A_{stream} – площадь потоков;

F_d – удельное осаждение азота при постоянной площади.

4.5 Второстепенные точечные источники

Небольшие точечные источники могут включать в себя стоки из сельских домов, ферм и других сельскохозяйственных предприятий. Незначитель-

ные точечные источники считаются постоянными и не изменяются в зависимости от сезона. Данные по этим источникам приводятся в виде месячных нагрузок [14].

5 Модель ИНОЗ РАН

Модель выноса растворенных химических веществ с водосбора и формирования внешней нагрузки на водоем со стороны водосбора IL_LM создана в Институте озераедения РАН в 2014 году [16]. Разработка велась на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования стока и выноса химических веществ. При создании модели особенно учитывались рекомендации ХЕЛКОМ.

Модель решает задачи, связанные с количественной оценкой нагрузки на водоемы бассейна Балтийского моря. Модель позволяет учитывать влияние рассредоточенных и точечных источников загрязнения, прогнозировать развитие системы под влиянием климатических и антропогенных факторов и рассчитывать вынос примесей с водосбора.

Временной шаг модели может быть, как годовым, так и месячным.

Модель учитывает существующие ограничения со стороны информационного обеспечения со стороны государственных систем мониторинга водных объектов, а также учитывает недостаточность отчетности о сбросах сточных вод на водосборах России. Однако, необходимым условием применения модели является наличие информации об основных источниках нагрузки на исследуемый водоем.

В соответствии с положением ХЕЛКОМ, объектами применения модели могут служить контролируемые водосборы и неконтролируемые территории, требующие расчета следующих характеристик:

- Суммарная биогенная нагрузка на поверхность водосбора, создаваемая точечными и распределенными источниками загрязнений.
- Коэффициент удержания, определяющий долю удержания от суммарной нагрузки.
- Удержание биогенного вещества водосбором и гидрографической сетью.

- Природная биогенная нагрузка, сформированная выносом с необрабатываемых земель и части выноса с обрабатываемых земель, не зависящая от сельского хозяйства.

Общая структура, исходные данные, учитываемые параметры и итоговые результаты системы представлены на рисунке 5.1 [16].

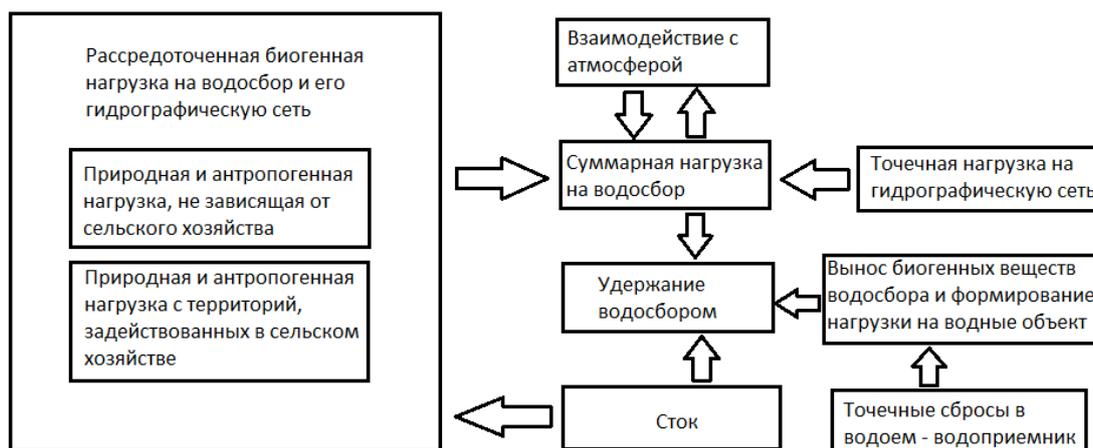


Рисунок 5.1 – Схема модели IL_LM

В соответствии с официальной терминология Хельсинкской Комиссии, объектами применения модели IL_LM могут служить контролируемые водосборы и неконтролируемые регионы, для которых требуется выполнение расчета следующих характеристик:

- суммарная биогенная нагрузка на поверхность водосбора, сформированная точечными и рассредоточенными источниками;
- коэффициент удержания, определяющий долю удержания от общей нагрузки в зависимости от особенностей стока;
- удержание органических веществ водосбором и гидрографической сетью в зависимости от значения общей нагрузки на водосбор и коэффициента удержания;

- природная органическая нагрузка, образовавшаяся из-за выноса с обрабатываемых земель и части выноса с обрабатываемых территорий, которая происходит независимо от сельскохозяйственной нагрузки.

Основными составляющими суммарного выноса с водосбора и нагрузки на водоем (L) являются [16]: рассредоточенная эмиссия органических веществ подстилающей поверхностью, не подвергающейся сельскохозяйственному влиянию (L_e), нагрузка, образованная сельским хозяйством (L_{agr}), сток точечных источников загрязнения на водосбор (L_{p1}) и в сам водоем (L_{p2}), а также обмен с атмосферой (L_a)

$$L = (L_e + L_{agr} + L_{p1} + L_a)k_t + L_{p2} \quad (5.1)$$

где: k_t – коэффициент выноса вещества, определяющийся по формуле:

$$k_t = 1 - k_r \quad (5.2)$$

где: k_r – коэффициент удержания вещества водосбором и его гидрографической сетью.

Сельскохозяйственная нагрузка может быть выражена, как комбинация нагрузки, сформированной минеральными удобрениями (L_{mf}), нагрузки, сформированной органическими удобрениями (L_{of}), и выноса химических веществ вместе с собранным урожаем (L_c)

$$L_{agr} = L_{mf} + L_{of} - L_c. \quad (5.3)$$

Точечными источниками загрязнения поверхностных вод обычно служат сбросы промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных предприятий. Математически эти загрязнения можно выразить, как произведение количества «нагрузкообразующих» единиц, например, голов скота на ферме (N_p), эмиссии химического вещества «нагрузкоформирующей» единицей (c_a) и

коэффициента, характеризующего снижение концентрации химических веществ в сточных водах после очистки (k_d)

$$L_p = N_p c_a k_d. \quad (5.4)$$

Значение k_d может быть различным и определяется заранее. В работах Хельсинкской комиссии эти значения принимаются равными 0.9 кг/год для фосфора и 4.4 кг/год для азота.

Очевидно, что анализ влияния точечных источников загрязнения на водосбор требует наличия большого количества исходных данных. Чаще всего этими данными служит промышленная документация предприятий, расположенных на водосборе. Несанкционированные сбросы зафиксировать особенно проблематично, ведь они могут быть задокументированы только при непосредственным наблюдением за ними. Все это приводит к тому, что значения выбросов, производимых точечными источниками загрязнения, принимаются значительно округленными.

Рассредоточенная нагрузка на водосбор, образовавшаяся из-за эмиссии химических веществ с различных подстилающих поверхностей в стекающие дождевые и талые воды, может быть рассчитана по формуле [16]:

$$L_e = 10^{-3} \sum k_{ei} A_i \quad (5.5)$$

где: k_{ei} – коэффициент эмиссии вещества с i -го типа подстилающей поверхности, кг/км² год;

A_i – площадь i -го типа подстилающей поверхности, км²;

Значение коэффициента k_{ei} определяется с помощью обобщения и анализа полевых исследований.

Существует и альтернативный метод определения рассредоточенной эмиссии химических веществ и нагрузки на водосбор. В нем используется зна-

чение концентрации примеси C (мг/л) в почвенных водах или первичных звеньях гидрографической сети для различных подстилающих поверхностей. Зависимость имеет вид:

$$L_c = 10^{-3} \sum C_i y_i A \quad (5.6)$$

где: C_i – средние концентрации примеси в стоке с i -го типа подстилающей поверхности, мг/л;

y_i – слой стока с i -го типа подстилающей поверхности, мм/год.

Для определения слоя стока u заданной вероятности превышения могут быть применены их аналитические кривые распределения, основанные на данных многолетнего наблюдения на реках, исследуемого водосбора. Также допустимо применение математических моделей, рассчитывающих гидрологические характеристики водосбора [16].

Оценка концентрации биогенных веществ, входящих в расчетные формулы модели, можно использовать результаты натурных изысканий по определению содержания растворенных примесей в почвенной воде или первичной ручейковой сети. Эти данные могут быть систематизированы и сведены в таблицы, которые могут быть применены в дальнейшем.

Исследования, проведенные в разных регионах России и других стран, позволили выявить определенные закономерности. Основные из них:

- уменьшение доли сельскохозяйственных территорий приводит к резкому снижению концентраций азота и фосфора в стоке;
- увеличение доли сельскохозяйственных территорий приводит к резкому возрастанию выноса органических веществ и увеличению разброса зафиксированных значений концентраций биогенных веществ.

Основной причиной возрастания биогенной нагрузки на водосбор является внесение минеральных и органических удобрений. Рассчитать поступление биогенных веществ на водосбор с минеральными удобрениями L_{mf} можно

с помощью региональных нормативов их внесения в почву. Однако, достаточно часто фиксируются отклонения от рекомендуемых нормативов. Для учета таких отклонений можно использовать информацию, предоставляемую государственными статистическими организациями.

Значительным источником загрязнений являются животноводческие фермы, на которых хранятся и используются разнообразные органические удобрения, в том числе и помет сельскохозяйственных животных. Оценка нагрузки L_{of} может быть выполнена с помощью следующей зависимости:

$$L_{of} = 10^{-3} \sum k_{fj} N_j \quad (5.7)$$

где: k_{fj} – коэффициент эмиссии азота или фосфора одного домашнего животного j -го наименования, кг/год;

N_j – количество домашних животных.

В случае, если часть органических удобрений покидает территорию водосбора или поступает извне, то влияние органических удобрений можно описать следующим уравнением:

$$L_{of} = 10^{-3} \sum k_{fj} N_j \pm L_{ex} \quad (5.8)$$

где: L_{ex} – массообмен с соседними территориями, т/год.

