



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 в оценке речного стока и биогенной
нагрузки рек бассейна Балтийского моря

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)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«16» мая 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 Физико-географическая характеристика района исследования	8
1.1 Географическое положение	8
1.2 Геологическое строение и рельеф	8
1.3 Растительный покров	11
1.4 Климатическая характеристика	11
1.5 Гидрографическая характеристика	14
1.6 Гидрологический режим	15
2. Проблемы Балтийского моря и способы их решения	16
3. Модель Fugis	20
3.1 Параметры, зависящие от времени	21
3.2 Землепользование на подбассейнах	23
3.3 Параметры потока	24
3.4. Атмосферное осаждение	24
4. Модель Нуре	26
4.1 Настройка модели	27
4.2 Исходные данные	28
4.3 Процессы на поверхности земли	29
4.3.1 Температура	29
4.3.2 Осадки	30
4.3.3 Расчет жидких осадков и снегопадов	31
4.3.4 Испарение	31
4.3.4 Атмосферное осаждение	34
4.3.4.1 Влажное осаждение	34
4.3.4.2 Атмосферное осаждение на почву	34
4.4 Почвенные процессы	34
4.4.1 Устройство почвы	34
4.4.2. Рассчитываемые переменные	35

4.5 Процессы в снежном покрове.....	37
4.5.1 Снеготаяние	37
4.5.2 Определение снежного покрова	37
4.5.3 Почвенная температура и мощность снежного покрова.....	38
4.6 Почвенная влага	39
4.6.1 Грунтовый сток	39
4.6.2 Инфильтрация.....	40
4.7 Речная система	41
4.7.1 Речные процессы	41
4.7.2 Притоки.....	42
4.7.2 Главный водоток	42
4.8 Наземные процессы и органические вещества.....	42
4.8.1 Источники органических вещества	43
4.8.2 Растительный покров и поверхностные почвенные процессы	45
4.9 Азотно-фосфорные процессы и водоемы	46
4.9.1 Денитрификация.....	47
4.9.2 Первичная выработка	47
4.9.3 Седиментация	48
5. Модель HBV	49
5.1. Описание модели.....	49
5.2 Калибровка и оценка эффективности модели	50
5.3 Структура модели.....	51
5.3.1 Блок снега	52
5.3.2 Блок ледников.....	53
5.3.3 Блок влажности почвы	54
5.3.4 Ответная функция	55
5.3.5 Блок маршрута.....	56
5.4 Работа с моделью	56
5.4.1 Выбор исследуемого водосбора	56
5.4.2 Настройка параметров водосбора.....	57

5.4.3 Изменение настроек модели	57
5.4.4 Работа с главным экраном	59
5.4.5 Калибровка Монте Карло	60
5.4.6 GАР калибровка	63
5.4.7 Результаты работы модели	66
6. Расчет речного стока и биогенной нагрузки на реках с достаточной освещенностью данными гидрометеорологического мониторинга	67
6.1 Исходные данные для расчета речного стока	67
6.2 Калибровка модели HBV	67
6.3. Запуск модели HBV	69
6.4. Исходные данные для запуска модели Fyris.....	71
6.5. Калибровка модели FyrisNP	75
6.6. Расчет биогенной нагрузки на реках Селезневка и Гороховка	76
7. Расчет речного и биогенного стока на малых реках Ленинградской области, не освещенных данными наблюдений	81
7.1 Расчет речного и биогенного стока на малых реках юго-восточного побережья Финского залива	81
7.1.1 Расчет речного стока на малых реках южного побережья Финского залива	81
7.1.2 Расчет биогенного стока на малых реках юго-восточного побережья Финского залива.....	83
7.2. Расчет речного и биогенного стока на малых реках северного побережья Финского залива	130
7.2.1. Расчет речного стока на малых реках северного побережья Финского залива	131
7.2.2. Расчет биогенного стока на малых реках северного побережья Финского залива.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	155

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- HBV – Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning, модель анализа речного стока и загрязнения воды
- HYPE – модель гидрологических прогнозов для окружающей среды
- FyrisNP – математическая модель, позволяющая рассчитать концентрации растворенного в воде органического вещества
- ХЕЛКОМ – комиссия по защите морской среды Балтийского моря

ВВЕДЕНИЕ

Использование водных объектов в любых целях практически всегда неизбежно оказывает влияние на их состояние. Уберечь водоемы и водотоки от дальнейшего негативного воздействия и минимизировать последствия, уже понесенного урона, можно только с помощью рационального подхода к эксплуатации водных объектов. Моря и океаны – не исключение.

Балтийское море испытывает на себе огромное антропогенное влияние. За прошедшие века Балтика понесла огромный урон. Множество экологических систем были уничтожены, а другие находятся на грани гибели. В большинстве случаев это происходит из-за чрезмерной эвтрофикации, вызванная насыщением морских вод органическим веществом.

Хельсинкская конвенция – организация балтийских стран, объединяющая их усилия по предотвращению нового пагубного воздействия и минимизации уже случившихся бедствий. Российская Федерация – страна-подписант конвенции и обязана регулярно формировать отчеты о стоке биогенного вещества со своей территории.

Далеко не все реки Ленинградской области освещены в достаточной степени данными гидрометеорологического мониторинга. В таком случае единственным способом получить необходимые для формирования отчетов ХЕЛКОМ данные является математическое моделирование. Возможность применения математических моделей для расчета биогенного и речного стока оценивается в рамках работы. Именно в этом и заключается актуальность данного исследования.

Цель работы – апробация работы математических моделей, рекомендованных Хельсинской конвенции в условиях Ленинградской области. Рассмотрен комплекс программ, состоящий из моделей HBV, HYPE и FyrisNP. Они позволяют рассчитать речной и биогенный сток на реках, где не осуществляется регулярное гидрометеорологическое наблюдение.

Апробация проводилась на малых реках Ленинградской области, а именно на Селезневке, Гороховке, Чулковке, Матросовке, Дреме, Карасте, Стрелке, Хаболовке, Черной, Шингарке и Лебяжьей.

Исходными данными послужили расходы воды на исследуемых реках, полученные с помощью непосредственных гидрометеорологических наблюдений, значения концентраций биогенных веществ в пробах воды, отобранных в рамках экспедиций РГГМУ, а также метеорологические данные, зафиксированные на метеорологических станциях в городах Выборг и Санкт-Петербург.

1 Физико-географическая характеристика района исследования

1.1 Географическое положение

В рамках работы исследуются реки побережья Финского залива, простирающегося от границы с Финляндией до границы с Эстонией, охватывая всю его российскую акваторию. Общая площадь рек, несущих воды в Финский залив, составляет более 5 тысяч км². В работе рассматривался сток рек, впадающих с северо-восточного и юго-восточного побережий Финского залива (за исключением рек Нева, Луга), основными из которых являются Гороховка, Черная, Селезневка, Стрелка и Коваши. Некоторые реки, например, Селезневка текут по территории сразу нескольких государств – Российской Федерации и Финляндии.

1.2 Геологическое строение и рельеф

Ленинградская область является частью Северо-Запада Российской Федерации, рельеф которого можно разделить на северо-западную низменность и юго-восточную возвышенность. Запад области находится на территории низменности, уходящей далее на запад. На востоке начинается Силурийское плато, переходящее в Лужскую возвышенность на северо-востоке. Север области сложен ледниковыми моренными породами, слагающими Карельскую возвышенность. К югу от Петербурга находится Ордовикское плато, представляющее собой плоскую возвышенность. Его самая высокая часть образует Ижорское плато, сложенное известняками и доломитами, подверженными сильному карсту. Северная его граница обозначена глинтом, за которым начинается предглинтовая низменность.

Почти все возвышенности Ленинградской области сложены ледниковыми породами, а именно моренными отложениями. Образовались

они во время разных стадий Валдайского оледенения. Рельеф возвышенностей состоит из холмов и гряд, высота которых может достигать 150 метров [1].

Самые низкие точки региона могут достигать 0 метров над уровнем моря. Основными низменностями региона являются: Вуоксинская низменность, Псковско-Чудская и Приильменская низменность. Прибалтийская низменность несколько выделяется на фоне остальных. В ней развита густая речная сеть, между которыми распространено образование болот.

На севере и юге находится возвышенная часть Северо-Запада, окружающего Балтийскую низменность. Начинаясь в Беларуси, она тянется до Онежского озера. Возвышенность – след границы ледника и примерно совпадает с границами каменноугольного плато, сложенного известняками. Рельеф возвышенности представлен холмами и грядами, между которыми протекает множество рек. Высотные отметки колеблются от 100 до 200 метров. Известняки в этом районе подвержены карсту, что приводит к образованию оврагов и долин.

Основными породами, которыми сложен Северо-Запад Российской Федерации, являются разнообразные дочетвертичные отложения, лежащие на кристаллическом щите, образованном докембрийскими магматическими структурами. Сверху все покрыто отложениями четвертичного периода. На севере наблюдается выход гнейсов Балтийского щита.

В основном, в геологическом строении представлены палеозойские отложения, а именно кембрийские, ордовикские, силурийские и девонские. При продвижении на югов-восток эти породы погружаются все глубже под четвертичные отложения.

На востоке от Ордовикского плато начинаются девонские отложения. Представлены они верхним девоном, сложенным известняками, и средним девоном, который представлен доломитом и мергелем. Мощность может достигать 450 метров [1].

1.3 Растительный покров

Северо-Запад Российской Федерации лежит в южной подзоне тайги, перетекающей в среднюю тайгу. На юге могут встречаться области зоны смешанных лесов. Лесами покрыто больше половины всего региона [3].

Встречаются хвойные леса с вкраплениями лиственных деревьев. Леса имеют мощный слой мохового покрова. Также широко распространены густые заболоченные еловые массивы.

На песчаных отложениях образуются сосновые леса и боры. Встречается также и смешанный лес, составленный хвойными и лиственными породами.

Лиственные деревья представлены в большинстве своем представлены березами, осиной и ольхой. На юге лиственные леса состоят из широколиственных пород, например, вяз, липа, дуб. Мелколиственный лес также встречается в районах, где особенно заметно влияние антропогенного фактора [3].

Сельскохозяйственная и промышленная эксплуатация территории региона сказывается на его лесах. Прослеживается четкая обратная взаимосвязь между заселенностью районов и их залесенности. На юге лесов становится все меньше, а нетронутые сельских хозяйством северные области покрыты густым лесным покровом.

Заметную часть растительного мира составляют и культурные растения, под выращивание которых отдано почти 12% всей территории региона. Юго-запад покрыт сельскохозяйственными территориями на 30%, север всего на 5%.

1.4 Климатическая характеристика

Территории региона, расположенные в глубине материка, обладают умеренным континентальным климатом. Побережье Балтийского моря имеет

четко выраженные элементы морского климата. Лето дождливое, зима относительно теплая.

Заметную роль в образовании климата Северо-Запада имеют и арктические массы. С юга также поступают теплые массы, которые встречаясь с северными обеспечивают непостоянство погодных и климатических условий на территории региона [2].

Радиационный баланс

Годовое значение радиационного баланса составляет 35 ккал/кв. см. Положительный радиационный баланс наблюдается с конца марта по начало ноября. Максимальное значение баланса фиксируется в июне и составляет примерно 8.5 ккал/кв. см. Минимальные отметки встречаются в декабре и составляют 0.5 ккал/см² [1].

Температура воздуха

Средняя температура воздуха на территории региона составляет 3 градуса. На побережье Финского залива и на его островах средняя температура может увеличиваться и достигать до 5 градусов, что обуславливается теплыми морскими течениями [1].

Абсолютный минимум фиксируется на территории внутриконтинентальных Псковской и Новгородской областей и может составлять минус 52 градуса. Ближе к морскому побережью минимум не опускается ниже минус 48, а на берегу Ладожского озера не может упасть ниже минус 35 градусов.

Июль – самый теплый месяц. Средняя температура колеблется в районе 17 градусов. Максимум не превышает 36 градусов.

Наступление весны, ознаменованное переходом средних температурных отметок через нулевую отметку, происходит в середине апреля. Через 7 – 10 дней окончательно исчезает снежный покров, который, однако, может вновь образоваться из-за возвращающихся холодов. К началу мая холода обычно отступают окончательно.

Лето наступает вместе с переходом средних отметок через 10 градусов. Для большей части территорий Северо-Запада это происходит в середине мая. Лето обычно не превышает 3.5 месяцев. Могут наблюдаться заморозки, а средняя температура составляет примерно 15 градусов.

Осень приходит во второй половине сентября и продолжается до 2 месяцев.

Зима обычно начинается в начале октября и характеризуется ненастной погодой и большим количеством атмосферных осадков. Температура опускается до средних отметок в минус 5 градусов. Снег начинает выпадать в конце октября, но постоянный снежный покров устанавливается в декабре.

Характерным для региона является непостоянство погодных условий, обусловленное его географическим расположением. Из-за этого в некоторые годы погода может заметно отличаться от установленных средних значений.

Осадки

Весь регион находится в зоне избыточного увлажнения, что связано с значительным поступлением тепла и активной циклонической деятельностью.

Подстилающая поверхность оказывает большое влияние на распределение атмосферных осадков по региону. Именно поэтому для Северо-Запада характерно отсутствие плавного изменения осадков.

Средние значения атмосферных осадков в регионе колеблются примерно вокруг 750 мм. Количество осадков увеличивается с юго-запада на северо-восток.

Минимальные значения выпавших осадков не опускаются ниже 600 мм. Минимум был зарегистрирован на побережье Ладожского озера. Заметно также уменьшение количества осадков при движении на юг, где в среднем может выпадать всего 650 мм. Максимумы же зафиксированы на Валдайской возвышенности, где количество осадков может превысить 900 мм [1].

Снежный покров

Снежный покров обычно составляет 200 мм. В областях на побережье моря или крупных озер количество снега может снизиться до 100 мм.

Появившись в начале декабря, устойчивый снежный покров лежит примерно 110 дней, исчезая к середине апреля [1].