Для оценки выноса химических веществ за пределы водосбора с собранным урожаем (L_c) применяется следующая формула [16]:

$$L_c = 10^{-3} \sum K_s U_s A_s \quad (5.9)$$

где: K_s – вынос химического вещества с массой урожая культуры s -вида, кг/ц;

U_s – урожайность культуры s -вида, ц/(га год);

A_s – площадь, занятая культурой s -вида, га.

Региональными органами сельского хозяйства может выполняться расчет баланса биогенных веществ. Результаты этого расчета могут быть применены при расчетах выноса химического вещества за пределы водосбора.

Одним из самых действенных методов определения нагрузки, сформированной на сельскохозяйственных полях, является метод, разработанный специалистами ИАЭП в 2016 году [16]. Главным достоинством этого метода является расчет выноса органического вещества не только на основе внесения удобрений и выноса азота и фосфора вместе с урожаем, но и в зависимости от типа почв, их механического состава, удаленности поля от водного объекта. Также метод позволяет прогнозировать оценку снижения органического нагрузки при использовании передовых сельскохозяйственных технологий. Расчетная зависимость имеет следующий вид:

$$L_{agr} = 10^{-3} \sum A_i (M_{soil\ i} K_i + (a_1 M_{min\ i} + a_2 M_{org\ i}) K_6) K_2 K_3 K_4 K_5 \quad (5.10)$$

где: $M_{soil\ i}$, $M_{min\ i}$, $M_{org\ i}$ – содержание органического вещества в пахотном слое почвы, а также дозы внесения разнообразных удобрений на поля i -го сельскохозяйственного предприятия, кг/г;

A_i – площадь угодий i -го сельхозпредприятия, га;

a_1 – коэффициент, учитывающий усвоение минеральных удобрений сельскохозяйственными культурами;

a_2 – коэффициент, учитывающий усвоение органических удобрений сельскохозяйственными культурами;

K_1 – коэффициент, характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почв;

K_2 – коэффициент удаленности контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети;

K_3 – коэффициент, характеризующий тип почв;

K_4 – коэффициент, характеризующий механический состав почв;

K_5 – коэффициент, учитывающий структуру сельхозугодий, т.е. соотношение площадей пашни, многолетних трав, лугов и пастбищ;

K_6 – коэффициент, учитывающий использование передовых сельскохозяйственных технологий применения разнообразных удобрений.

Все эти коэффициенты безразмерные, а их значения определяются отдельно для каждого региона.

Влияние массообмена с атмосферой (L_a) обычно минимально и составляет 1-2% от общей фосфорной нагрузки. Однако, атмосферный массообмен оказывает значительное влияние на азотную нагрузку. В среднем, 50% азотного баланса приходится именно на массообмен с атмосферой.

Количественная оценка массообмена азота с атмосферой обязана учитывать атмосферные выпадения (L_{dep}) с твердыми и жидкими осадками, фиксацию азота из атмосферы биотой (L_{fix}), а также денитрификацию аммонийного азота и его улетучивание (L_{den}) [16]

$$L_a = L_{dep} + L_{fix} - L_{den}. \quad (5.11)$$

Атмосферное выпадение может быть определено как с помощью математического моделирования, так и с помощью непосредственных измерений химического состава выпавших осадков.

Практика показывает, что значительная часть химических веществ, поступающих на водосборы, не достигает замыкающих створов крупных, так как удерживается звеньями гидрографической сети. В соответствии с нормами Хельсинкской комиссии расчеты удержания необходимы для количественной оценки соотношения между сбросами на водосбор и выносом химических веществ в водоемы. Подобные расчеты могут быть выполнены с помощью различных средств:

- результатов непосредственных измерений на входе и выходе исследуемых гидрографических сетей;

- математических моделей удержания биогенных веществ в озерах с последующим распространением результатов на всю гидрографическую сеть бассейна;

- математических моделей, описывающих удержание сетью, включающей и реки, и озера.

Существует несколько разных математических моделей, описывающих удержание органического вещества водосбором. Хельсинская комиссия рекомендует использовать модель, разработанную в Институте водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии. Модель использует результаты обобщения натуральных наблюдений более чем на 100 европейских реках с площадями водосбора от 121 до 194000 км². Авторы модели предложили следующие эмпирические зависимости, связывающие коэффициент удержания k_r с модулем стока q , л/(км² сек) или гидравлической нагрузкой на водные объекты гидрографической сети HL , м/год.

$$k_r = k^* \left(1 - \frac{1}{1 + a_2 HL^{b_2}}\right) \quad (5.12)$$

$$k_r = k^* \left(1 - \frac{1}{1 + a_1 q^{b_1}}\right) \quad (5.13)$$

где: a_1 , b_1 , a_2 , b_2 – безразмерные эмпирические параметры;

k^* - калибровочный параметр;

Значение гидравлической нагрузки HL пропорционально модулю стока q и обратно пропорциональной относительной площади водной поверхности W , выраженной в % от общей площади водосбора:

$$HL = \frac{3,15q}{W}. \quad (5.14)$$

В модели IL_LM также предусмотрен расчет фоновой нагрузки, т.е. нагрузки, сформированной за счет выноса органических веществ с необрабатываемых земель и части выноса с обрабатываемых земель, который происходит вне зависимости от сельскохозяйственной деятельности [16].

Расчет осуществляется путем определения нагрузки и вычета отсюда нагрузки, сформированной антропогенными факторами. Коэффициенты эмиссии органических веществ антропогенными факторами заменяются коэффициентами эмиссии с естественных территорий. Выражение расчета фоновой эмиссии (L_e^{nat}) выглядит следующим образом:

$$L_e^{nat} = 10^{-3} \sum k_{ei} A_i \quad (5.15)$$

где: k_{ei} – коэффициент эмиссии вещества с i -го типа естественной подстилающей поверхности, кг/(км² год)

A_i – площадь i -го типа естественной подстилающей поверхности, км²;

Фоновая нагрузка (L^{nat}) может быть рассчитана следующим образом:

$$L^{nat} = (1 - k_r) 10^{-3} \sum k_{ei} A_i \quad (5.16)$$

где: k_r – коэффициент удержания химического вещества.

Однако, эти расчеты не позволяют выявить антропогенную и природную составляющую массообмена с атмосферой. Это может значительно повлиять на количественную оценку фоновой нагрузки общим фосфором, ведь он является водным мигрантом и значения атмосферного выпадения фосфора на водоем весьма невелики. Азот же является атмосферным мигрантом, но выделение антропогенных и природных его источников не проводится.

Модель IL_LM прошла верификацию на ряде объектов Северо-Запада Российской Федерации [16]. Испытания проводились на реках Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка, а также на многочисленных притоках Финского залива. Результаты этих исследований продемонстрировали, что модель IL_LM может

быть использована для расчета органической нагрузки на Балтийское море и Финский залив, в частности.

6 Расчет биогенной нагрузки

6.1 Исходные данные

Математические модели могут использоваться в методике анализа поступления биогенных веществ с водосборов в водные объекты. Специально для проведения такого анализа создана модель FyrisNP, использованная и в данной работе.

Дополнить методику использования математических моделей может использование модели HYPE, рассчитывающий расходы воды в зависимости от характеристик водосбора. Однако, в данной работе модель HYPE не используется из-за необходимости проведения дополнительной подготовки и непреодолимых технических неполадок.

Модель FyrisNP позволяет рассчитать нагрузку по общему азоту и фосфору на водосбор реки, учитывая природную и антропогенную нагрузку на водосбор.

В качестве тестового объекта была выбрана река Селезневка с замыкающим створом в месте ее впадения в Выборгский залив. Исходными данными стали среднемесячные расходы воды, температура воздуха и измеренные концентрации исследуемых веществ.

Перед началом моделирования с помощью ГИС-системы ArcGIS была проведена разбивка водосбора реки на подбассейны. В итоге было выделено 14 подбассейнов.