1.5 Гидрографическая характеристика

Регион обладает очень развитой гидрографической сетью, входящей в состав бассейна Балтийского моря. Густота рек достигает 0.56 км/км². Увлажненность района и его геологическое прошлое приводят к формированию большого количества водотоков.

Площадь водосбора главной реки Северо-Западного региона, Невы, составляет 281 000 км². Долина Невы – Приневская низменность или Приневская впадина сложена песчаными грунтами. В среднем ширина реки составляет 500 метров, глубина – 10 метров, а скорость течения – 1 м/с.

Реки севера Ленинградской области, в число которых входит и рассматриваемая Селезневка, зачастую протекают по рвам и трещинам Балтийского кристаллического щита. Ледник, занимавший обширные территории региона, внес свой вклад в формирование речных долин. Именно ледниковые процессы обусловили север-западное простираание большинства водных потоков.

Реки региона отличаются достаточно большим перепадом высот. Это обусловлено поднятыми водоразделами и близко расположенными базисами эрозии. Из-за этого на реках формируется значительное число различных порогов.

Часто наблюдается переброс воды из одного водосбора в другой из-за заболоченности водоразделов. Во время половодий и паводков вода из одной реки зачастую попадает в другую.

Реки Ленинградской области, в большинстве своем, впадают в Финский залив. Вместе с их водами в Залив попадает и разнообразное биогенное вещество, формирующее соответствующий сток. Из Залива органическое

вещество попадает в Балтийское моря, провоцируя дальнейшую эвтрофикацию.

1.6 Гидрологический режим

Практически все реки Ленинградской области имеют смешанное питание с доминирующим влиянием снегового. В рамках водохозяйственного года можно выделить четыре фазы: весеннее половодье, летне-осенняя межень с редкими дождевыми паводками и зимняя межень с оттепелями.

Весеннее половодье приходится на конец марта-начало апреля и продолжается два месяца. Летне-осенняя межень начинается в начале лета и длится до начала ноября. Зимняя межень приходит в ноябре и длится до освобождения рек ото льда.

2. Проблемы Балтийского моря и способы их решения

Особенности географического расположения Балтийского моря, куда впадает множество рек Северо-Запада Российской Федерации, являются причиной весьма ограниченного водообмена моря и Мирового океана. Также, на берегах Балтики находится ряд крупных промышленных государств, прибрежные города которых сбрасывают свои сточные воды в море или в реки, несущие в него свои воды. Такой подход к использованию природных вод является первопричиной огромной антропогенной нагрузки, которую испытывает на себе Балтийское море [4].

Балтийские воды очень сильно загрязнены, что подчеркивается всеми его водопользователями. Перечень проблем весьма обширен – эвтрофикация, высокие концентрации токсичных веществ, органики и металлов. Все эти вещества попадают в морскую воду вместе из-за сточных водами, сброшенных многочисленными городами и предприятиями, из-за смытых с сельских территорий химических удобрений, из-за судоходства, техногенных аварий, захоронений токсичных веществ и из-за все возрастающей плотности населения в прибрежных регионах [5].

Продолжающееся загрязнение приведет, рано или поздно, к печальным последствиям для разнообразных морских животных, морских экосистем и для людей, проживающих вблизи Балтийского моря.

Различные меры, направленные на восстановление экологических систем Балтики, предпринимаются уже с второй половины 20-го века. К его концу состояние морских вод значительно улучшилось.

Однако, различные проблемы, представляющие существенную опасность, сохраняются до сих пор. Крупные города, промышленные и энергетические центры продолжают сбрасывать сточные воды с токсичными примесями в Балтийское море и в почву его побережья.

Продолжает развиваться и сельское хозяйство, расширение которого несет непосредственную угрозу экологическому состоянию балтийских вод [5].

Одна из самых главных проблем это эвтрофикация, т.е. чрезмерное насыщение воды органическим веществом. Основными биогенными примесями, содержащимися в морской воде, являются фосфор и азот, поступающие в море вместе с стоком с прибрежных территорий.

Насыщение воды органическим веществом ведет к активизации цветения различных растительных организмов, способствует осаждению биогенного вещества на морское дно, повышает количество микроорганизмов, что, в сумме, ведет к нехватке растворенного в воде кислорода, замутнению и множеству других опасных последствий [6].

Заметнее всего эти процессы в прибрежных районах, ведь основные источники биогенного вещества расположены на суше. Цветущие водоросли и активно размножающиеся микроорганизмы создают на поверхности воды токсичную пленку, вызывают неприятный запах, а зачастую и мор местных водных организмов и птиц, ведь концентрация токсичных веществ в воде в такие периоды значительно повышается [6].

Государства, имеющие выход к Балтийскому морю обеспокоены его состоянием и прилагают множественные усилия, чтобы защитить и восстановить его экосистемы.

Одно из самых эффективных мер стало создание различных водоочистных комплексов в крупных промышленных и городских районах. Некоторые из них способны очищать до 93% своих сточных вод, защищая Балтийское море от огромных масс токсичных веществ.

Но этого недостаточно. Решение всех экологических проблем Балтийского моря возможно только при всеобъемлющей международной кооперации. Именно для этого была создана международная организация HELCOM, объединившая в себе все страны, заинтересованные в сохранении и восстановлении экологических систем Балтийского моря [7].

Хельсинкская конвенция была подписана в 1992 году. Она объединила в одну комиссию все государства, расположенные в балтийском регионе. Цель новосозданной комиссии заключается в защите морской среды Балтийского моря от возможных угроз и в минимизации уже понесенного им ущерба. Члены комиссии создают и проводят всевозможные международные мероприятия и программы, направленные на улучшения экологического состояния Балтики [2].

Уже осуществленные инициативы доказали свою неоспоримую эффективность. Многочисленные популяции морских животных, растений и птиц начали восстанавливаться, а воды Балтики стали значительно чище [7].

Однако не все показатели достигают удовлетворительных значений. Несмотря на проведенную работу по уменьшению объемов сброса органического вещества в морские воды, недавние исследования показали, что сокращение сброса фосфора и азота на 40% не приводит к желаемым позитивным изменениям. Для их достижения необходимо дальнейшее снижение объемов сброса на 18% и 40% соответственно.

Сегодня, именно проблеме эвтрофикации уделяется больше всего внимания при создании программ в рамках Хельсинкской конвенции. Именно она считается самой актуальной и самой опасной современной проблемой Балтики.

Текущие программы HELCOM направлены на прекращение цветения морских водорослей и восстановление разнообразных популяций животных и птиц, пострадавших от чрезмерного насыщения балтийских вод органическим веществом. Основаны эти программы и инициативы на самых современных и эффективных достижениях науки и техники [7].

Меры, предпринимаемые организацией, могут иметь различный масштаб. В целом, их можно разделить на региональные, межрегиональные и глобальные.

Подразумевается, что все страны-участники конвенции будут принимать участие в этих инициативах, ведь только тогда их эффективность

будет максимальна. Для повышения заинтересованности государств и крупных корпораций и вовлечения их в дальнейшую работы были разработаны системы наказаний и поощрений, которые направлены на регулирование их деятельности на берегах и в водах Балтийского моря. Активное участие принесет участникам экономические выгоды, а игнорирование требований конвенции приведет к наложению разнообразных санкций и запретов.

Идея нашла поддержку и в Европейском союзе, и в Российской Федерации. Площадка HELCOM активно используется для разработки все новых и новых программ по защите и восстановлению Балтийского моря.

Инициативой России стало создание международного форума-конференции «День Балтийского моря», которая проходит каждый год в Санкт-Петербурге. Форум стал площадкой для обмена мнениями, знаниями, результатами проведенных работ, стал удобной и комфортной средой для создания, подготовки и реализации множества новых проектов [7].

Очевидно, что все масштабные проекты, осуществляемые в рамках Хельсинкской конвенции, требуют значительного количества данных, описывающих текущее состояние не только Балтийского моря, но и всех водных объектов, входящих в его бассейн. Эти данные могут быть получены не только путем непосредственных наблюдений, но и с помощью математических моделей, которые позволяют описать гидрологические процессы, на объектах, не освещенных данными гидрометеорологических наблюдений [2].

Хельсинкская конвенция рекомендует ряд программ, которые считаются наиболее подходящими для моделирования процессов на берегах Балтийского моря. Такими программами являются модели Fugis и HBV, применение которых в условиях Северо-Запада Российской Федерации и будет исследовано в данной работе.

3. Модель Fyris

FyrisNP была разработана Гансом Кварнесом в департаменте водных наук института сельскохозяйственных наук Швеции (SLU) для проведения расчетов распределения биогенного вещества, а именно азота и фосфора, на водосборе реке Фьюрис в Швеции. В дальнейшем модель продолжила развиваться и теперь применяется не только для Фьюрис, но и для множества рек и озер не только в Швеции, но и по всей Европе [8].

Математическая модель Fyris рассчитывает концентрации растворенного в воде органического вещества. Основная сфера применения модели – определение эффективности разнообразных мер, снижающих объемы поступления органики в речную воду.

Дискретность по времени зачастую устанавливается равной одному месяцу, а в пространстве моделирование ограничивается водосбором исследуемой реки. Количество биогенного вещества, содержащееся в воде, определяется в строгой зависимости от температуры воды, концентрации растворенного вещества, расхода воды в реке и площади водной поверхности реки и озер на водосборе. Задействованные параметры используются моделью в виде разнообразных временных рядов [8].

Данные, задействованные в моделировании, можно разделить на следующие категории:

- Данные, зависящие от времени. Сюда относят наблюдения за концентрациями биогенного вещества, ряды температуры или ряды слоя стока.

- Независимые от времени параметры. Площадь водной поверхности, длина рек и ручьев и ряд других переменных [2].

На рисунке 3.1 представлена структура используемых данных и итоговых результатов в модели FyrisNP.

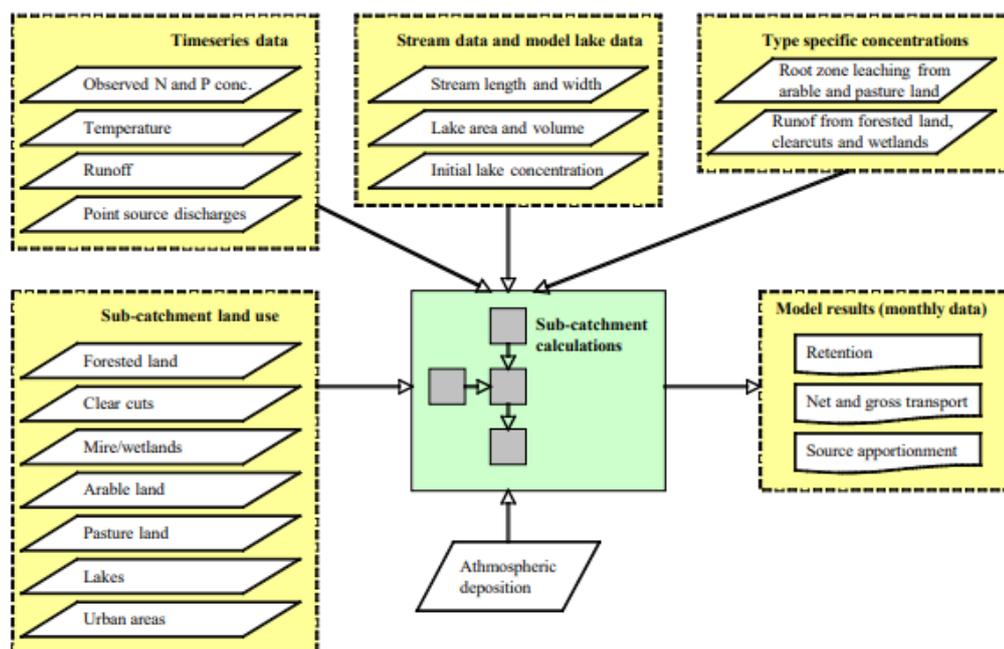


Рисунок 3.1 – Схема структуры используемых данных и итоговых результатов в модели FyrisNP

3.1 Параметры, зависящие от времени

Математическое моделирование задействует огромное количество исходных данных. Они описывают разнообразные параметры, которые могут быть постоянными для данного водосбора, а могут быть характерны лишь для какого-то определенного его участка. Принимая во внимание тот факт, что FyrisNP работает с дискретностью по времени в один месяц, все используемые наблюдения должны быть к среднемесячным значениям [9].

Таким образом, приведены к среднемесячному значению должны быть следующие параметры:

- Температура воздуха или воды.
- Расход воды или слой стока.
- Аккумуляция.
- Точечные источники.

Предпочтительнее использование температуры воды, однако допустимо использование температуры воздуха.

Расход воды или слой стока определяется с помощью непосредственных наблюдений на гидрологических постах. В случае, когда непосредственные наблюдения на исследуемой реке и на всех ее притоках не осуществляются, применяется допущение, позволяющее распределить расход, измеренный в устье каждого характерного участка по всем водотокам внутри водосбора. Измеренный в устье реки расход распределяется по всем водотокам внутри водосбора этой реки. Пример представлен на рисунке 3.2.

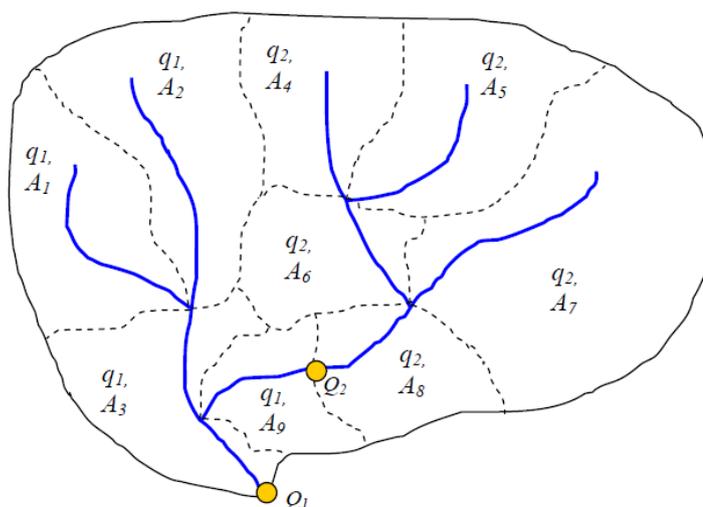


Рисунок 3.2 – Участки (А), гидрологические посты, на которых были измерены расходы (Q), удельные расходы на каждом участке (q)

Из рисунка следует, что на каждом участке А расход q определяется как значение Q , отнесенное к площади всех участков суббассейна.

$$q_2 = \frac{Q_2}{A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8}, \quad (3.1)$$

где: q_2 – удельный расход, определенный для суббассейнов 4, 5, 6, 7, 8;

A_i – площадь i -ого суббассейна.

Расход, определенный на посту 1 (Q_1) содержит в себе расходы, прошедшие через пост 2 (Q_2) и расходы с подбассейнов 1, 2, 3, 9. Для определения q_1 надо вычесть из Q_1 расход Q_2 .

$$q_1 = \frac{Q_1 - Q_2}{A_1 + A_2 + A_3 + A_9}. \quad (3.2)$$

Учет моделью аккумуляции позволит скорректировать расходы воды. Озера, в которых оборот воды может превышать несколько месяцев или лет, значительно влияют на перемещение органического вещества. Изменения объемов озер также непосредственно влияют на перемещение биогенов. В случае, если в наличии есть наблюдения за изменением объемов озер, они могут быть учтены моделью [8].

Основными точечными расходами являются различные источники воды, зафиксированные в пространстве. В большинстве случаев это точки сброса отработанной воды с разнообразных промышленных и сельскохозяйственных предприятий и сооружения [2].

FyrisNP может учесть и различные характеристики, не распределенные по временным рядам. Таковыми могут быть следующие характеристики:

- Параметры потока.
- Атмосферное осаждение органического вещества на поверхности водоемов.
- Малые точечные источники.

Результатом работы становится объем органического вещества с исследуемого водосбора, сформированный воздействием всех установленных факторов.

3.2 Землепользование на подбассейнах

Заранее определенные типы землепользования (i) обладают своими параметрами входной концентрации органики. Расход органических веществ $S_i(t)$ для каждого вида землепользования i определяется умножением параметра концентрации c_i на площадь подбассейна (A) с соответствующим видом землепользования [8].

Существуют источники входной концентрации, которые могут изменяться за время моделируемого периода. Органическая нагрузка для вида землепользования, обладающего такими источниками, определяются с помощью следующей формулы:

$$S_i(t) = A_i * q(t) * c_i(\text{месяц}). \quad (3.3)$$

Таковыми видами землепользования могут быть самые разнообразные территории, например, горы, леса, болота, города, деревни и лесозаготовительные вырубки.

Поступление концентрации из антропогенной среды обычно принимается равной 0, а сток из них заносится в программу как второстепенный источник.

3.3 Параметры потока

В эту категорию относят ширину и длину потока на каждом водосборе. Площадь водной поверхности используется при определении удержания и для расчета атмосферного осаждения органики на поверхность воды. Получить значения этих параметров позволяют разнообразные геоинформационные системы [8].

3.4. Атмосферное осаждение

Количество выпавшего на поверхность воды азота S_d на каждом подбассейне устанавливается с использованием удельного осаждения на постоянную площадь F_d , умноженного на сумму водотоков и площади водных поверхностей в задействованном суббассейне.

$$S_d = (A_{lakes} + A_{stream}) * F_d \quad (3.4)$$

где: S_d – суммарное осаждение азота на водную поверхность;

A_{lakes} –общая площадь озер;

A_{stream} – общая площадь водотоков;

F_d – удельное осаждение азота при постоянной площади.

2.5. Дополнительные точечные источники

Малые точечные источники являются стоком с сельскохозяйственных сооружений, ферм и других сельских предприятий. Модель рассматривает второстепенные источники как постоянные и независимые от сезона. Значения стока таких источников вносятся в модель в виде суммарной месячной нагрузки [8].

4. Модель Нуре

В 2011 году в Шведском институте гидрологии и океанологии была разработана модель гидрологических прогнозов НУРЕ, код которой позволял описывать формирование речного стока и поведение его характеристик во времени и пространстве. Гибкая настройка пространственного распределения позволяет рассматривать реку, как набор отдельных подбассейнов, каждый из которых обладает своим собственным растительным покровом, своей почвой, своим стоком, грунтовыми водами и уникальной антропогенной нагрузкой. Временное распределение позволяет учесть модели роль рядов осадков в любом их виде и температур, отображая их воздействие на формирование речного и подземного стока с помощью гибко настраиваемой дискретности по времени [10].

Код программы изначально был открыт для общественности и каждый желающий мог внести в него какие-либо полезные нововведения или модифицировать его для собственных нужд [2].

Разработка модели была призвана решить следующие гидрологические задачи:

- воссоздание или прогноз значений речного стока, а также его отдельных характеристик;
- воссоздание и прогноз значений речного стока на реках, чьи водосборы не освещены данными непосредственных наблюдений;
- развитие методики для распространения ее на все реки не только Швеции, но и всей Европы.

Водосбор каждой реки рассматривается моделью не как единое целое, а как набор уникальных подбассейнов, каждый из которых обладает своими характеристиками. Все вместе они образуют исследуемый речной бассейн. Точка перехода из одного суббассейна в другой обычно расположена в каком-

то характерном месте, например в месте впадения притока в основной водоток или в месте, где река впадает в озеро или вытекает из него [10].

В мельчайших подробностях суббассейны описываются с помощью множества различных характеристик, свойственных только данной конкретной территории. Таким образом, модель легко учитывает заболоченность подбассейна, залесенность, количество и площадь озер, интенсивность антропогенной нагрузки и влияние метеорологических условий. Это позволяет пользователю настроить каждый участок исследуемого водосбора с необходимой ему точностью.

Служба предупреждения наводнений при Шведском гидрологическом институте использует модель HYPE на постоянной основе при составлении своих прогнозов и неоднократно подчеркивала ее эффективность при работе с прогнозами самой разной заблаговременности.

Модель постоянно развивается и ее устройство дополняется новыми строками кода каждый год. Это позволяет ей работать с многочисленными гидрологическими ситуациями на самых разных реках. Ежегодно выходит до 10 новых версий программы [10].

Распространение модели осуществляется без какой-либо лицензии, что позволяет всем желающим ознакомиться с ней и попробовать использовать ее в своих исследованиях или работах. Основной код модели доступен для загрузки в базе Sourceforge, где, кроме самой программы можно найти также подробные инструкции по запуску и настройке модели [11].

4.1 Настройка модели

В основе работы модели находятся несколько текстовых файлов, в которые вносятся основная исходная информация об исследуемом водосборе. Каждый файл хранит свои временной ряд данных, необходимых для моделирования. Кроме того, при работе модели учитываются и другие

параметры, позволяющие учесть влияние рельефа, вида землепользования и нескольких других факторов, неизменных во времени.

4.2 Исходные данные

Файлы, в которые загружается исходная информация должны быть обозначены следующими названиями: GeoData.txt, GeoClass.txt, Pobs.txt, Tobs.txt, Par.txt.

GeoData.txt – здесь хранится информация, описывающая каждый отдельный подбассейн. Сюда заносится идентификационный номер каждого суббассейна, площадь в абсолютных значениях и в виде доли от общей площади водосбора, номер суббассейна, в который он впадает, длина реки, средняя высота, тип сельскохозяйственной культуры, которая может произрастать на его берегах, концентрации органического вещества, содержащегося в атмосферных осадках и основные источники загрязнения в пределах каждого подбассейна [2].

GeoClass.txt – файл определяет характеристики почвы, землепользования и тип района, по которому протекает река. Класс почвы характеризуется глубиной дренажа водотока, количеством и мощностью слоев. В этом файле также указываются питательные вещества, сток которых будет смоделирован в дальнейшем. Тип землепользования указывается один из следующих: город, лес, ледник, сельскохозяйственные территории, болота [11].

Pobs.txt и Tobs.txt – в эти файлы загружаются значения временных рядов осадков и температур.

Par.txt – файл, необходимый для настройки каких-либо параметров, требующихся для моделирования конкретных гидрологических ситуаций. Может содержать параметры, отображающиеся на весь водосбор, а также характеристики, влияющие только на определенные значения [11].

4.3 Процессы на поверхности земли

4.3.1 Температура

Отбор исходных данных производится с помощью непосредственных гидрометеорологических наблюдений. В силу различных обстоятельств эти данные могут быть получены в различных условиях, что может повлиять на корректность результатов работы модели. Чтобы это избежать производится корректировка некоторых исходных данных, в особенности температуры [12].

Модель может внести свои коррективы несколькими способами:

1. Специальный параметр $tcelevadd$ ($^{\circ}/100$ м) корректирует значения температуры в зависимости от средней высоты каждого подбассейна над уровнем моря ($elev$). После этого все значения температуры будут приведены к таковым на уровне моря.

2. Параметр $tsobselev$ ($^{\circ}/100$ м) позволяет скорректировать разницу между температурами, вызванную разницей высот подбассейнов и изменением температуры.

3. Параметр $monthlapse$ ($^{\circ}/100$ м) выявляет какие-либо месячные зависимости и вносит свои поправки, учитывая их.

Виды корректировки являются взаимоисключающими и не могут быть применены одновременно.

Параметр $tempcorr$ вносит коррективы в значения температуры на всех подбассейнах сразу.

$$tempgc = temp_i + tempcorr - \frac{tcelevadd * elev}{100} - \frac{tsobselev * (elev - obselev)}{100} - \frac{monthlapse * elev}{100} \quad (4.1)$$

где: $temp_i$ – температура воздуха на суббассейне;

$tempcorr$ – региональный параметр, ($^{\circ}/100$ м);

$tcelevadd$ – параметр, перепада высот, ($^{\circ}/100$ м);

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

$elev$ – средняя высота суббассейна, м;

$obselev$ – высота наблюдаемой температуры, м;

$vonthlapse$ – месячный параметр зависимости.

Температура может изменяться и в зависимости от перепада высоты каждого отдельного подбассейна относительно средней высоты основного водосбора. Эти перепады позволяет учесть параметр $tcalt$.

$$temp = tempgc - \frac{tcalt * deltah}{100} \quad (4.2)$$

где: $temp$ – температура суббассейна;

$tcalt$ – температурный параметр;

$deltah$ – отклонение от средней высоты суббассейна.

4.3.2 Осадки

Определенные корректировки модель вносит также в ряды осадков. Осадки ($precip$) сразу на всем водосборе корректируются глобальным параметром $psaddg$. Для осадков на каждом отдельном водосборе используется параметр $prcorr$. Внимание также уделяется агрегатному состоянию выпавших осадков. Для корректировки жидких осадков используется параметр $psrain$, а для твердых $psusnow$ [2].

Для упрощения расчетов модель воспринимает все осадки, выпавшие на подбассейн ($precgc$), как выпавшие на его среднюю высоту. Если требуется более подробная настройка, то модель позволяет внести дополнительные коррективы [12].

4.3.3 Расчет жидких осадков и снегопадов

Ключевую роль в учете осадков моделью играет температурный порог, которые и определяет какие осадки будут жидкими, а какие твердыми. Зависит это значение от множества факторов, например, от вида землепользования каждого подбассейна, но в большинстве случаев обладает околонулевыми значениями. При температуре ниже порога ($ttpi$) осадки учитываются как твердые, а при температуре выше, как жидкие [12].

Существует также промежуточное состояние, когда осадки будут иметь смешанный вид. Значения температур, при которых это будет происходить определяется суммой значений параметра $ttmp$ и параметром $ttpd$.

Следующая формула служит для определения доли жидких осадков:

$$a_{rain} = \begin{cases} 0 & \text{temp} < ttmp + ttpd - ttpi \\ 1 & \text{temp} > ttmp + ttpd + ttpi \\ \frac{(\text{temp} - (ttmp + ttpd - ttpi))}{(2 * ttpi)} & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (4.3)$$

где: a_{rain} – доля жидких осадков;

$temp$ – температура воздуха, °С ;

$ttmp$ – параметр характера землепользования;

$ttpd$ – общий параметр;

$ttpi$ – параметр, описывающий смешанные осадков.

4.3.4 Испарение

Температура играет определяющую роль при расчетах потенциального испарения на территории исследуемого водосбора и его подбассейнов ($epot$). Модель предусматривает несколько вариантов расчета испарения.

Первый из них основан на использовании порога $ttmp$, при превышении которого активизируется испарение [11].

Второй метод позволяет учесть транспирацию, происходящую с поверхности растений. Он использует параметры e_{pot_base} и sev_r . Оба зависят от вида землепользования конкретного водосбора.

Формулы расчета представлены ниже

$$cseason = 1 + sev_{ram} * \sin\left(\frac{2 * \pi * (dayno - sev_{pph})}{365}\right) \quad (4.5)$$

$$e_{pot_base} = (sev_r * cseason) * (temp - ttmp) \quad (4.6)$$

где: e_{pot_base} – базовый показатель транспирации;

$cseason$ – параметр сезона;

sev_{ram} – фактор синусоидальности;

$dayno$ – количество дней;

sev_{pph} – фактор синусоидальности;

sev_r – потенциальная скорость испарения.

Скорость испарения увеличивается в теплое время года и уменьшается в холодное. Это отображает параметр $cseason$.

Параметры синусоидального фактора sev_{ram} и sev_{pph} применяются в случае, если sev_{ram} не обладает нулевым значением. Оптимальное значение корректировки в sev_{pph} дают 45 дней. Максимальное значение поправки будет тогда наблюдаться в мае, а минимальное в сентябре.

Параметр транспирации e_{pot} настраивается коэффициентом sev_{corr} , чье значение не изменяется в течение года [12].

$$e_{pot} = e_{pot_base} * (1 + sev_{corr}) \quad (4.7)$$

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

sev_{corr} – региональный поправочный коэффициент.

Испарение рассчитывается для двух верхних слоев почвы. С увеличением глубины испарение уменьшается экспоненциально, что

определяется параметром $epotdist$. Распределение параметров потенциального испарения представлено на рисунке 4.1.