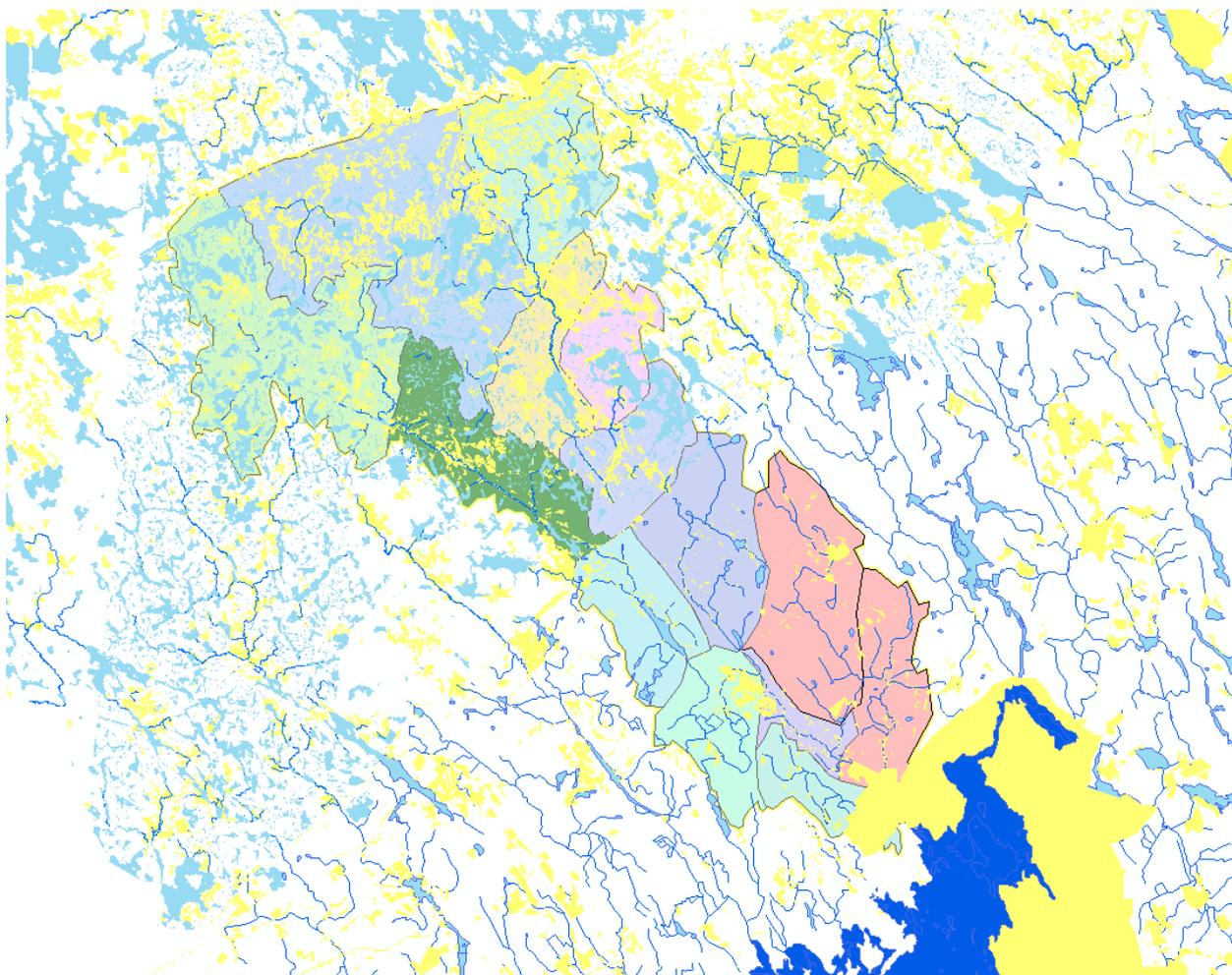


Рисунок 6.1 – Бассейн реки Селезневка

Каждый суббассейн был обработан с помощью ArcMap. Были определены площади лесов, болот, озер, площади жилой и индустриальной застройки. Все эти данные вносятся в файл с параметризацией модели.

Файл параметризации представляет собой файл Excel, содержащий несколько вкладок, содержащих в себе определенные параметры, используемые в ходе моделирования.

Обязательными вкладками являются:

- Catchment – характеристика подбассейнов,
- COBS - концентрация органических веществ в воде (валовый азот или фосфор),
- Major point sources - основные точечные источники загрязнения,
- Minor point sources - второстепенные точечные источники загрязнения,
- Temperature - температура воды,

Рисунок 6.3 – План-схема суббассейнов реки Селезневка, выстроенная программой FyrisNP

Программа FyrisNP также способна автоматически составить схемы распределения залесенности, заболоченности, урбанизированности по исследуемым водосборам (рисунок 6.4).

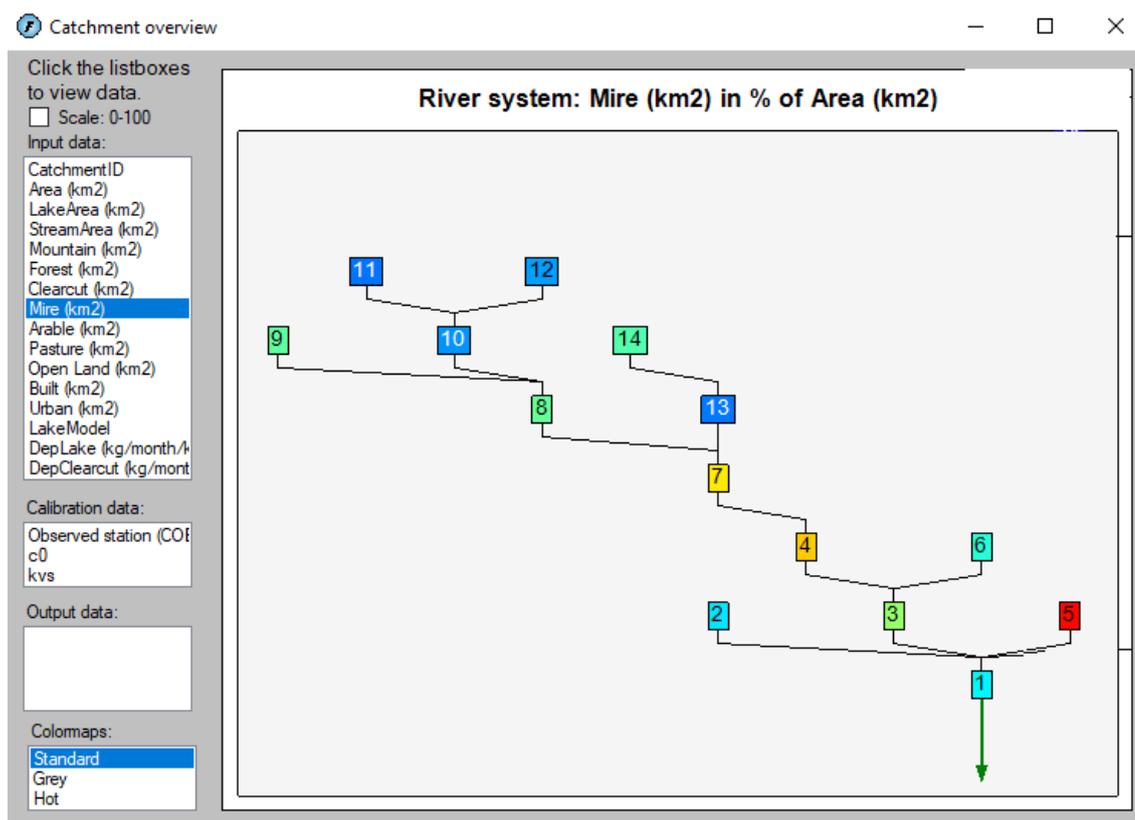


Рисунок 6.4 – План-схема распределения болот по суббассейнам реки Селезневка, составленная программой Fyris NP

6.2 Калибровка модели

Для запуска модели в работу необходимо провести ее калибровку. Расчет концентраций биогенных наносов в воде корректируется с помощью двух критериев:

– c_0 - эмпирический калибрационный критерий, определяющий уменьшение удержания биогенов в воде в зависимости от температуры воды, в диапазоне 0 – 20°C;

– kvs - эмпирический калибрационный критерий, регулирующий расходы воды.

Калибровка проводится для подбора критериев, связывающих описанные в исходных данных условия с фактическими измеренными результатами.

Калибровка может быть проведена двумя методами, а именно: ручной и автоматический.

Ручная калибровка позволяет пользователю самому настраивать критерии, точнее определяя связь между исходными данными модели и фактическими результатами. Ручная калибровка позволяет настроить время моделирования и значение калибрационных критериев. Запуск калибровки осуществляется кнопкой RUN, расположенной в верхнем правом углу.

Автоматическая калибровка позволяет подобрать наилучшие значения калибрационных критериев в автоматическом режиме. Полученные значения позже можно вставить в режим ручной калибровки.

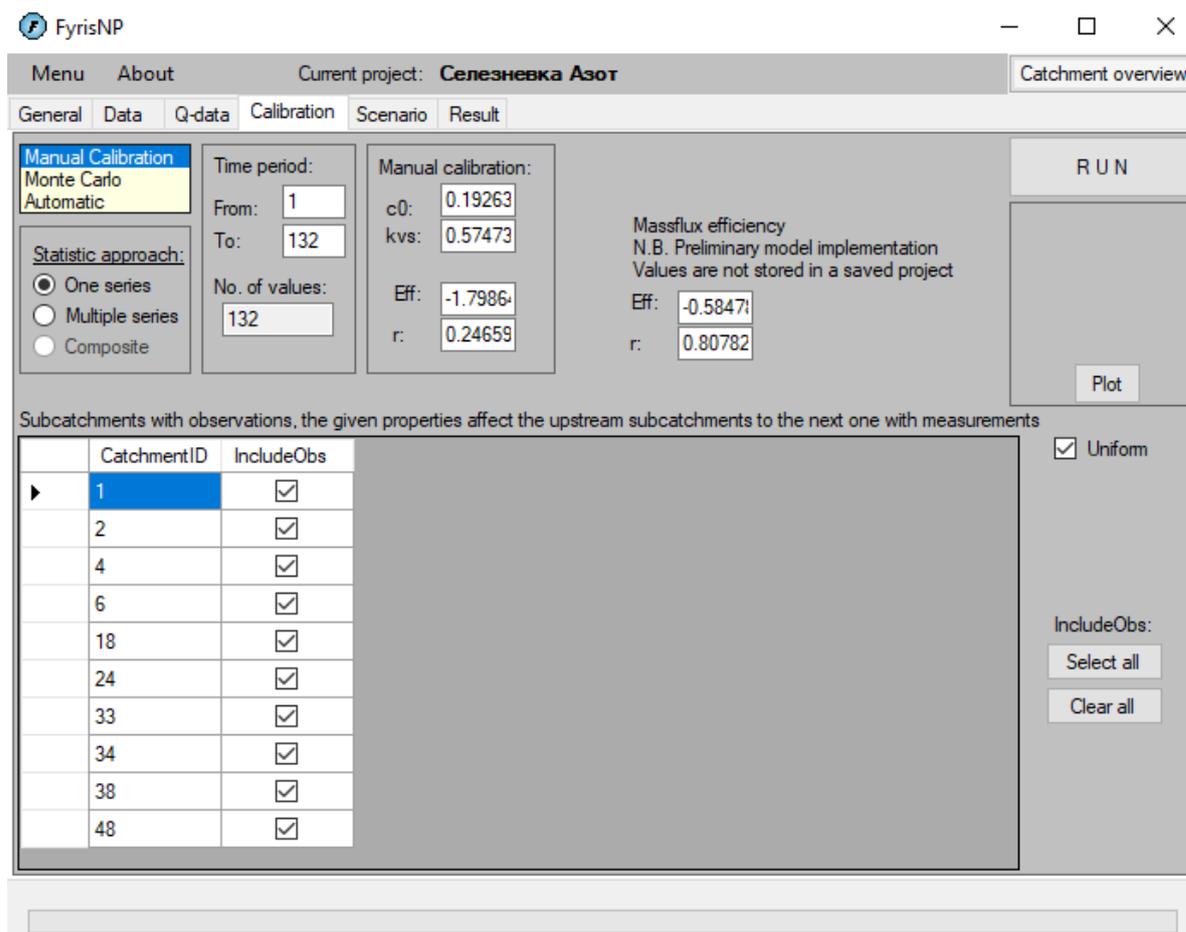
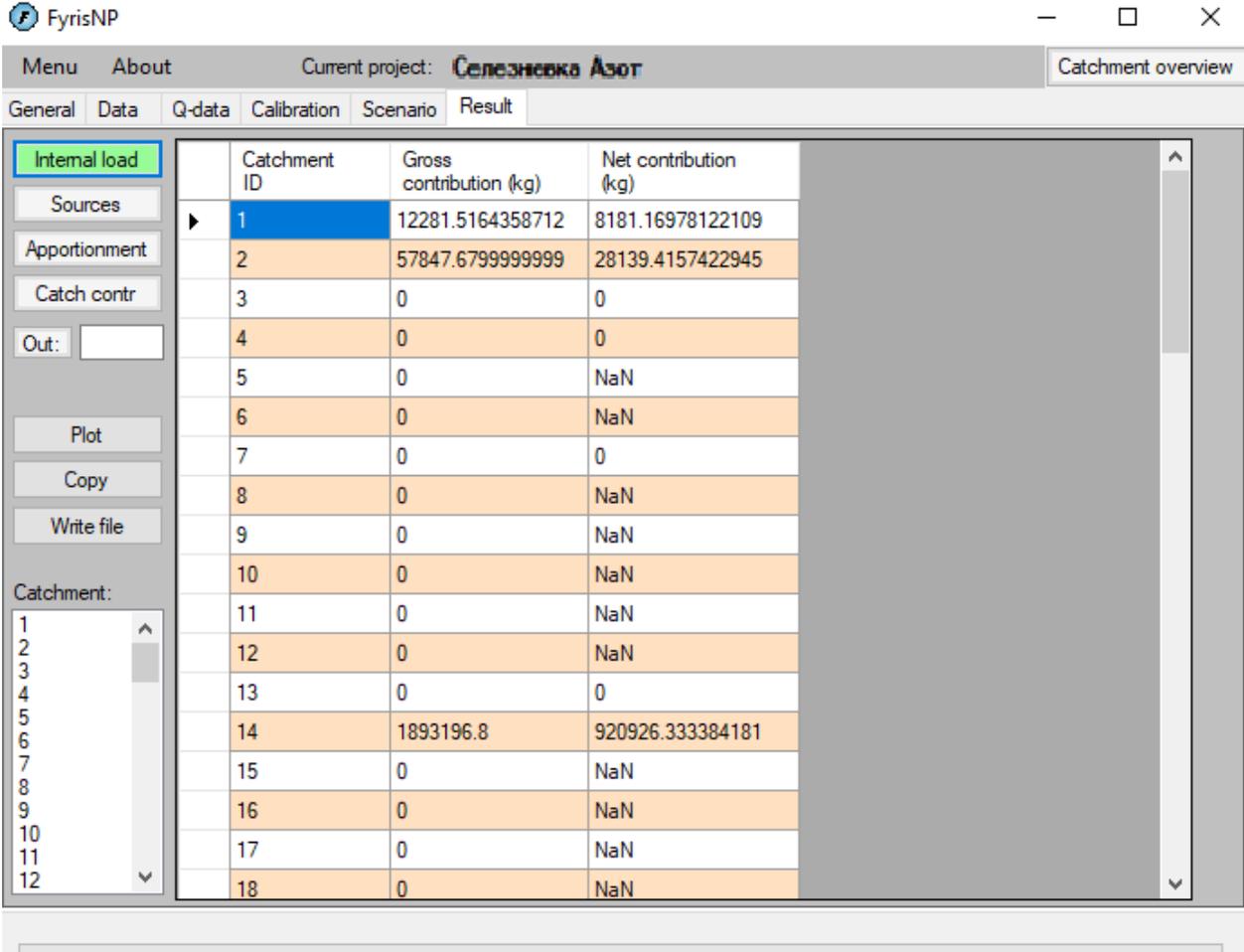


Рисунок 6.5 – Окно ручной калибровки модели в программе FyrisNP

6.3 Расчет нагрузки реки Селезневка

После подбора наилучших параметров калибровки производится расчет среднегодовой нагрузки по общему азоту и фосфору. Расчет производится отдельной для каждого месяца на каждом суббассейне.

Результаты, выводимые программой, представлены на рисунке 6.6.



The screenshot shows the FyrisNP software window with the 'Result' tab selected. The table displays the following data:

Catchment ID	Gross contribution (kg)	Net contribution (kg)
1	12281.5164358712	8181.16978122109
2	57847.67999999999	28139.4157422945
3	0	0
4	0	0
5	0	NaN
6	0	NaN
7	0	0
8	0	NaN
9	0	NaN
10	0	NaN
11	0	NaN
12	0	NaN
13	0	0
14	1893196.8	920926.333384181
15	0	NaN
16	0	NaN
17	0	NaN
18	0	NaN

Рисунок 6.6 – Результирующее окно программы FyrisNP, содержащее итоги расчетов стока общего азота из реки Селезневка

Все результаты также могут быть визуализированы на специальных графиках, составляемых программой.

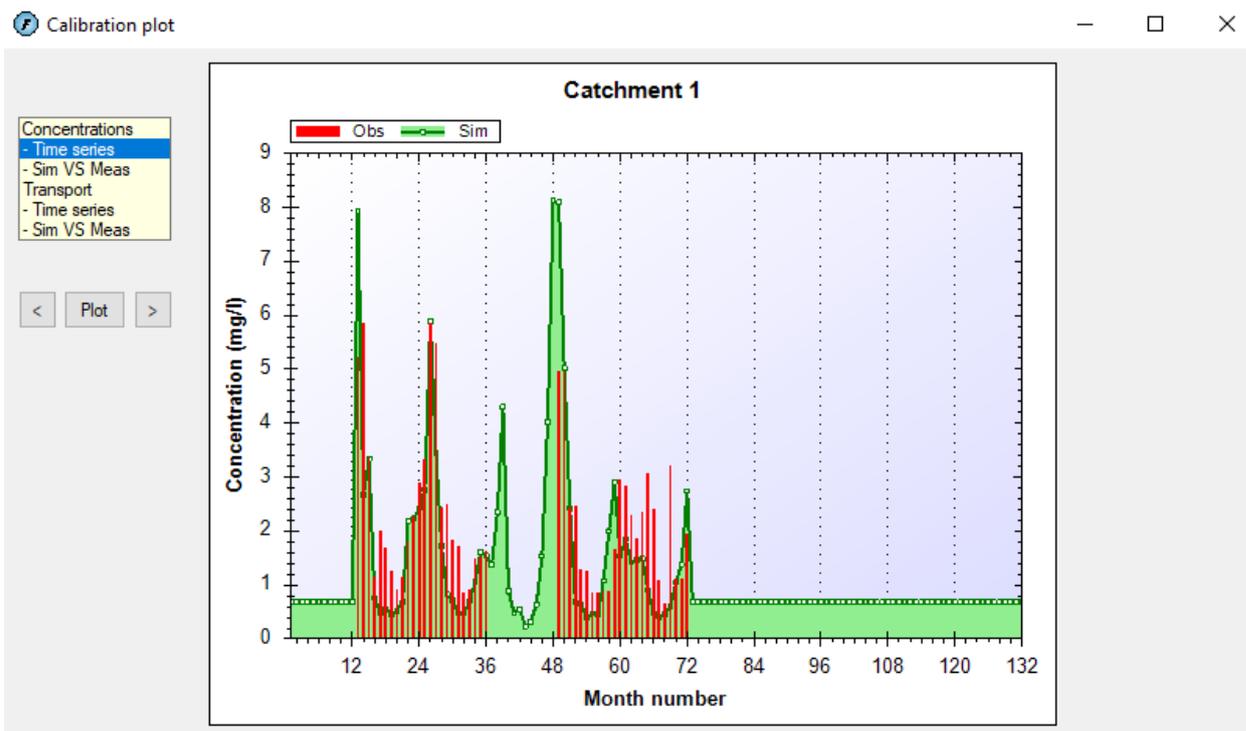


Рисунок 6.7 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных

Смоделированные показатели схожи с измеренными и имеют общие тенденции к изменению. Это позволяет сделать вывод о возможности применения модели FyrisNP для моделирования стока биогенных наносов в реке Селезневка.

6.4 Применение модели на реках Черная и Гороховка

В качестве рек, на которых проходило дополнительное тестирование модели были выбраны небольшие реки в Ленинградской области, а именно реки Черная и Гороховка.

Для них, как и для Селезневки, были выделены суббассейны с применением инструментов ArcGIS (рисунки 6.8, 6.9).