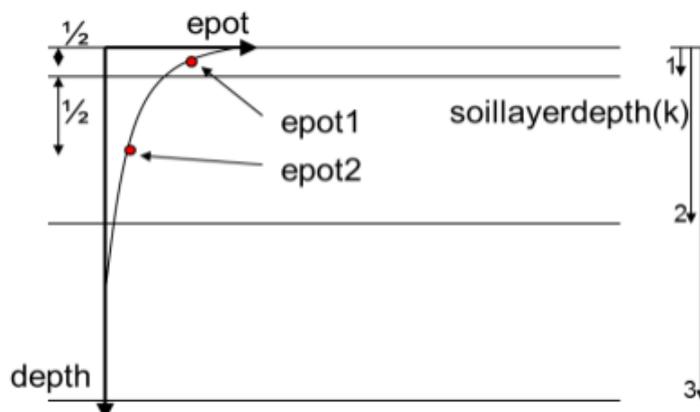


Рисунок 4.1 – Распределение параметров потенциального испарения среди почвенных слоев

В расчетах используются формулы:

$$epot1 = EXP(-epotdist * \frac{soillayerdepth(1)}{2}) \quad (4.8)$$

$$epot2 = EXP(-epotdist * (soillayerdepth(1) + \frac{soillayerdepth(2) - soillayerdepth(1)}{2})) \quad (4.9)$$

$$area1 = soillayerdepth(1) * epot1 \quad (4.10)$$

$$area2 = (soillayerdepth(2) - soillayerdepth(1)) * epot2 \quad (4.11)$$

$$epotfrac1 = \frac{area1}{area1 + area2} \quad (4.12)$$

$$epotfrac2 = \frac{area2}{area1 + area2} \quad (4.13)$$

где: $epotdist$ – косвенный параметр;

$soillayerdepth(1)/soillayerdepth(2)$ – глубина почвенных слоев;

$area1/area2$ – площадь испарения почвенных слоев;

epot1/epot2 – испарение с почвенных слоев.

Испарение происходит с потенциальной скоростью только в случае, если количество воды, содержащееся в верхних двух почвенных слоях, превысило значение влагоемкости самой почвы (f_c , мм) [2].

При превышении порога $ttmp$ потенциальное испарение с поверхности водоемов и затопленных пойм ограничивается только объемом воды и температурой [11].

4.3.4 Атмосферное осаждение

4.3.4.1 Влажное осаждение

В исходные данные также можно внести концентрации влажного осаждения органического вещества в виде непосредственно измеренных значений. Это осуществляется для всего водосбора. В случае, требующем более конкретной настройки, данные для каждого подбассейна в отдельности вносятся в файл `AtmerData.txt`.

4.3.4.2 Атмосферное осаждение на почву

В том же файле можно указать сухое осаждение. Для каждого подбассейна оно будет уникальным из-за особенностей растительного покрова и типа землепользования. Сухое осаждение фосфора и азота же будет добавляться непосредственно в снег или почву [12].

4.3.2.1 Атмосферное осаждение на реки и озера

Органическое вещество, выпавшее на водную поверхность рек, озер и других водоемов, модель может определить с помощью значений, вносимых в файл `AtmerData.txt` [12].

4.4 Почвенные процессы

4.4.1 Устройство почвы

Модель HYPE делит все выделенные подбассейны на характерные классы землепользования (SLC – Soil Landuse Class). В основе такого

разделения лежит учет основного вида землепользования, типа почвы, антропогенной нагрузки и целого перечня дополнительных факторов.

В представлении модели все почвы делятся на три класса, которые обладают собственными характеристиками. Их значения и толщина почвы указываются в файле GeoClass.txt, откуда они считываются моделью при дальнейших расчетах.

Важнейшая характеристика при расчеты гидрологических процессов в почве - удержание воды. Модель HYPE определяет его, основываясь на следующих характеристиках: емкость поля (w_{cfc}), пористость (w_{cep}) и точка увядания (w_{cwp}).

Глубина дренажа, т.е. глубина, на которую проникает водный поток, также вносится в файл GeoClass.txt. Грунтовые воды выше этой глубины принимают непосредственное участие в формировании речного стока [13]. Схема работы почвенного блока представлена на рисунке 4.2.

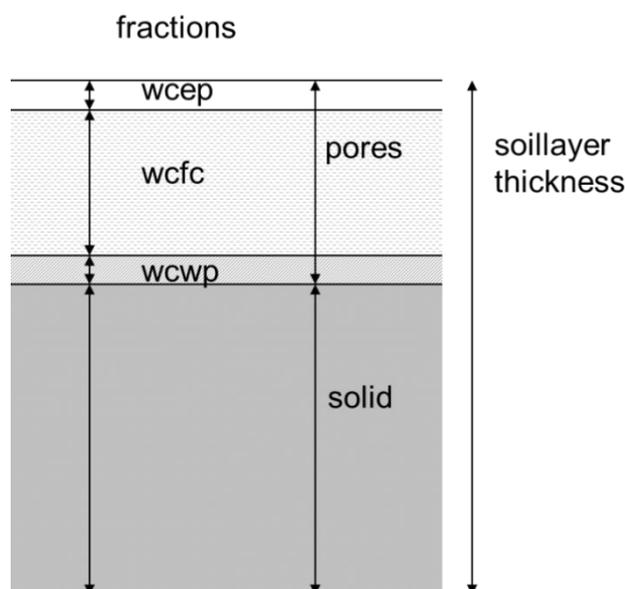


Рисунок 4.2 – Параметры, определяющие удержание воды

4.4.2. Рассчитываемые переменные

В течение времени многие параметры, описывающие текущее состояние почвы, значительно изменяются. Модель вынуждена проводить дополнительные расчеты для определения их текущих значений.

Основные характеристики, требующие дополнительно расчета:

- уровень грунтовых вод;
- глубина промерзания;
- дефицит почвенной влаги.

Столб воды, заполняющей поры почвы, определяется моделью как уровень грунтовых вод ($gwat$). В стандартных условиях он всего обладает отрицательными значениями относительно поверхности почвы. Однако, если заполненность пор превысит 100%, то произойдет подтопление и вода выйдет на поверхность. В таком случае уровень грунтовых вод может принять положительные значения [12].

В холодное время года возможно промерзание грунта. Модель способна его рассчитать, основываясь на температуре почвы ($soiltemp$), количестве воды ($soil$), точке увядания (wp), влагоемкости (fc) и параметрах $frost$ и $sfrost$

$$frostdepth = \frac{frost * sfrost * soiltemp * (fc + wp)}{soil} \quad (4.15)$$

Два верхних слоя почвы образуют так называемую корневую зону, в которой производится расчет дефицита влаги (smd), т.е. уровня воды в почве, который потребовался для заполнения всех пор.

$$smd = \sum_{k=1}^2 \text{MAX}\{fc_k + wp_k - soil_k, 0\} \quad (4.14)$$

где: smd – дефицит влаги в почве, мм;

fc – влагоемкость слоя, мм;

wp – точка увядания, мм;

$soil$ – количество воды в почве.

4.5 Процессы в снежном покрове

Особо важную роль в формировании речного стока играет снежный покров, формирующийся на территории водосбора за время холодного периода [2].

4.5.1 Снеготаяние

Определение момента начала и окончания происходит с помощью температурного порога, который используется и при определении агрегатного состояния выпадающих осадков. Когда, температура превышает установленный порог снег начинает таять. Мощность снежного слоя (melt, мм) находится в непосредственной зависимости от коэффициента снеготаяния (cmlt), а также пороговой температуры (ttmp) и температуры воздуха (temp) [13].

Расчет мощности снежного покрова осуществляется по следующей формуле:

$$\text{melt} = \text{MIN}(\text{cmlt} * (\text{temp} - \text{ttmp}), \text{snow}) \quad (4.16)$$

4.5.2 Определение снежного покрова

Существует два альтернативных метода определения снежного покрова моделью HYPE.

Первый подразумевает, что присутствие снежного покрова на подбассейне распространяется на всю его площадь [13].

Альтернативный метод позволяет указывать долю площади, занимаемую снежным покровом (fsc), относительно общей площади подбассейна. В таком случае покров будет определяться в зависимости от содержания воды в снеге.

Функция прироста снега моделью просчитывается до достижения максимального значения (fscmax), определяемого по указанной формуле:

$$\text{fsc} = \text{fscmax} * \tanh(0.1 * \text{snow}) \quad (4.17)$$

где: fsc – доля снежного покрова;

fsc_{max} – максимальные запас снега.

Уравнение используется в течение всего холодного периода года пока снежный покров не достигнет предельных значений ($snow_{max}$).

Еще один способ определить снежный покров заключается в определении зависимости от максимума снежного покрова в холодный период года ($snow_{max}$) и коэффициента его перераспределения, зависящего от перепада высот и вида землепользования. В таком случае используются формулы:

$$fsc = \frac{snow}{snow_{max} * fsc_{dist}}, \quad (4.18)$$

$$fsc_{dist} = fsc_{dist0} + fsc_{dist1} * stdelev, \quad (4.19)$$

где: $snow_{max}$ – максимальный снежный покров в холодное время года;

fsc_{dist} – коэффициент распределения снега;

fsc_{dist0} , fsc_{dist1} – параметры, зависящие от вида землепользования;

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

С приходом тепла начинается постепенное уменьшение снежного покрова и, в конце концов, обнуляется. Расчет производится по формулам:

$$snow_{max} = snow_{max} - (fsc_{sk1} * snow_{max} - snow) * \frac{1 - e^{-fsc_{sk1} * ts}}{fsc_{sk1}} \quad (4.20)$$

$$\frac{snow}{snow_{max} < fsc_{sk1}} \quad (4.21)$$

4.5.3 Почвенная температура и мощность снежного покрова.

В основе определения температуры почвы лежит баланс следующих характеристик:

- температура слоя почвы в предыдущий временной шаг;
- температура почвенного слоя, находящегося ниже, за предыдущий временной шаг;
- температура воздуха.

Температура слоев почвы, лежащих еще ниже принимается постоянной, а в значение температуры воздуха вносится поправка, основанная на высоте снежного покрова (snowdepth).

Температура почвы в предыдущий шаг по времени (soilmem) определяется глубиной залегания и видом землепользования [2].

Определяется также показатель плотности снега (snowdens), который находится в зависимости от возраста снежного покрова (snowage).

Свежевыпавший снег обладает своей плотностью (sdnsnew), которая принимается равной 0.1. С течением времени его плотность повышается на значение snowdensdt, равняющееся 0.002

$$\text{snowage} = \frac{(\text{snowage}+1)*\text{oldsnow}}{(\text{oldsnow}+\text{snowfall})} \quad (4.22)$$

$$\text{nowdens} = \text{sdnsnew} + \text{snowdenstd} * \text{snowage} \quad (4.23)$$

$$\text{snowdepth} = \frac{0.1*\text{snow}}{\text{snowdens}} \quad (4.24)$$

Возможен альтернативный расчет мощности снега, в котором плотность снега определяется с помощью специального коэффициента уплотнения [12].

4.6 Почвенная влага

4.6.1 Грунтовый сток

Модель начинает воспринимать грунтовый сток после того, как почвенная влага превысит влагоемкость слоя почвы, лежащего над потоком.

Уровень грунтовых вод и глубина дренажа лежат в основе расчета грунтового стока.

Модель определяет грунтовый сток для всех трех слоев, на которые она подразделяет почву, до достижения глубины дренажа.

Уровень дренажа (*streamdepth*) не всегда будет достигать третьего самого глубокого слоя. В случае, если почва при этом не насыщена, то сток будет определяться уровнем воды, находящейся выше глубины дренажа потока.

Коэффициент спада (*rc*), используемый в расчетах стока, определяется с использованием характеристик *rrcs1* и *rrcs2*. Эти характеристики зависят от типа почвы на данном подбассейне и от глобального параметра *rrcs3*

Коэффициент спада уменьшается по мере углубления, а параметры *rrcs1* и *rrcs2* отображают его значение в верхнем и нижнем слое [13].

Значение *rc* в зависимости от уклона всего подбассейна регулируется параметром *rrcs3*.

4.6.2 Инфильтрация

В основе расчета значений инфильтрации, т.е. просачивания воды, выпавшей на поверхность земли, в почву, лежит сумма жидких осадков и растаявшего снега (*inflit0*).

Значение инфильтрационной способности определяет сколько воды проникнет в почву, а сколько уйдет в поверхностный сток. В случае, если эта способность превышена, то вся жидкая воды будет относиться к поверхностному стоку [13].

В случае, если модель определила инфильтрацию, то к верхнему слою почвы начнет добавляться вода. Происходит это до момента пока не будет превышен показатель объема почвенных пор. Однако, вода, не вместившаяся в поры, будет лежать на поверхности земли и все равно учитываться как часть грунтовой воды.

Существует два альтернативных методов определения взаимодействия воды, попавшей в почву вместе с инфильтрацией, и расхода воды на сток и испарение. Первый подразумевает удаление воды, ушедшей на испарение и сток, до определения инфильтрации, второй, наоборот, после. Применимость вариантов определяется при разработке почвенного режима [13].

4.7 Речная система

Модель HYPE воспринимает реки двух типов:

- местный поток;
- основной поток.

Характеристики этих водных потоков определяются в файлах с исходными данными. Основные потоки, для водосбора которых и осуществляется моделирование, принимают в себя воды местных водотоков. Они, в свою очередь, собирают воду со своего подбассейна и соединенных с ним вышележащих суббассейнов и отдают его основному потоку [14].

4.7.1 Речные процессы

Осадки, попадающие на водосбор, суммируются вместе с речным стоком. Кроме того, они являются значительным источником органического вещества, непосредственно влияя на его концентрацию в речной воде.

Испарение также вносит свой вклад в формирование концентрации биогенных наносов в воде. Конкретные значения испарения определяются площадью поверхности, с которой оно происходит. Для упрощения расчетов площадь водной поверхности считается постоянной. В случае, если требуется дополнительная точность моделирования, HYPE позволяет определить изменение площади речного потока с помощью ряда дополнительных операций, основанных на изменении объемов воды [2].

Задержка воды в водотоках (*transtime*) зависит от длины водотока (*rivilin*) и максимальной скорости воды (*rivvel*). Для каждого подбассейна

задержка воды определяется отдельно, основываясь на его размерах [13].

Расчеты производятся по следующим формулам:

$$\text{transtime} = \frac{\text{rivlen}}{\text{rivvel} * 8.64 * 10^4}, \quad (4.25)$$

$$\text{ttday} = \text{INT}(\text{transtime}), \quad (4.26)$$

$$\text{ttpart} = \text{transtime} - \text{REAL}(\text{ttday}). \quad (4.27)$$

4.7.2 Притоки

НУРЕ определяет длину притоков основного водотока, извлекая квадратный корень из площади каждого конкретного подбассейна. Считается, что сток притока формируется его суббассейном. Для каждого притока производятся те же расчеты, что и для основного потока. Сток притока суммируется со стоком основного потока или попадает в озеро [14].

4.7.2 Главный водоток

Главный водоток – это основная река, для которой и проводится моделирование и относительно водосбора которой осуществляется разделение на подбассейны. Основные характеристики главной реки указываются в файле GeoData.txt, хотя могут быть получены моделью из некоторых ее геофизических особенностей, например, длина реки может быть принята квадратным корнем из площади ее водосбора [14]. Сток главной реки формируется стоком со всех ее подбассейнов и озер.

4.8 Наземные процессы и органические вещества

В почвах водосбора содержится некоторое количество органического вещества и модель НУРЕ способна его учитывать, воспринимая его как в виде неподвижных почвенных бассейнов или в виде растворенной в грунтовой воде

фракции. Кроме того, содержание органики может изменяться в зависимости от каких-либо факторов [15].

Модель NҮРЕ определяет и рассчитывает следующие фракции органического вещества:

- fastN – неподвижный азот быстрого оборота ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);
- fastP – неподвижный органический фосфор быстрого оборота ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);
- humusN – неподвижный органический азот быстрого оборота ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);
- humusP – неподвижный органический фосфор медленного оборота ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);
- IN – неорганический азот в почвенной влаге ($\text{мг}/\text{л}$);
- ON – органический азот в почвенной влаге ($\text{мг}/\text{л}$);
- partP – неподвижный неорганический фосфор, связанный с частицами почвы ($\text{кг}/\text{м}^2 = \text{мг}/\text{м}^2$);
- PP – нерастворенный органический фосфор в почвенной влаге ($\text{мг}/\text{л}$);
- SP – растворенный органический фосфор в почвенной влаге ($\text{мг}/\text{л}$).

В виде схемы виды органического вещества и их источники представлены на рисунке 4.3.

4.8.1 Источники органических вещества

Основными источниками органики, попадающей в почвенный слой, являются: удобрения, остатки растительности и сельскохозяйственные источники [15].

Модель разделяет удобрения на две категории: заводские (fert) и природные (man). Каждое применение удобрения заносится в файл CropData.txt, где также указывается дата применения, сумма азота и фосфора, а также регулирующие показатели, которые распределят поступившее удобрение по слоям почвы. Эти удобрения распределяются в течение периода fertdays. Ежедневная сумма удобрений принимается постоянной.

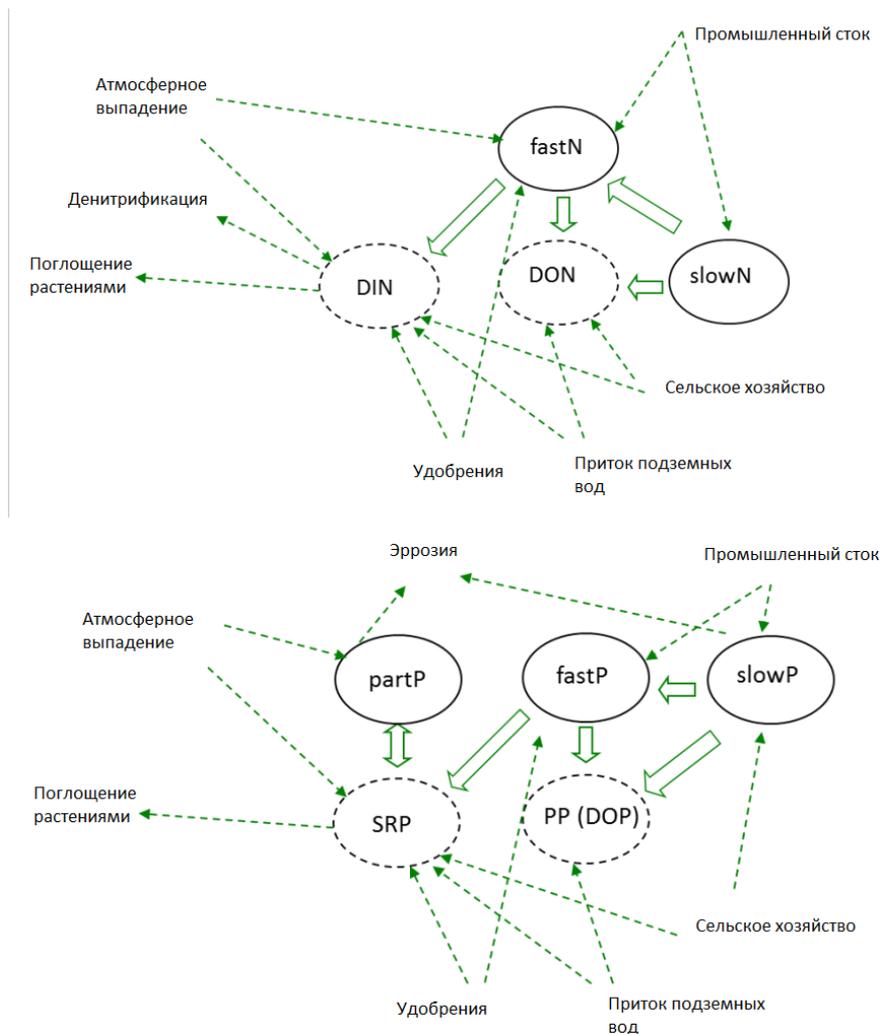


Рисунок 4.3 – Источники и потребители биогенного вещества в почвенном слое

Остатки растений добавляются непосредственно в почвенные бассейны органического вещества (fastN, fastP, humusN и humusP). Их общее количество, а также даты их попадания в почву заносятся в файл CropData.txt.

Сельскохозяйственные источники заносятся в файл CropData.txt. Также там указываются соответствующие каждому источнику значения концентраций фосфора и азота. Органическое вещество этих источников распределяется между водотоком и почвенной влагой [16].

4.8.2 Растительный покров и поверхностные почвенные процессы

Вся информация о растительных культурах, воспринимаемых моделью, заносится в файл CropData.txt. Она распределяется между видами землепользования с учетом условия, что каждый вид может содержать в себе две определенных растительных культуры, которые будут определены им как основная и вторичная.

Потенциальное – это максимальное количество вещества, которое может быть поглощено растительностью. Этот параметр используется при расчетах IN и SP [2].

Расчет поглощения азота растительностью производится с помощью трехпараметрического уравнения, используемого как для основных культур, так и для вторичных. Полученные значения суммируются с общей потенциальной функцией поглощения [15].

Каждый слой почвы обладает своим потенциалом поглощения. В расчетах почва воспринимается моделью как двухслойная структура, которая разделяется параметром фракции верхнего (первого) слоя почвы.

Расчет производится между датой посева и датой сбора урожая (bd2 и bd3). Потенциальное поглощение будет определено периодом созревания этих культур.

Моделирование процесса эрозии почв помогает определить перенос частиц фосфора (PP), а также позволяет смоделировать перенос осадочного материала. Модель эрозии основана на расчете частиц фосфора, приводимых в движение дождем и поверхностным стоком [15].

Фосфор попадает в воду вместе с поверхностным стоком и через полости в почве. Процесс может быть разделен на три этапа:

- определение переноса частиц почвы с поверхности земли;
- определение количества почвенных частиц, оказавшихся в водотоке;
- определение количества частиц фосфора в почвенных частицах.

Кинетическая энергия, приводящая в движение почву и фосфор, определяется на основе количества осадков и текущего времени года. Эрозия

не рассчитывается, если осадки выпадают с интенсивностью меньше 5мм в сутки, выпадают в виде снега или выпадают на заснеженный грунт.

Учитывается также и растительный покров, который может защитить почву от эрозии. Коэффициент покрытия указывает какая часть поверхности закрыта растительностью и, соответственно, не подвергается эрозии [15].

4.9 Азотно-фосфорные процессы и водоемы

В качестве исходных данных для расчетов поступления и переноса азота и фосфора используются геоморфологические характеристики водоемов. Глубина и ширина реки определяется по следующим формулам:

$$\text{velocity} = 10^{\text{rivvel1}} * \text{meanflow}^{\text{rivvel2}} * \left(\frac{\text{flow}}{\text{meanflow}}\right)^{\text{rivvel3}} \quad (4.34)$$

$$\text{width} = 10^{\text{rivwidth1}} * \left(\frac{\text{flow}}{\text{velocity}}\right)^{\text{rivwidth2} + \text{rivwidth3} * \log_{10}\left(\frac{\text{flow}}{\text{velocity}}\right)} \quad (4.35)$$

$$\text{depth} = \frac{\left(\frac{\text{flow}}{\text{velocity}}\right)}{\text{width}} \quad (4.36)$$

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

flow- расход воды в реке м³/с;

meanflow – средний сток за год;

Параметр maxwidth ограничивает ширину реки. Длина реки может быть вычислена как квадратный корень из площади ее водосбора или указана вручную в файле GeoData.txt. Площадь водотока равняется произведению длины реки на ее максимальную ширину. Используемая в расчетах температура воды (watertemp), определяется путем сопоставления температуры воздуха и температуры воды днем ранее [16].

4.9.1 Денитрификация

Денитрификация – это возвращение нитритов в атмосферу. В модели HYPE денитрификация зависит от концентрации азота в воде, ее температуры и ряда общих параметров. Площадь дна водоема, которая также используется при определении денитрификации определяется как площадь водной поверхности реки или озера [16]

4.9.2 Первичная выработка

Первичная выработка – процесс преобразования неорганического азота и растворенного фосфора в органический азот и фосфор. Процесс, обратный ему, называется минерализацией.

В первую очередь, эти процессы зависят от температуры воды. Параметр (tmpfcfn1) описывает связь температуры воды и позволяет смоделировать изменение скорости процессов при изменении температуры. Вторым параметром (tmpfcfn2) позволяет определить взаимосвязь первичной выработки и минерализации [16].

Весной первичная выработка доминирует в водоеме, а осенью минерализация. Переход осуществляется в момент, когда средняя температура за 10 дней становится меньше средней температуры за 20 дней.

Эти процессы описываются следующими формулами:

$$\text{tmpfcfn1} = \frac{\text{watertemp}}{20}, \quad (4.37)$$

$$\text{tmpfcfn2} = \frac{T_{10}-T_{20}}{5}, \quad (4.38)$$

$$\text{tmpfcfn} = \text{tmpfcfn1} * \text{tmpfcfn2}. \quad (4.39)$$

Регулировать эти процессы позволяют также долгосрочными концентрациями фосфора в воде (TRconc) и функцией концентрации (TRfcn) с общим параметром насыщения hsatTR.

4.9.3 Седиментация

Модель определяет седиментацию как сток твердых частиц органического вещества и взвешенных наносов. Параметры седиментации ($sedON$, $sedPP$, $sedAE$, $sedSS$, m/da) зависят от концентрации вещества и площади водной поверхности. Частицы веществ определяются как резервуары ($PPsedimentpool$, $SSsedimentpool$), т.е. части объема воды. При увеличении скорости течения они превращаются в поток ($resuspPP$, $resuspSS$). Этот процесс определяется параметром $sedxp$. Поток воздействует на осадконакопление параметром $sedresp$ [16].

$$sedresp = \max(-1., \min\left(1., \frac{q_{bank} - flow^{sedexp}}{q_{bank}} - \frac{flow^{sedexp}}{q_{bank}}\right)) \quad (4.41)$$

$$sedPP = \begin{cases} sedresp * PPpool & sedresp > 0 \\ 0 & sedresp < 0 \end{cases} \quad (4.42)$$

$$resusp = \begin{cases} -sedresp * PPsedimentpool & sedresp < 0 \\ 0 & sedresp > 0 \end{cases} \quad (4.43)$$

$$sedSS = \begin{cases} sedresp * SSpool & sedresp > 0 \\ 0 & sedresp < 0 \end{cases} \quad (4.44)$$

$$resuspSS = \begin{cases} -sedresp * SSsedimentpool & sedresp < 0 \\ 0 & sedresp > 0 \end{cases} \quad (4.45)$$

где: $flow$ – расход речного потока m^3/c ;

q_{bank} – потока, в максимально полноводной реке; q_{bank} рассчитывается как второй по водности смоделированной поток за год.

5. Модель HBV

Модель HBV была создана более 30 лет назад для моделирования стока на водосборных бассейнах. В следующие десятилетия модель продолжила разрабатываться Шведским гидрометеорологическим институтом и стала применяться по всей Швеции. Также модифицированные версии HBV нашли свое применение в 30 других странах по всему миру [17].

Основная идея, лежащая в основе модели, это возможность предоставить пользователям простой и доступный инструмент для исследований, моделирования и для использования в образовательном процессе.

Первая цифровая версия была запрограммирована в 1995 году Яном Зайбертом в университете Уппсалы. В дальнейшем эта версия улучшалась силами Университета штата Орегон, Шведским сельскохозяйственным университетом, Стокгольмским университетом и университетом города Цюрих.

Программа написана на языке Visual Basic и периодически обновляется до новых версий этого языка [17].

5.1. Описание модели

Модель рассчитывает сток, используя осадки, температуру и потенциальное испарения в качестве исходных данных. Осадки могут быть определены как снег или как дождь в зависимости от соответствующей им температуры воздуха T [C°]. Если она ниже пороговой температуры, то это будет снег, а если выше, то дождь.