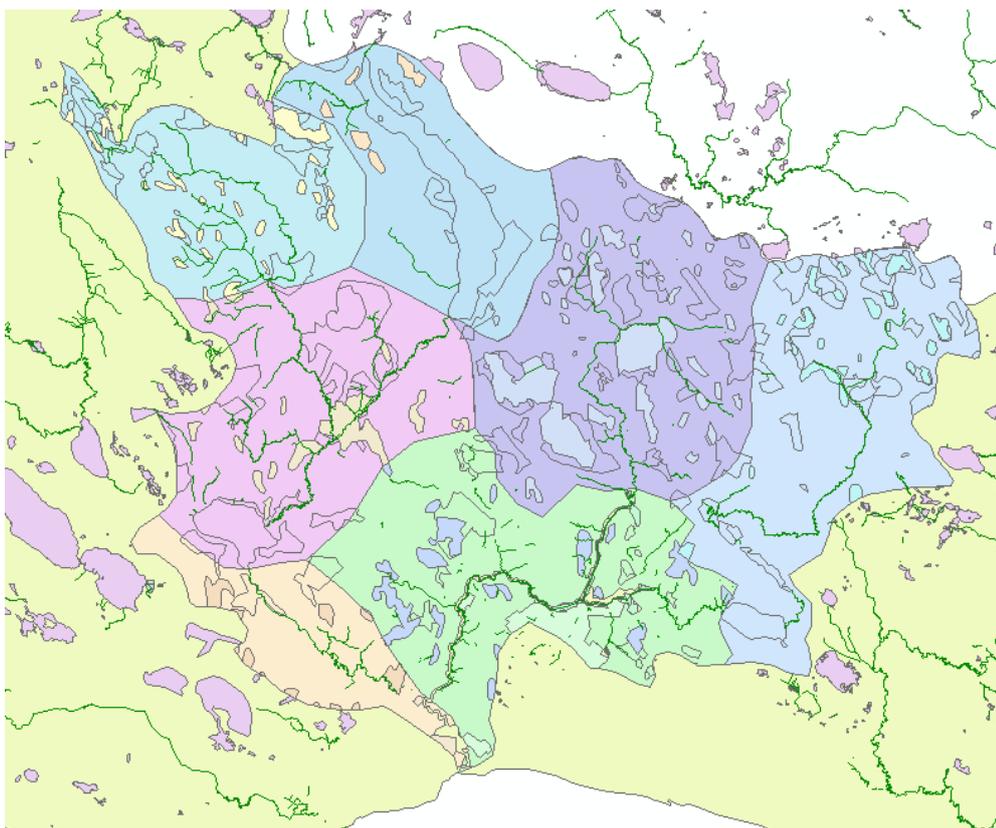


Рисунок 6.8 – Суббассейны реки Черная

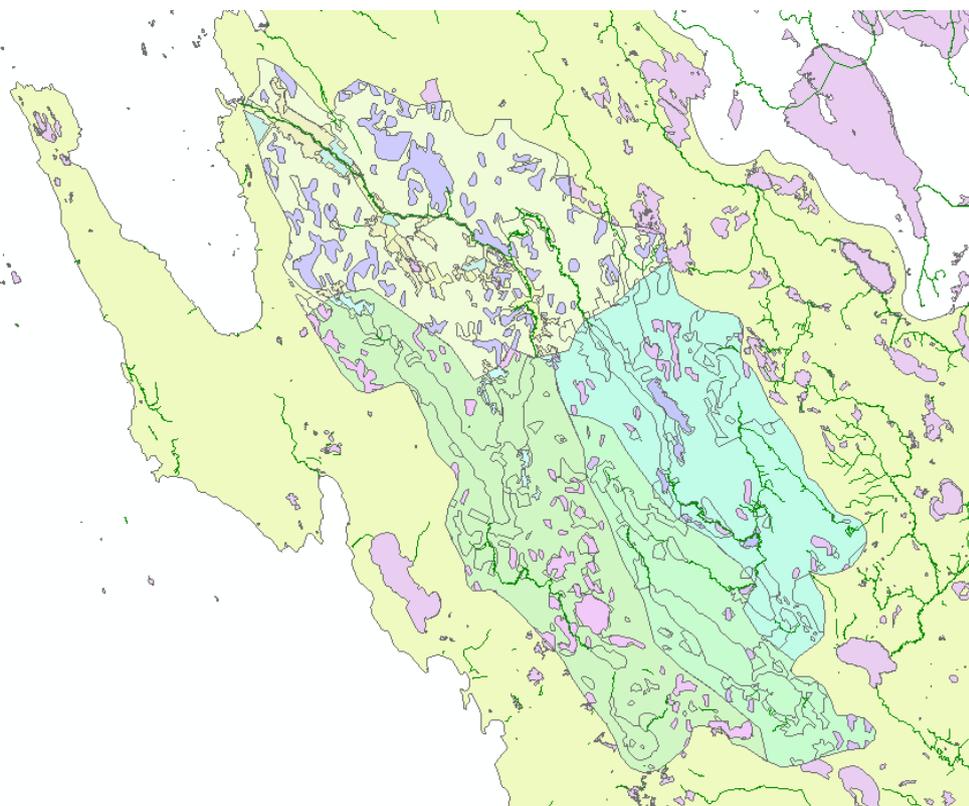


Рисунок 6.9 – Суббассейны реки Гороховка

Для каждого суббассейна был определен характер подстилающей поверхности и относительная площадь каждого типа ее типа.

На основе этих данных составлены файлы параметризации, подгружаемые в модель FyrisNP (рисунки 6.10, 6.11).

Полученные результаты расчета нагрузки по азоту представлены на рисунке 6.12 и сведены в таблицу 6.1. Полученные результаты расчета нагрузки по фосфору представлены на рисунках 6.13 – 6.15 и сведены в таблицу 6.2.

The screenshot shows the FyrisNP software interface. The title bar indicates the current project is "Гороховка азот". The main window displays a table with the following data:

Catchment ID	Gross contribution (kg)	Net contribution (kg)
1	38135.7816112404	27377.5995353489
2	49.392	21.0026287051504
3	1792.8	930.368020376083
4	7395.3	3144.653791367
5	0	NaN
6	0	NaN
7	0	NaN
8	0	NaN
9	0	NaN
10	0	NaN
11	0	NaN
12	0	NaN
13	0	NaN
14	0	NaN
15	0	NaN
16	0	NaN
17	0	NaN
18	0	NaN

Рисунок 6.10 – Результирующее окно программы FyrisNP, содержащие итоги расчетов стока общего азота из реки Гороховка

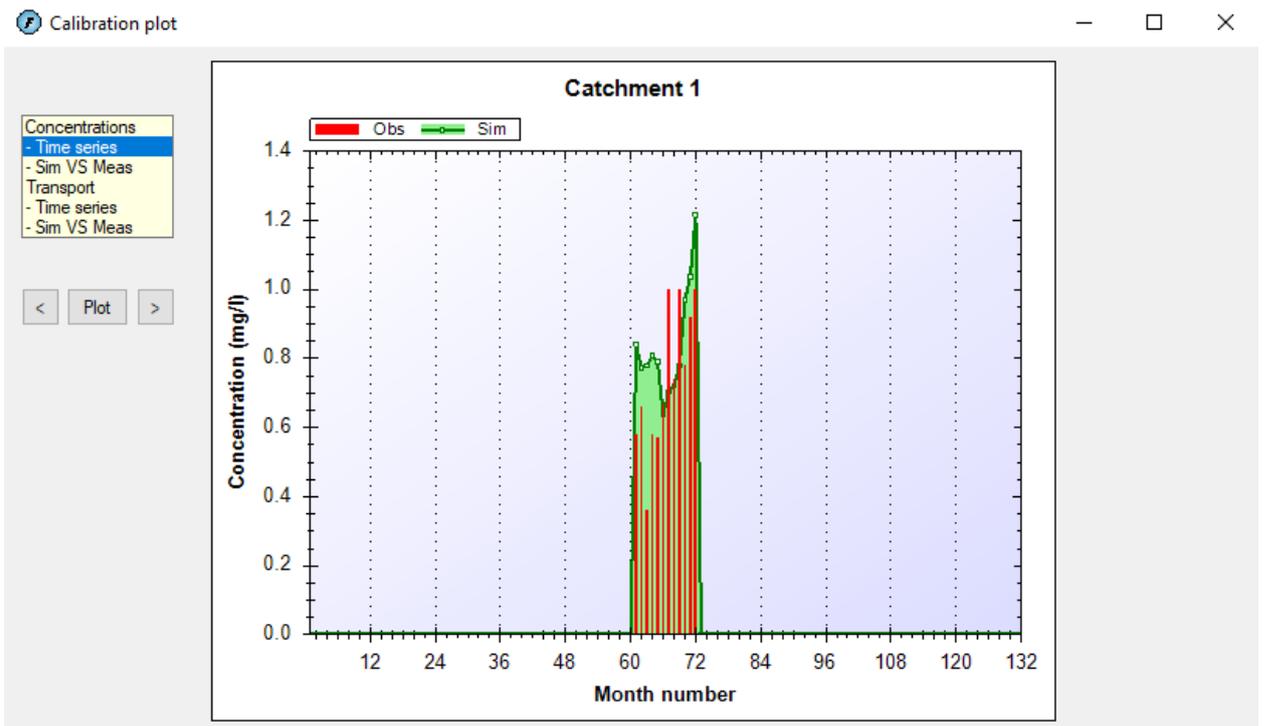


Рисунок 6.11 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных в окне программы

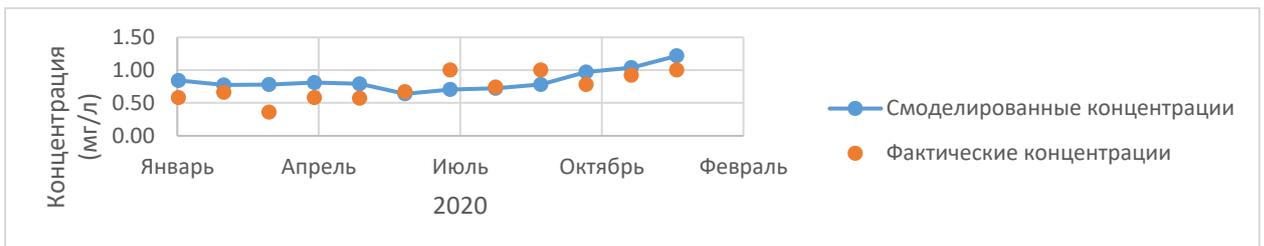


Рисунок 6.12 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на р. Гороховка