Все осадки, определяемые как снег, умножаются на поправочный коэффициент снегопада SF_{CF}, который представляет собой систематическую

ошибку в измерении количества выпавших осадков и испарение с поверхности снега [2].

Таяние снега определяется с помощью специального метода «Температура – день». Талая вода и осадки удерживаются в снежном покрове до тех пор, пока не превысят определенную долю CWH водного эквивалента снега. Жидкая вода в снежном покрове замерзает в соответствии с коэффициентом повторного замерзания CFR.

Осадки и таяние снега P подразделяются на воду, заполняющую пространства в почве и на воду, уходящую на питания грунтовых вод в зависимости от соотношения между содержанием воды внутри почвы SM [мм] и его максимальным значением FC [мм].

Фактическое испарение с почвы равняется потенциальному испарению, если отношение фактического количества воды к максимально возможному значению выше, чем значение, при превышении которого фактическое испарение превращается в потенциальное (LP) [18].

Восполнение грунтовых вод уходит в верхний слой грунтовых вод SUZ [мм]. PERC [$\Delta t-1$] определяет максимальную скорость просачивания из верхнего слоя грунтовых вод в нижний SLZ [мм].

Сток грунтовых вод определяется как сумма двух или трех линейных уравнений оттока в зависимости от того превышает ли SUZ пороговое значение UZL [мм] или нет.

Этот сток в итоге преобразуется функцией параметра MAXBAS, которая и рассчитывает смоделированный сток.

Модель также позволяет учесть высоты рассматриваемых зон. Изменение осадков и температур с высотой определяется с помощью параметров PCALT [%/100 м] и TCALT [C/100 м].

5.2 Калибровка и оценка эффективности модели

Калибровка модели осуществляется с помощью обычного ручного метода проб и ошибок. Оценить соответствие смоделированного стока фактическому же можно с помощью различных критериев, например с помощью визуальной оценки графиков стока, оценки накопившейся разницы и каких-либо статистических критериев.

В модель HBV встроена своя система оценки - коэффициент соответствия $Reff$, определяемый по формуле:

$$Reff = 1 - \frac{\sum(Qsim(t) - Qobs(t))^2}{\sum(Qobs(t) - \bar{Qobs})^2} \quad (5.1)$$

где: $Qobs$ – фактические значения слоя стока;

$Qsim$ – смоделированные значения слоя стока.

$Reff$ сравнивает прогноз модели с постоянным средним значением наблюдаемого расхода за весь период.

В случае, если $Reff$ равен единице, то наблюдается идеальное соответствие смоделированных значений фактическим. Если $Reff$ равен нулю или ниже, то соответствие моделью не было обнаружено [18].

Для повышения качества моделирования желательно, чтобы в исходных данных были отображены самые разнообразные гидрологические явления. Калибровку также следует осуществлять на рядах исходных данных длиной от 5 лет. Проверка работоспособности модели осуществляется с помощью ее запуска в рамках неосвещенного реальными наблюдениями периода [2].

5.3 Структура модели

Саму модель можно разделить на несколько блоков:

- Блок снега;
- Блок ледников;
- Блок влажности почвы;

- Ответная функция;
- Блок маршрута.

Каждый из них занимается расчетами своих параметров, отражающих влияние тех или иных природных и антропогенных факторов. В итоге все расчеты сводятся к определению речного стока. Общая структура модели представлена на рисунке 5.1

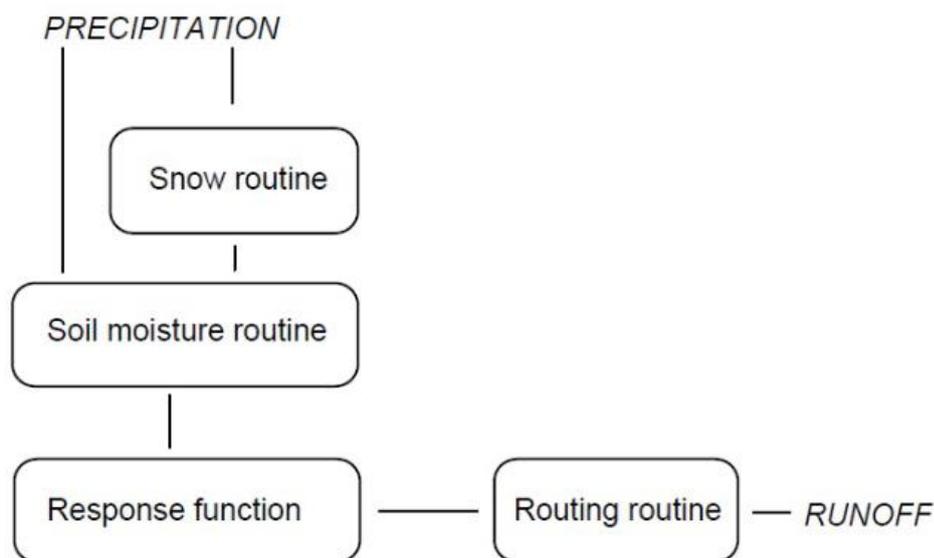


Рисунок 5.1 – Структура модели HBV

5.3.1 Блок снега

В качестве исходных данных при расчетах, связанных с снежным покровом, используются осадки и температура. В качестве итоговых данных блок определяет образование снежного покрова и его таяние.

Осадки определяются как снег, когда температура воздуха находится ниже пороговой температуры, которая в большинстве случаев принимается равной нулю [18].

Таяние снега (meltwater [мм/Δt]) происходит, когда превышает пороговую и производится по формуле:

$$\text{meltwater} = \text{CFMAX} (T - T_T) \quad (5.2)$$

где: CFMAX – температурный фактор [мм/СΔt];

TT – пороговая температура [С].

CFMAX обычно колеблется от 1.5 до 4 мм/С в день для Швеции. В лесах эти показатели обычно ниже.

Снежный покров удерживает талую воду до тех пор, пока ее количество не превысит определенную часть водного эквивалента снежного покрова. Если температура опустится снова ниже порогового значения, то эта вода замерзнет. Определить повторное замерзание воды позволяет формула:

$$\text{refreezing meltwater} = \text{CFR} \cdot \text{CFMAX}(\text{TT}-T), \quad (5.3)$$

где: CFR – коэффициент повторного замерзания.

5.3.2 Блок ледников

Исходными данными для расчета влияния ледников на формирование речного стока служат температура и снеготаяние. Результатом же является содержание воды в леднике и сток с него.

Таяние ледника на водосборы осуществляется с помощью метода температура-день и прибавляется к жидкой воде, содержащейся в леднике. Некоторая часть (KSI) моделируемого запаса снега рассчитывается для преобразования в лед ледника в каждый временной шаг [18].

Соотношение между содержанием воды в леднике и стоком из него изменяется в зависимости от времени и отражает сезонное развитие ледниковой дренажной системы [18]

$$Q_g = (\text{KGmin} + d\text{KG} * e^{(-\text{AG} * \text{SWE})}) * S \quad (5.4)$$

где: KGmin – минимальный коэффициент стока;

dKG – разница между максимальным и минимальным коэффициентом стока;

AG – параметр калибровки;

SWE – водный эквивалент снежного покрова на вершине ледника;

S – жидкая вода, содержащаяся в леднике.

5.3.3 Блок влажности почвы

Исходными данными для блока расчета влажности почвы служит потенциальное испарение, осадки и снеготаяние. Итоговыми данными являются фактическое испарение, влажность почвы и сток грунтовых вод.

Вода из растаявшего снега заполняет верхний слой почвы и уходит на питание в зависимости от отношения между фактическим содержанием воды в почве и максимально возможным его количеством. Описывается этот процесс по формуле:

$$\frac{\text{recharge}}{P(t)} = \left(\frac{SM(t)}{FC}\right)^{\text{BETA}} \quad (5.5)$$

где: SM – фактическое содержание воды в почве;

FC – максимально возможное содержание воды в почве;

P – осадки и растаявший снег;

recharge – пополнение грунтовых вод;

BETA – параметр, определяющий относительный вклад в сток дождей или снеготаяния.

Фактическое испарение определяется по формуле:

$$E_{\text{act}} = E_{\text{pot}} \cdot \min\left(\frac{SM(t)}{FC \cdot LP}, 1\right) \quad (5.6)$$

где: E_{act} – фактическое испарение;

E_{pot} – потенциальное испарение;

SM – фактическое содержание воды в почве;

FC – максимально возможное содержание воды в почве;

LP – значение при превышении которого фактическое испарение превращается в потенциальное.

Сток из грунтовых вод рассчитывается по формуле:

$$Q_{GW(t)} = K_2SLZ + K_1SUZ + K_0\max(SUZ-UZL,0) \quad (5.7)$$

где: SUZ – слой воды в верхнем уровне грунтовых вод;

SLZ – слой воды в нижнем уровне грунтовых вод;

UZL – пороговое значение;

$K_{0,1,2}$ – коэффициент отдачи или накопления.

5.3.4 Ответная функция

Исходными данными для блока ответа является пополнение грунтовых вод и потенциальное испарение. Результатом является уровень грунтовых вод и сток.

Схема работы блока представлена на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Схема работы блока ответной функции модели HBV
(S – запас воды; Q – сток)

Сток определяется по формуле:

$$Q(t) = K \cdot S(t) \quad (5.8)$$

где: K – коэффициент отдачи или накопления.

5.3.5 Блок маршрута

В качестве исходных данных служит сток, полученный в блоке ответной функции. Результатом же является смоделированный сток [18].

Трансформация осуществляется с помощью параметра MAXBASS, который отображает длину треугольной весовой функции. Сток за предыдущий временной шаг распределяется по следующим шагам с помощью MAXBASS, корректирующий итоговый результат.

5.4 Работа с моделью

Запуск модели и ее настройка осуществляется с помощью специальной программы, разработанной специально для нее.

5.4.1 Выбор исследуемого водосбора

Первым шагом является выбор исследуемого водосбора, что осуществляется с помощью инструмента «Open catchment», в котором выбирается папка, содержащая файлы с исходными данными. Выбор папки осуществляется с помощью стандартного для Windows поиска расположения файлов на дисках компьютера. Таким же образом выбирается водосбор, который использовался ранее. Окно выбора водосбора представлено на рисунке 5.3.

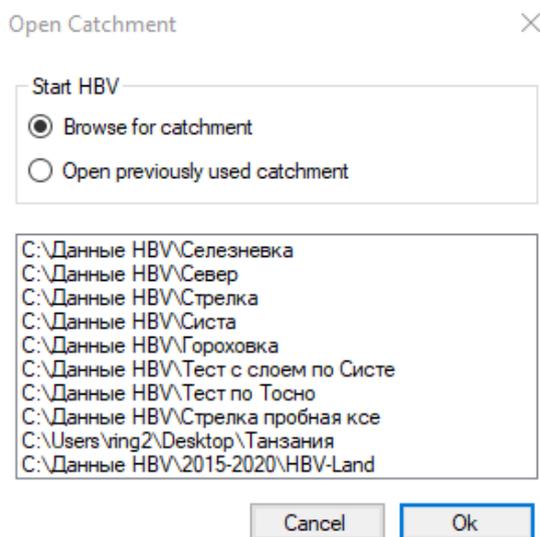


Рисунок 5.3 – Окно выбора водосбора

5.4.2 Настройка параметров водосбора

Характеристики водосбора настраиваются в разделе «Catchment Settings», попасть в которое можно из главного меню. Раздел содержит несколько форм, в которых настраиваются те или иные параметры бассейна.

В форме «Catchment properties» определяется количество высотных и растительных зон. Минимальным значением может быть определена единица, максимум высотных зон должен не превышать 20, а растительных 3.

Форма «Height Increment Variables» позволяет настроить параметры PCALT, TCALT, Elev of P и Elev of T. Они могут быть указаны, как для всего водосбора, так и для каждого подбассейна в отдельности. Параметры Elev of P и Elev of T задают высоту входа в модель осадков и температуры [18].

Форма «Elevations and Areas» определяет долю площади каждого подбассейна, которую занимает каждая растительная зона. Тут же определяется средняя высота каждой высотной зоны.

В форме «Lake Properties» определяется доля площади каждого подбассейна, которую занимают озера.

В этом же разделе определяется доля площади каждого подбассейна.

Окно настройки параметров водосбора представлено на рисунке 5.4.

5.4.3 Изменение настроек модели

Настройки модели определяются в разделе «Model Settings», в который можно попасть через главное меню.

Форма основных настроек позволяет сохранить каждый отдельный запуск модели и определить количество временных шагов, отображаемых на одном графике [18].

Окно настройки параметров модели представлено на рисунке 5.5.

Catchment Settings

Catchment properties

Number of elevation zones: 15

Number of vegetation zones: 1

Height increment variables

PCALT: -9.999996355

TCALT: 0.6

Elev. of P: -9.999983183

Elev. of T: -9.716819401

Lake properties

	Elevation	Area	TT	SFCF
Subcatchment 1	0	0	0	0

Catchment Elevations and Areas

	Mean elevation [m]	Subcatch. 1 Veg. zone 1
Elevation zone 1	0	0.1
Elevation zone 2	4	0.1
Elevation zone 3	8	0.1
Elevation zone 4	12	0.1
Elevation zone 5	16	0.1
Elevation zone 6	20	0.1
Elevation zone 7	24	0.1
Elevation zone 8	28	0.1
Elevation zone 9	32	0.1
Elevation zone 10	36	0.1
Elevation zone 11	40	0
Elevation zone 12	44	0
Elevation zone 13	48	0
Elevation zone 14	52	0
Elevation zone 15	56	0

Sum areas

	Sum areas
Subcatchment 1	1

OK

Рисунок 5.4 – Окно настройки параметров водосбора

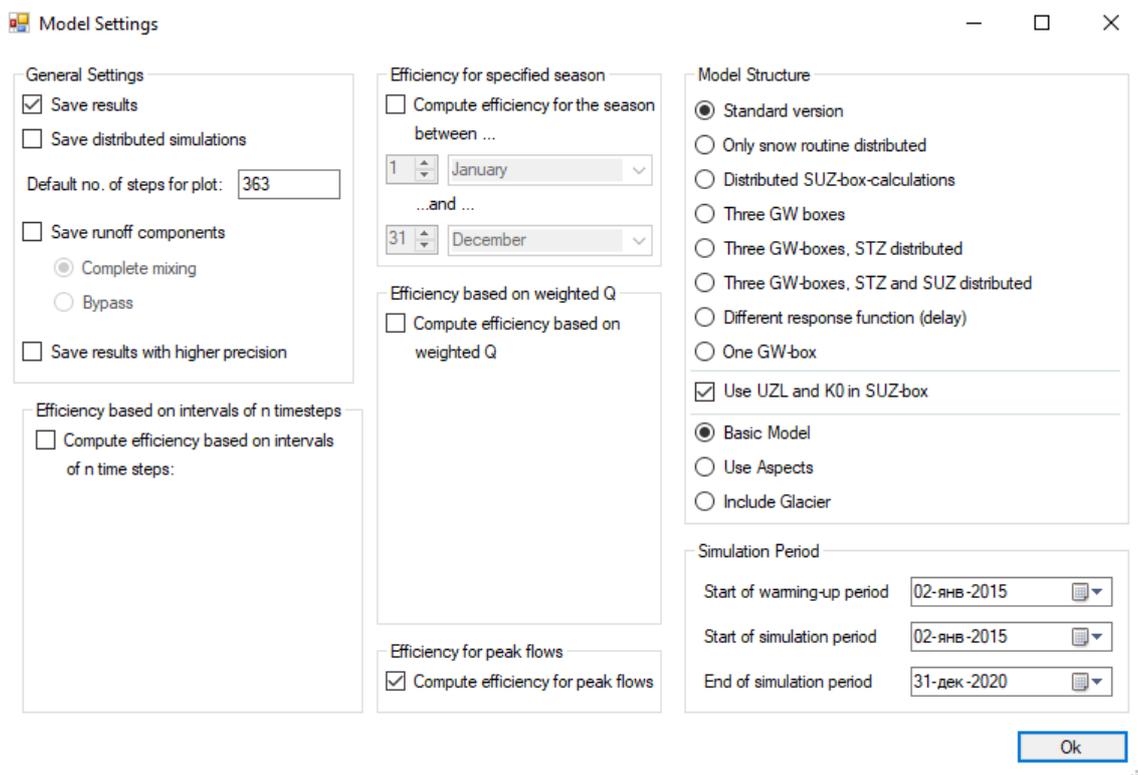


Рисунок 5.5 – Окно настройки модели

5.4.4 Работа с главным экраном

Главное окно программы является основным инструментом настройки модели и вывода ее результатов. Именно отсюда осуществляется управление программой и переход в ее подразделы. Состоит главный экран из трех частей:

- Панель управления в верхней части экрана;
- Панель параметров в левой части экрана;
- Графическая панель в правой части экрана;

Панель управления позволяет настраивать работу модели, открывать новые водосборы, заканчивать текущий сеанс работы с моделью, производить дополнительную настройку, корректировать параметры водосбора, выбирать инструменты для калибровки модели, а также ознакомиться с инструкцией по работе с программой [18].

Панель параметров отвечает за настройку основных параметров модели. Панель содержит параметры блока снега, блока влажности почвы, ответной функции ответа и блока маршрута. Блоки снега и влажности почвы могут быть дополнительно настроены в зависимости от растительных зон, обладающих

собственными параметрами. Остальные параметры применяются ко всему бассейну в целом, но доступна также и настройка по каждому суббассейну в отдельности.

Все настройки могут быть сохранены в отдельный файл с помощью кнопки «Save parameters» и загружены при новом запуске программы с помощью кнопки «Load parameters».

Кнопка «Run!» запускает модель с установленными параметрами. Когда программа завершит свою работу результат будет выведен в графическую панель в правой части экрана.

Расположенные в верхней части экрана настройки From/To позволяют настроить временной период, за который будет выводиться график. Кнопки Previous и Next позволяют вывести на экран следующий временной интервал, равный предыдущему [18].

Окно работы с главным экраном модели представлено на рисунке 5.6.

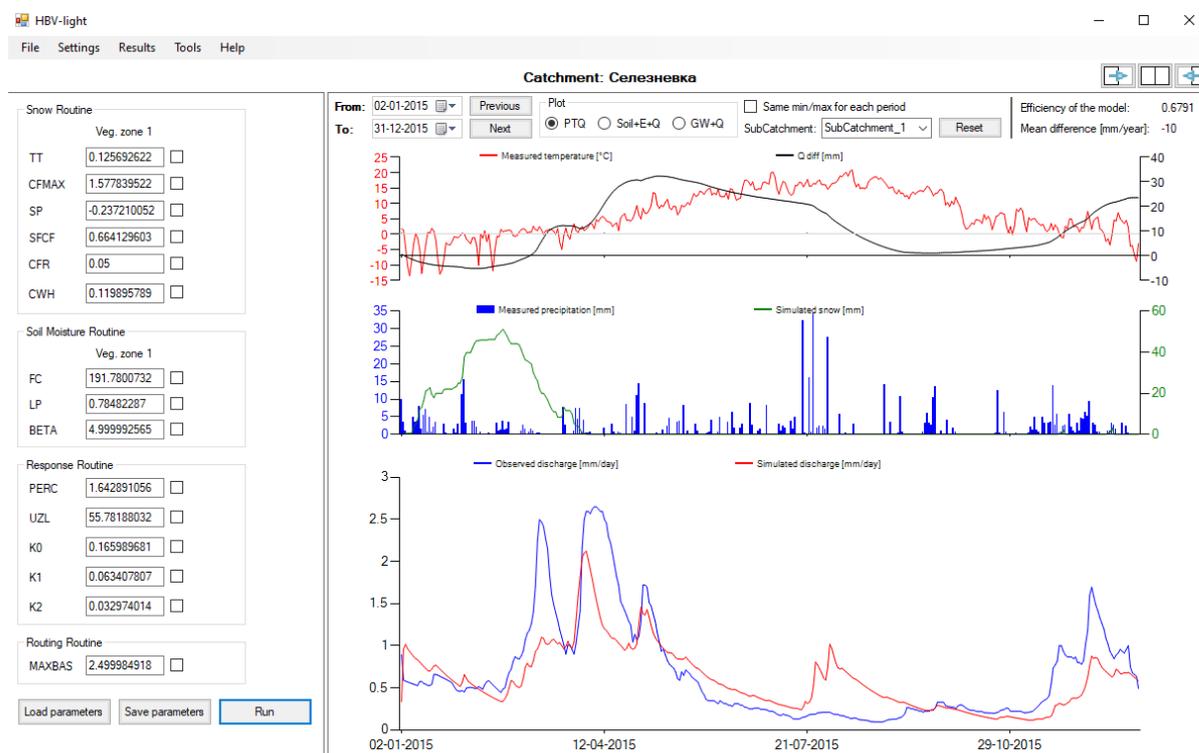


Рисунок 5.6 – Главный экран модели HBV

5.4.5 Калибровка Монте Карло

Инструмент калибровки Монте Карло запускается в разделе Инструменты, расположенном в верхней части главного экрана.

Настройка процесса калибровки производится с помощью специальных окон, в которых собраны все необходимые параметры. В первом окне, расположенном слева, настраивается количество запусков процесса, критерии, при соблюдении которых результаты калибровки будут записаны, например, все или только обладающие наивысшими параметрами совпадения. Параметры, по которому будет определяться эффективность калибровки также могут быть настроены.

Если исследуемый водосбор содержит несколько подбассейнов, то можно также определить будет ли определяться эффективность для каждого из них или для всего водосбора в целом.

Калибровку можно запустить для нескольких временных промежутков. Их границы выбирают дополнительно. Определение оптимальных параметров будет проведено отдельно для каждого из них.

В окне, в котором собраны параметры растительной зоны, можно указать граничные значения для каждого из параметров растительной зоны. Во время калибровки будут выбраны случайные значения, попадающие в эти границы. Если рассматривается несколько подбассейнов, то случайные значения могут быть выбраны для каждого из них в отдельности.

В окне `CathmentParameters` можно вручную указать границы каждого параметра водосбора. Во время калибровки значения этих параметров будут выбираться случайно в рамках заданных границ. Также можно указать есть ли необходимость определять эти параметры для каждого подбассейна в отдельности [18].

Окно работы с инструментами калибровки Монте Карло Представлен на рисунке 5.7.

Monte Carlo Runs

Monte Carlo Settings

Number of model runs:

Save all runs
 Save only if obj. function >
 Save 100 runs with highest obj. function value

Objective function:

Gaussian random numbers

Multi Period

Divide simulation period into multiple parts

Progress

Done so far:

Estimated endtime:

Vegetation zone parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit
TT	<input type="text" value="-2"/>	<input type="text" value="0.5"/>
CFMAX	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="4"/>
SP	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
SFCF	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.9"/>
CFR	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0.05"/>
CWH	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.1"/>
FC	<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="550"/>
LP	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text" value="1"/>
BETA	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="5"/>

Catchment parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit
PERC	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="4"/>
UZL	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="70"/>
K0	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.5"/>
K1	<input type="text" value="0.01"/>	<input type="text" value="0.2"/>
K2	<input type="text" value="5E-05"/>	<input type="text" value="0.1"/>
MAXBAS	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2.5"/>
PCALT	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="10"/>
TCALT	<input type="text" value="0.6"/>	<input type="text" value="0.6"/>
Elev. of P	<input type="text" value="-9.999983183"/>	<input type="text" value="-9.999983183"/>
Elev. of T	<input type="text" value="-9.716819401"/>	<input type="text" value="-9.716819401"/>

Рисунок 5.7 – Окно работы с инструментов калибровки модели Монте Карло

5.4.6 GAP калибровка

Через вкладку инструменты можно также открыть меню запуска GAP калибровки. Он основан на алгоритме эволюции наборов параметров в зависимости от рекомендации отбора. Первоначальный набор параметров генерируется случайно в заданных изначально границах. Дальнейшие же генерации связаны уже с «пригодностью» этих параметров относительно целевой функции. Из первоначального набора параметров создается новое поколение путем объединения предыдущих. Вероятность выбора группы параметров из набора напрямую связана с их соответствием целевой функции. Новый набор, сгенерированный из родительских наборов, получается вероятностью изменения какого-либо параметра в оптимальном интервале, который будет больше всего соответствует целевой функции. Новые поколения параметров сменяют старые, приближаясь к максимально возможному соответствию заданной целевой функции. В итоге, модель выдает набор параметров, который больше всех остальных удовлетворяет заданные условия целевой функции [18].

Для большей точности, после завершения работы алгоритма эволюции применяется квадратично сходящийся метод Пауэлла, который дополнительно уточняет полученные параметры.

В окне настройки GAP оптимизации представлен набор окон, в которых производится настройка процесса калибровки.

В окне, расположенном слева, можно указать параметры самого алгоритма эволюции: количество поколений параметров, частота обмена параметрами, вероятность выбора случайных значений и т.д.

Окно справа позволяет вручную настроить границы, в пределах которых будет выбран первый набор параметров, от которого и будет отталкиваться процесс калибровки. Также здесь же можно настроить параметры зоны растительности для всего водосбора или для каждого подбассейна в отдельности. Возможна и дополнительная настройка параметров водосбора на каждом подбассейне в отдельности.

В окне с настройками модели можно выбрать количество запусков самой модели и количество запуском процесса оптимизации методом Пауэлла.

Расположенная ниже сетка позволяет выбрать целевую функцию, по которой и будет определяться соответствие подобранных параметров.

После окончания процесса калибровки создается текстовый файл с результатами, откуда можно извлечь параметры модели, наиболее соответствующие целевой функции, и вставить в саму модель, чтобы получить необходимые результаты [18].

Окно работы с инструментом калибровки GAP optimization представлено на рисунке 5.8.

GAP optimization

Population Settings

Number of parameter sets: 50

Number of populations: 1

Frequency of exchange: 0

Number of PSs which exchange: 0

Reproduction Settings

Probability for optimization between sets: 0.01

Probability for mutation: 0.02

Probability for optimized value: 0

Probability for random value between the old values: 0.16

Probability for taking one of the old values: 0.82

Portion of range for small change (if random between and both values equal): 0

Value of C: 2

Model Settings

No of model runs: 5000

No of runs for local optimization (Powell): 1000

Calibrate 100 times

Goodness of Fit Measure

Population_1

	Obj. Function	Weight
▶	KGE	1
*		

Progress

Calibration: 0 Best fit so far: 0

Population: 0 Done so far: 0

Generation: 0 Done so far (Powell): 0

Estimated endtime:

Vegetation zone parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit
TT	-2	0.5
CFMAX	0.5	4
SP	0	0
SFCF	0.5	0.9
CFR	0.05	0.05
CWH	0.1	0.1
FC	100	550
LP	0.3	1
BETA	1	5

Catchment parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit
PERC	0	4
UZL	0	70
K0	0.1	0.5
K1	0.01	0.2
K2	5E-05	0.1
MAXBAS	1	2.5
PCALT	10	10
TCALT	0.6	0.6
Elev. of P	0	0
Elev. of T	0	0

Load Settings Save Settings

Close Start calibration

Рисунок 5.8 – Окно работы с инструментом калибровки GAP optimization

5.4.7 Результаты работы модели

Результаты работы модели сохраняются в текстовых файлах в папке Results. Однако, ознакомиться с результатами можно и на главном экране модели, на который выводятся графики, а также в вкладке Summary, куда выводится итоговая статистика. Там представлены суммы наблюдаемых слоев стока и смоделированных, сумма осадков и некоторых других рассчитанных параметров. Также указывается эффективность моделирования за заданные временные промежутки, эффективность моделирования пиковых значений и общая эффективность.