Таблица 6.1 – Результаты работы программы и их погрешности (р. Гороховка)

Год	Месяц	Концентрация (мг/л)	Измеренные	Абс, Погр	Отн, Погр
2020	Январь	0,84	0,58	0,26	31,08
2020	Февраль	0,77	0,66	0,11	14,65
2020	Март	0,78	0,36	0,42	53,83
2020	Апрель	0,81	0,58	0,23	28,34
2020	Май	0,79	0,57	0,22	27,86
2020	Июнь	0,64	0,67	-0,03	-5,11
2020	Июль	0,70	1,00	-0,30	-42,14
2020	Август	0,72	0,74	-0,02	-2,58
2020	Сентябрь	0,78	1,00	-0,22	-28,18
2020	Октябрь	0,97	0,78	0,19	19,61
2020	Ноябрь	1,04	0,92	0,12	11,26
2020	Декабрь	1,22	1,00	0,22	17,79

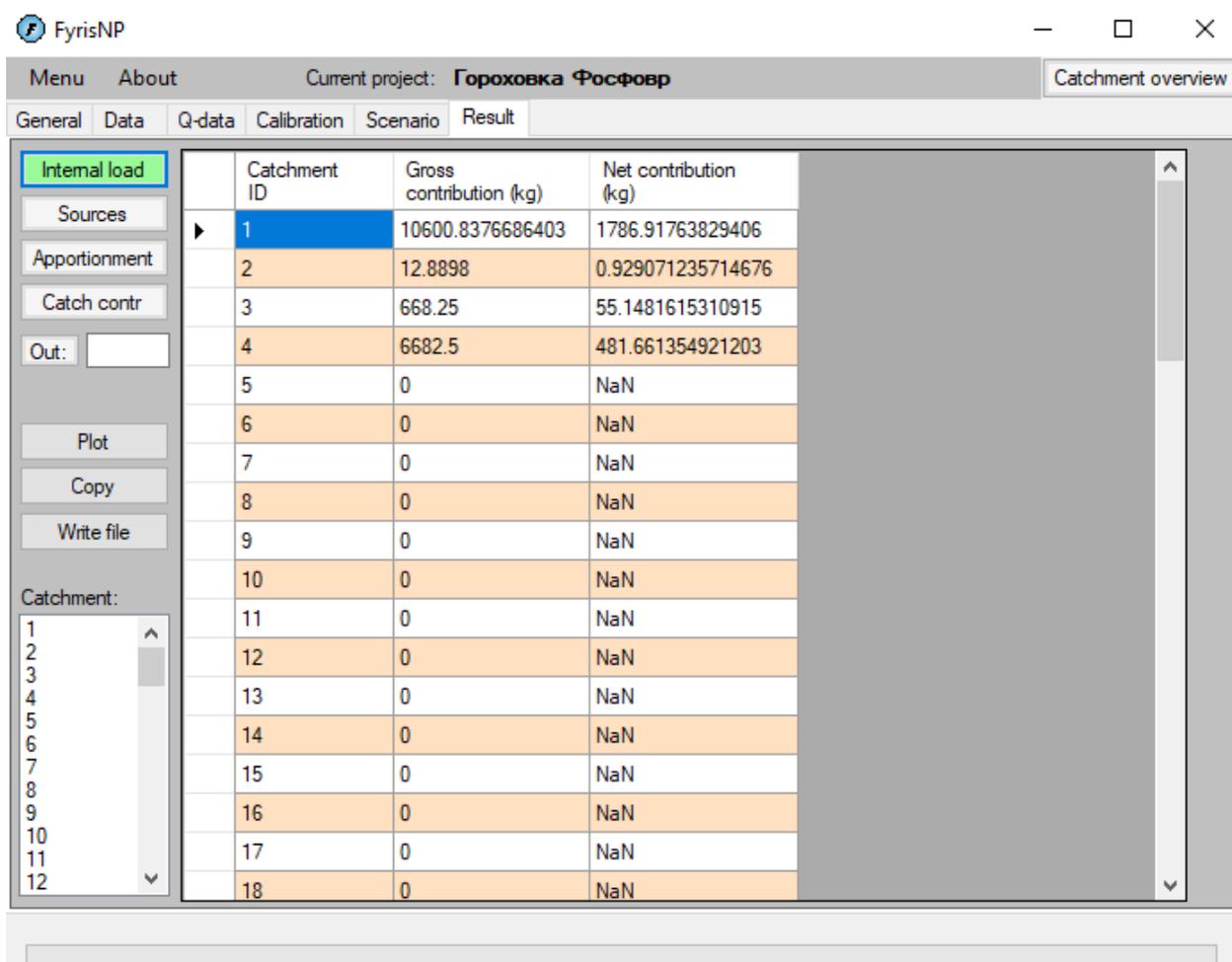


Рисунок 6.13 – Результирующее окно программы FyrisNP, содержащие итоги расчетов стока общего фосфора из реки Гороховка

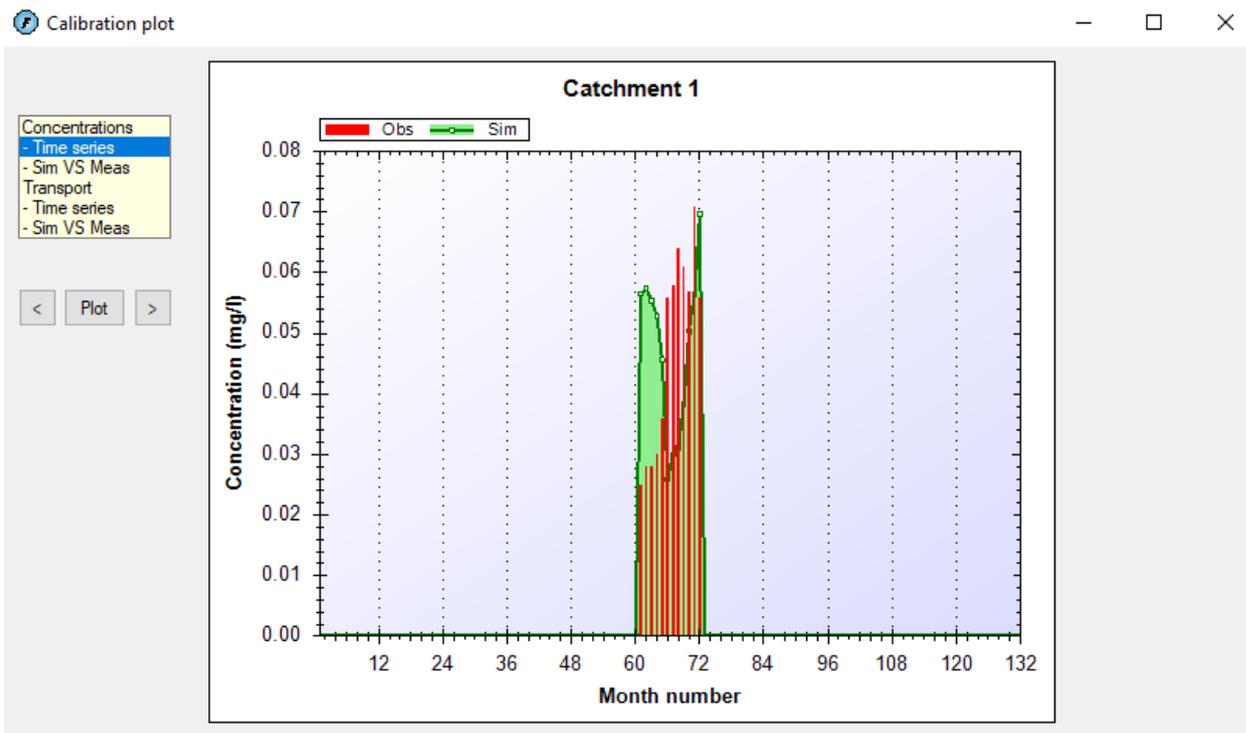


Рисунок 6.14 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных на р. Гороховка в окне программы



Рисунок 6.15 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных на р. Гороховка

Таблица 6.2 – Результаты работы программы и их погрешности (фосфор, р. Гороховка)

Год	Месяц	Концентрация (мг/л)	Измеренные	Абс, Погр	Отн, Погр
2020	Январь	0,06	0,03	0,03	55,79
2020	Февраль	0,06	0,03	0,03	51,25
2020	Март	0,06	0,03	0,03	49,45
2020	Апрель	0,05	0,03	0,02	43,29
2020	Май	0,05	0,04	0,01	21,12
2020	Июнь	0,03	0,06	-0,03	-116,11
2020	Июль	0,03	0,06	-0,03	-93,57
2020	Август	0,03	0,06	-0,03	-105,60
2020	Сентябрь	0,04	0,06	-0,02	-59,00
2020	Октябрь	0,05	0,06	-0,01	-13,14
2020	Ноябрь	0,06	0,07	-0,01	-25,64
2020	Декабрь	0,07	0,06	0,01	19,62

Полученные результаты расчета нагрузки по азоту на р. Черная представлены на рисунке 6.16 – 6.18 и сведены в таблицу 6.3. Полученные результаты расчета нагрузки по фосфору на р. Черная представлены на рисунках 6.19 – 6.21 и сведены в таблицу 6.4.

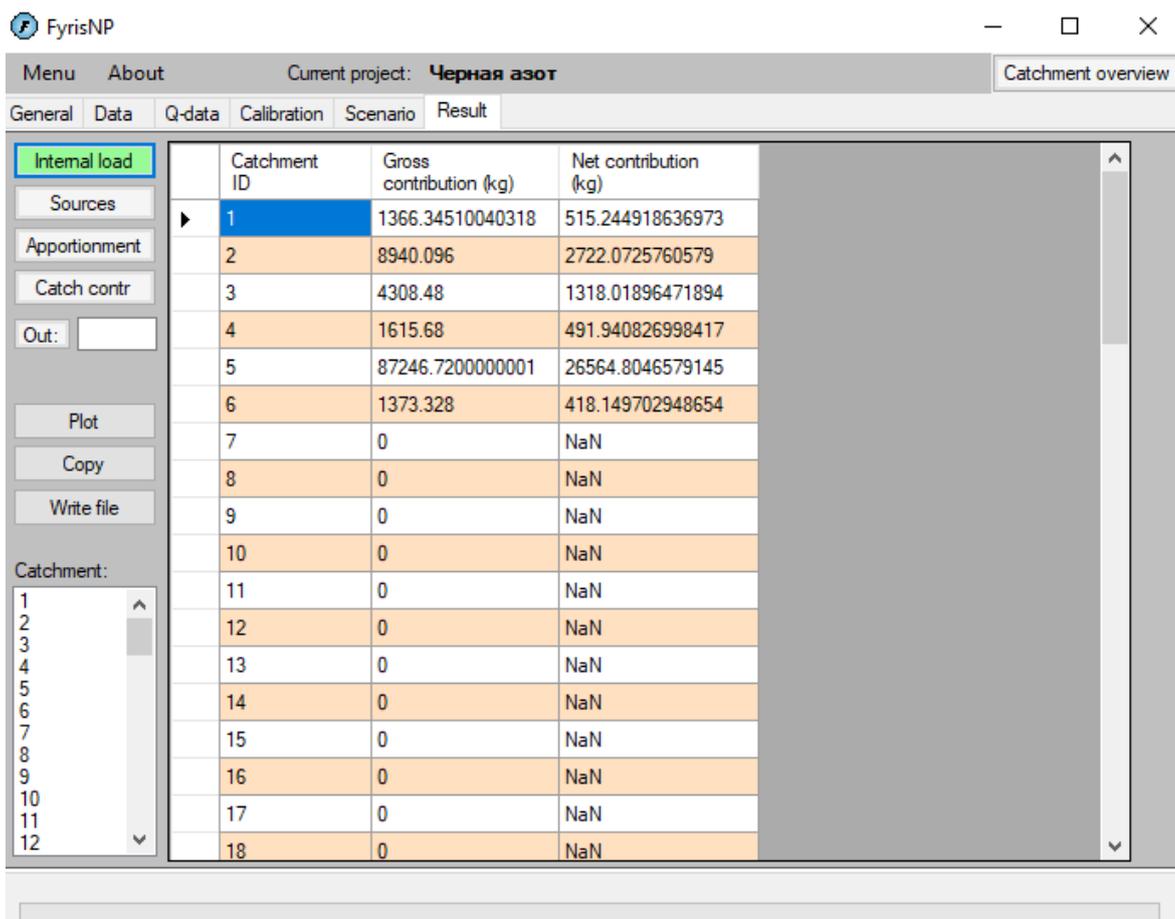


Рисунок 6.16 – Результирующее окно программы FyrisNP, содержащие итоги расчетов стока общего азота из реки Черная

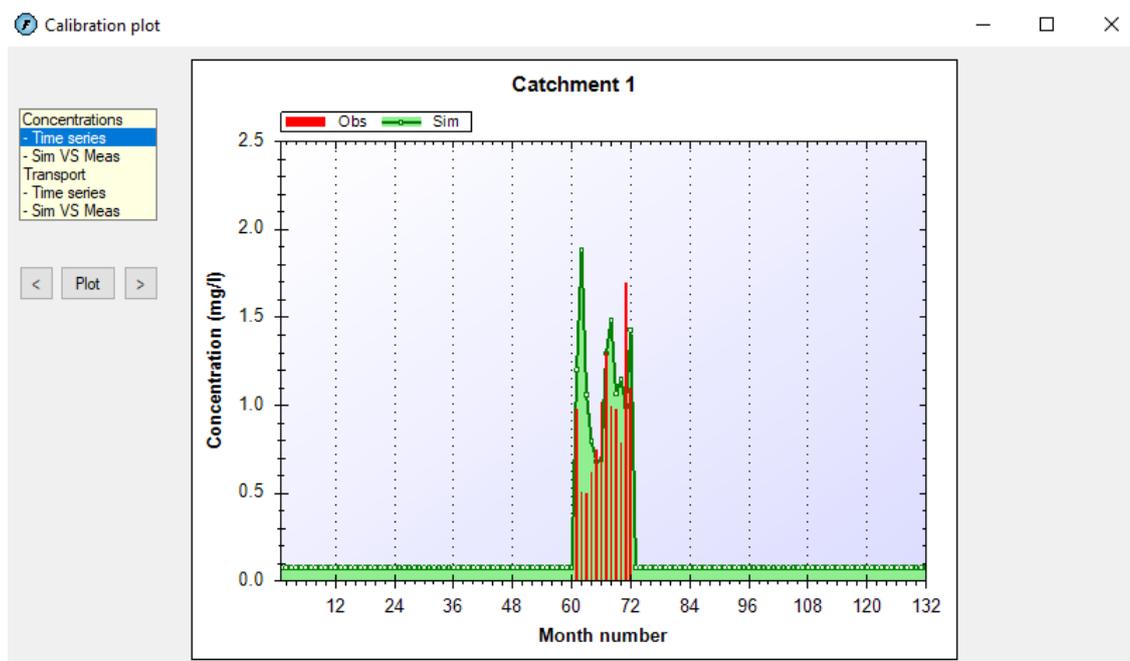


Рисунок 6.17 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на р. Черная

Рисунок 6.18 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на р. Черная



Таблица 6.3 – Результаты работы программы и их погрешности (азот, р. Черная)

Год	Месяц	Концентрация (мг/л)	Измеренные	Абс, Погр	Отн, Погр
2020	Январь	1,20	0,98	0,22	18,43
2020	Февраль	1,89	0,51	1,38	72,95
2020	Март	1,06	0,50	0,56	52,80
2020	Апрель	0,80	0,62	0,18	22,47
2020	Май	0,68	0,75	-0,07	-10,14
2020	Июнь	0,70	1,02	-0,32	-46,34
2020	Июль	1,30	1,30	0,00	-0,23
2020	Август	1,49	1,00	0,49	32,68
2020	Сентябрь	1,07	0,98	0,09	8,12
2020	Октябрь	1,15	0,79	0,36	31,28
2020	Ноябрь	1,00	1,70	-0,70	-70,23
2020	Декабрь	1,43	1,10	0,33	23,13

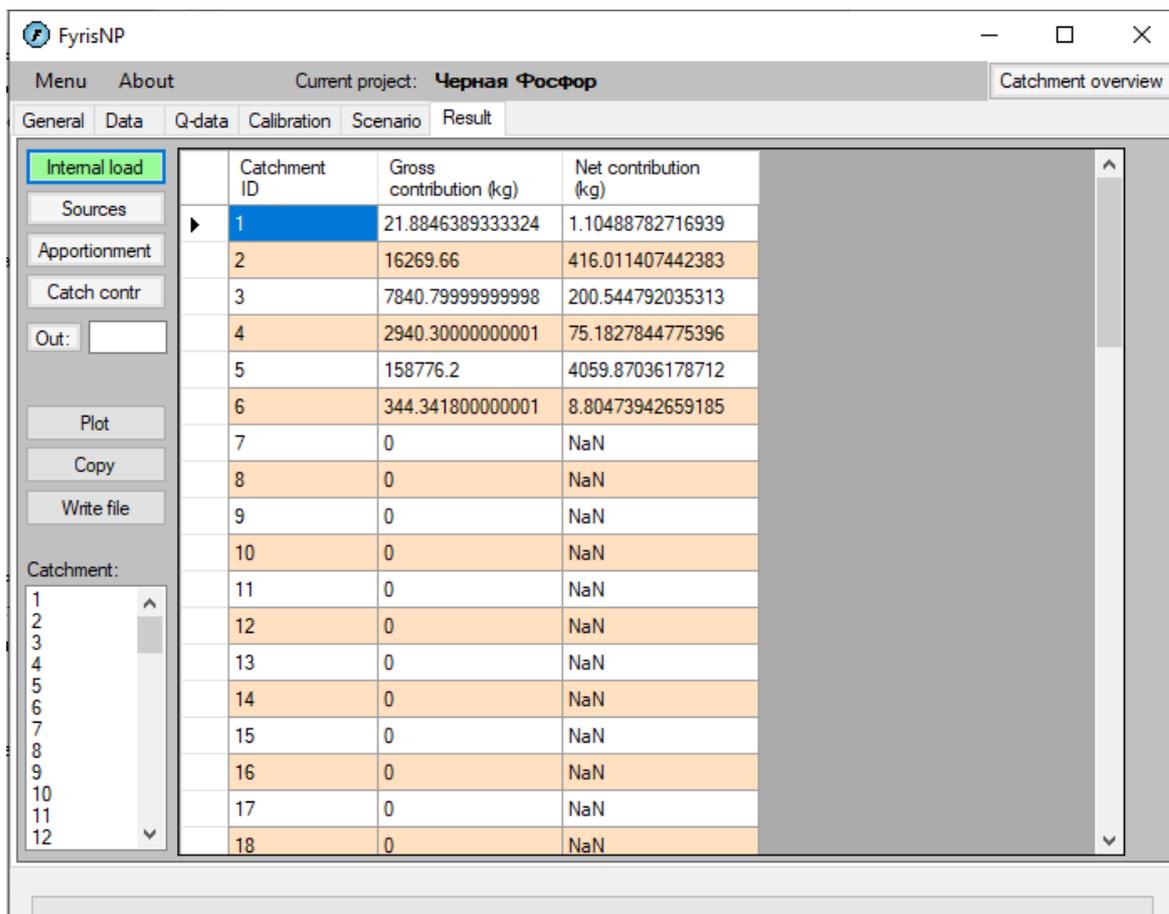


Рисунок 6.19 – Результирующее окно программы FyrisNP, содержащие итоги расчетов стока общего фосфора из реки Черная

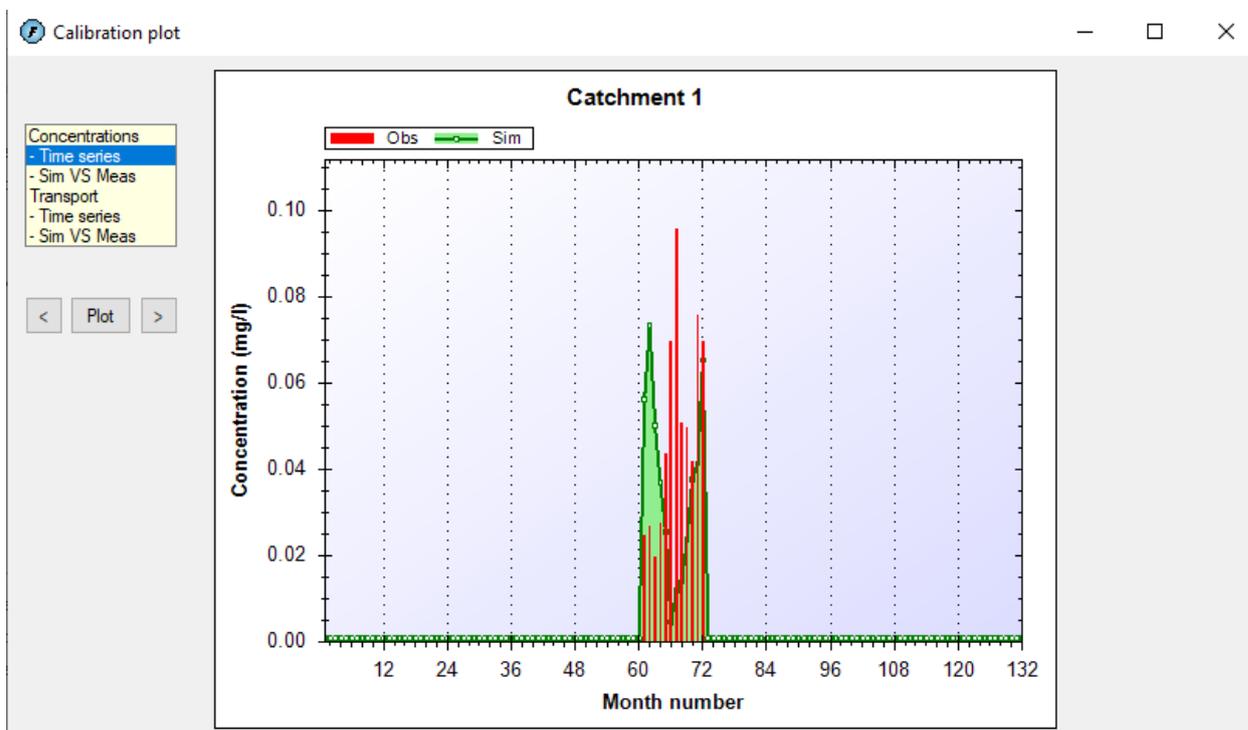


Рисунок 6.20 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных в окне программы

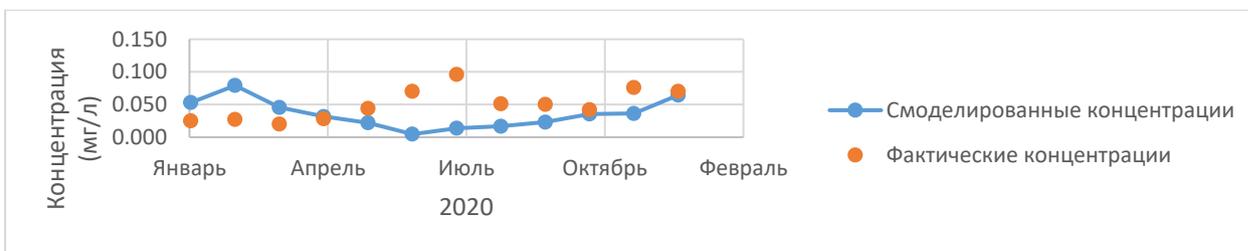


Рисунок 6.21 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных в окне программы

Таблица 6.4 – Результаты работы программы и их погрешности (фосфор, р. Черная)

Год	Месяц	Концентрация (мг/л)	Измеренные	Абс, Погр	Отн, Погр
2020	Январь	0,05	0,03	0,03	52,72
2020	Февраль	0,08	0,03	0,05	65,86
2020	Март	0,05	0,02	0,03	56,08
2020	Апрель	0,03	0,03	0,00	11,38
2020	Май	0,02	0,04	-0,02	-100,70
2020	Июнь	0,00	0,07	-0,07	-1396,06
2020	Июль	0,01	0,10	-0,08	-607,82
2020	Август	0,02	0,05	-0,03	-205,74
2020	Сентябрь	0,02	0,05	-0,03	-117,38
2020	Октябрь	0,04	0,04	-0,01	-18,70
2020	Ноябрь	0,04	0,08	-0,04	-109,64
2020	Декабрь	0,06	0,07	-0,01	-8,83

Полученные результаты применения модели FyrisNP на малых реках Ленинградской области продемонстрировали лучшие результаты, близкие к измеренным параметрам. Отличия объясняются дополнительной антропогенной нагрузкой, не учтенной при проработке моделей, и недостаточностью данных фактических измерений на малых реках Ленинградской области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Своевременная точная оценка состояния вод Балтийского моря и Финского залива, организация необходимых мероприятий в сфере охраны окружающей среды, оценка эффективности уже применяемых решений требует предоставления точных и надежных сведений о стоке загрязняющих веществ в Балтику с территории Российской Федерации. В рамках ХЕЛКОМ Россия обязана предоставлять эту информацию в положенный срок и в достаточном объеме.

Однако, далеко не на всех реках страны организованы регулярные гидрологические и гидрохимические наблюдения. Единственный способ получить необходимую информацию по рекам в неосвещенных районах – математическое моделирование.

Моделирование биогенных наносов, в идеальных условиях, должно начинаться с гидрологического моделирования, ведь расход биогенных наносов напрямую связан с расходом воды. Математические модели, описывающие формирование речного стока, позволяют определить значения стока воды и его изменение в пространстве и времени без проведения непосредственных наблюдений, что очень полезно в ситуации, когда объектом исследования становится река в малоизученном или труднодоступном районе.

Непосредственные наблюдения, проводимые на реках, часто не дают полного представления о ситуации на всем водосборе. Зачастую точки мониторинга расположены не в замыкающем створе водосбора, куда попадает весь биогенный сток, а в точке, приуроченной к какому-нибудь инфраструктурному сооружению (мосту, дороге и т.д.). Подобное расположение не даст исследованию охватить весь водосбор водного объекта. Математическая модель же сможет провести расчеты для любого бассейна и подбассейна в любом створе.

Основной задачей выпускной квалификационной работы стало изучение моделей, рекомендуемых ХЕЛКОМ.

Были изучены три модели: модель Нуре, призванная рассчитывать гидрологические характеристики исследуемых объектов, модель FyrisNP, предназначенная для расчетов биогенного стока и отечественная модель ИНОЗ РАН, позволяющая определять вынос растворенных химических веществ с водосбора.

В качестве основного объекта исследования была выбрана река Селезневка, впадающая в Выборгский залив. На реке Селезневке проводится регулярный мониторинг, который позволит сравнить результаты работы математической модели с натурными данными. После тестирования модели были также проведены исследования на малых реках Ленинградской области, а именно на реках Черная и Гороховка.

Непосредственное тестирование, по техническим причинам, прошла только модель FyrisNP. Была проведена параметризация модели, калибровка и расчет.

Моделирование продемонстрировало достойные результаты. Улучшить их позволит дальнейшая проработка модели и удлинение ряда измеренных концентраций.

Полученные результаты демонстрируют общность своих тенденций с результатами непосредственных наблюдений, что допускает применение этих моделей при формировании ежегодных отчетов ХЕЛКОМ при условии наличия более точной информации о сторонних источниках биогенного загрязнения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад / под ред. Е. Н. Таракановой. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 700 с.
2. Сенников А.Н. Фитогеографическое районирование Северо-Запада европейской части России (Ленинградская, Псковская и Новгородская области) // Биогеография Карелии. Труды Карельского научного центра РАН Выпуск 7. – Петрозаводск: 2005. – С. 206 – 243.
3. Энциклопедия. Балтийское море [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://knowledge.su/b/baltiyskoe-more> (дата обращения – 23.03.2023).
4. РИА Новости. Экологические проблемы Балтийского моря [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/eco/20100210/208437078.html> (дата обращения – 23.03.2023).
5. О воде. Экологические проблемы Балтийского моря [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.o8ode.ru/article/planetwa/ezze/balticsea.htm> (дата обращения – 23.03.2023)
6. Проект ХЕЛКОМ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.helcom.ru/about> (дата обращения – 23.03.2023)
7. HYPE model description [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description (дата обращения – 15.02.2023)
8. HYPE file reference [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_file_reference (дата обращения – 20.02.2023)
9. Processes above ground [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description:processes_above_ground (дата обращения – 23.02.2023)

10. Land routines [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description:hype_land (дата обращения – 23.02.2023)
11. River and lakes [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description:hype_routing (дата обращения – 12.04.2023)
12. Nitrogen and phosphorus in land routines [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description:hype_np_soil (дата обращения – 12.04.2023)
13. Nitrogen and phosphorus processes in rivers and lakes [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description:hype_np_riv_lake (дата обращения – 12.04.2023)
14. The FYRIS model Version 2.0. A user's manual [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pub.epsilon.slu.se/12404/7/hansson_k_etal_150615.pdf (дата обращения – 12.04.2023)
15. Hansson, K, Wallin, M & Lindgren, G. The Fyris model Version 2.0. Technical description. – Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Environmental Assessment, Report 2006:17, ISSN 1403-977X.
16. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. – СПб.: Нестор-История, 2019. – 248 с.