6. Расчет речного стока и биогенной нагрузки на реках с достаточной освещенностью данными гидрометеорологического мониторинга

Для первоначального теста работоспособности комплекса моделей были проведены расчеты речного и биогенного стока на реках Ленинградской области, освещенных данными гидрометеорологического мониторинга.

6.1 Исходные данные для расчета речного стока

На водосборах рек, на которых не реализовано регулярное наблюдение за гидрологическими характеристиками, при расчете гидрологического стока активно используются разнообразные математические модели, описывающие процессы формирования речного стока. Одной из таких моделей является модель HBV, использованное в данной работе.

HBV рассчитывает слой стока за заданный период на основе рядов наблюдаемых рядов слоя стока, рядов метеорологических параметров, а именно осадков и температуры воздуха, а также геофизических особенностей исследуемых водосборов.

Для первичного теста работоспособности модели HBV в условиях Северо-Запада Российской Федерации были выбраны реки, на которых осуществляется регулярный гидрологический мониторинг. Такими реками стали река Селезневка и Гороховка.

Были созданы текстовые файлы RTQ и evar, в которые были загружены ряды рядов температур, осадков, наблюдаемых слоев стока и осредненные значения.

6.2 Калибровка модели HBV

С помощью инструмента GAP optimization была проведена калибровка модели и получены оптимальные параметры для моделирования. В качестве

целевой функции, т.е. параметра к максимальному значению которого будет стремиться алгоритм эволюции, был выбран коэффициент эффективности R . Калибровка проводилась на основе 4 лет с 2015 по 2019 год.

Коэффициент эффективности в случае работы с Селезневкой оказался равен 0.68, что является достаточно удовлетворительным показателем. Результат калибровки представлен на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 – График калибровки модели на реке Селезневка

Такие же расчеты были проведены для реки Гороховка. Результат на рисунке 6.2.



Рисунок 6.2 – График калибровки модели на реке Гороховка

Калибровка инструментом GAP optimization на основе данных за 2015-2019 годы позволила получить коэффициент соответствия равен 0.78, что можно считать очень хорошим показателем.

6.3. Запуск модели HBV

Подобранные с помощью GAP optimization параметры были использованы для моделирования речного стока были также использованы для восстановления слоя стока за неосвещенный 2020 год. Результаты моделирования представлены на рисунке 6.3. Оценка погрешности представлена в таблице 6.1.

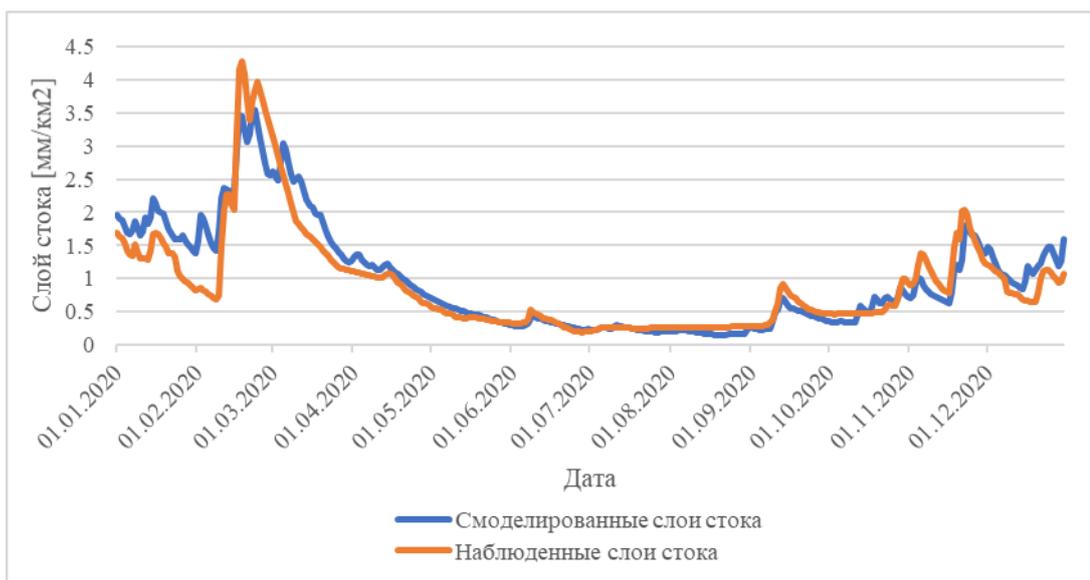


Рисунок 6.3 – График значений слоя стока на реке Селезневка за 2020 год

Таблица 6.1 – Оценка погрешности при расчете слоев стока на реке Селезневка моделью HBV

Характеристика	Измеренное значение слоя стока	Смоделированное значение слоя стока	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Среднее	0.91	0.98	-0.07	-7.34

Максимально				
е	4.29	3.55	0.74	17.22

Из таблицы и графика становится ясно, что модель с достаточной точностью может восстановить значения слоя стока за неосвещенный период.

На основе откалиброванных параметров было проведено восстановление значений слоя стока на реке Гороховка за неосвещенный 2020 год. График восстановленных результатов представлен на рисунке 6.4. Оценка погрешностей представлена в таблице 6.2.

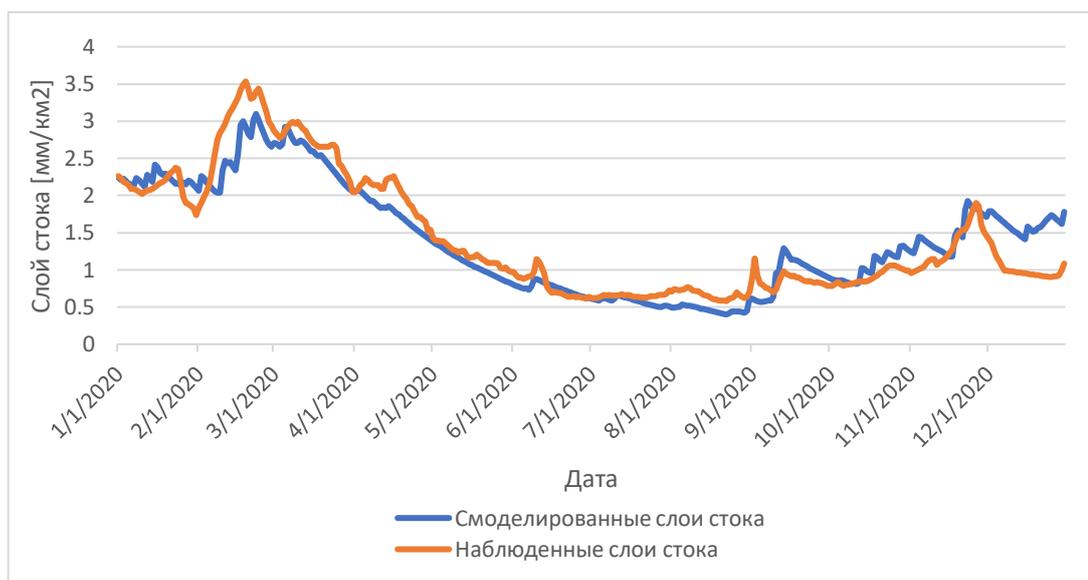


Рисунок 6.4 – График значений слоя стока на реке Гороховка за 2020 год

Таблица

Таблица 6.2 – Оценка погрешности при расчете слоя стока на реке Гороховка моделью HBV

Характеристика	Измеренное значение слоя стока	Смоделированное значение слоя стока	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Среднее	1.42	1.41	0.01	0.90
Максимально е	3.53	3.10	0.44	12.37

Как и в случае с Селезневкой, модель HBV с достаточной точностью смогла восстановить значения слоя стока за неосвещенный период.

6.4. Исходные данные для запуска модели Fygis

Fygis – математическая модель, рассчитывающая сток фосфора и азота на исследуемом водосборе, учитывая его геофизические особенности и антропогенную нагрузку на него.

На основании данных, полученных с помощью модели HBV, был проведен тестовый расчет стока биогенного вещества на реках Селезневка и Гороховка с целью оценить качество работы модели Fygis при использовании восстановленных значений слоя стока.

Работа с FygisNP начинается с обработки бассейна исследуемой реки в какой-либо ГИС-системе. В данном случае была использована ArcGis. С помощью нее была проведена разбивка водосбора реки на малые подбассейны. В результате было определено 14 суббассейнов. Карта подбассейнов реки Селезневка представлена на рисунке 6.5.

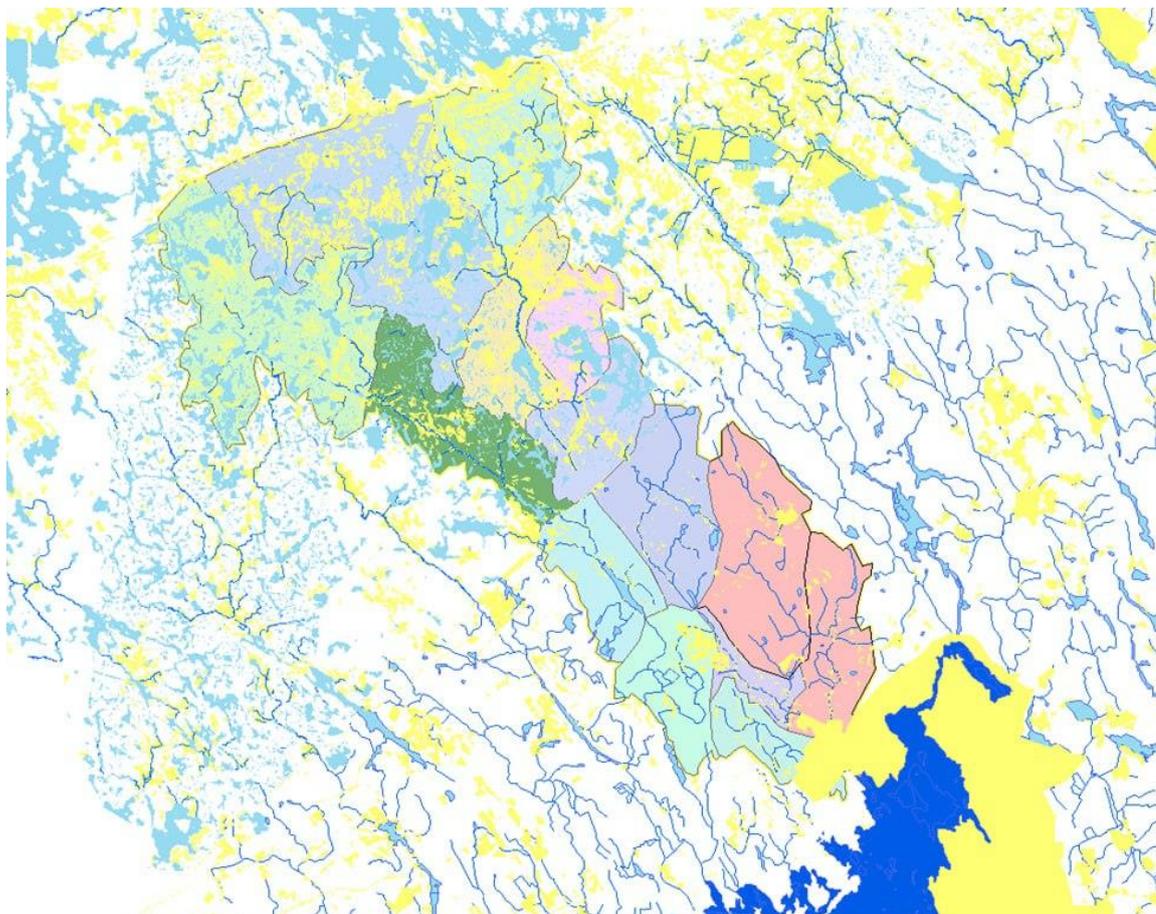


Рисунок 6.5 – Карта подбассейнов реки Селезеневка

Для каждого из них была определена площадь лесов, озер, болот, озер, сельскохозяйственных территория, а также жилой и индустриальной застройки.

Полученные с помощью ArcGis данные были занесены в рабочие файлы Excel, где по вкладкам распределены определенные характеристики, необходимые модели в процессе моделирования.

Обязательных вкладок несколько:

– Catchment – содержит информацию о всех суббассейнах исследуемой реки. Именно сюда заносятся данные о площади каждого типа подстилающей поверхности,

– COBS – вкладка содержит сведения концентрации биогенных веществ, непосредственно измеренных на исследуемом водосборе,

– Major point sources – содержит информацию об основных источниках загрязнения на водосборе,

- Minor point sources – содержит сведения о малых источниках загрязнения,
- Temperature – температура воды,
- Type specific concentration – в этом файле указываются концентрации биогенного вещества, поступающее с каждого вида подстилающей поверхности,
- Specific runoff – слой речного стока, в данном случае используются данные, полученные с помощью программы HBV.

При правильной загрузке всех данных в программы их всех можно посмотреть прямо в программе. Окно интерфейса программы представлено на рисунке 6.5.

CatchmentID	StationID	DownstreamID	Area (km2)	LakeArea (km2)	StreamLengt
1	10	-1	37.5	0.171498181168	38978.1027
2	20	1	21.101219749259	0	23392.1573
3	20	1	11.428647433334	0.208652625	19800.0816
4	40	3	31.28111136818	0.000214139028	39999.0984
5	40	1	57.478713779278	0.212611914017	42103.4496
6	60	3	43.53039374566...	1.129744745097...	26386.3365
7	60	4	32.313456240026	1.904175749927	21576.6541
8	60	7	31.74	0.65	8747
9	60	8	25.47	0.29	6404
10	60	8	35.78	2.42	15625
11	60	10	51.29	0.066	22998
12	60	10	122.44	5.67	26777
13	60	7	47.78	2.03	24640
14	60	13	96.12	6.97	20968
15	40	4	1E-11	0	1E-11
16	40	15	1E-11	0	1E-11
17	40	16	1E-11	0	1E-11

Рисунок 5.5 – Окно представления загруженных данных в модель

Интерфейс FygisNP позволяет также ознакомиться с автоматически встроенными схемами водосборов, выделенных на исследуемой реке. Вид этой схемы представлен на рисунке 6.6.

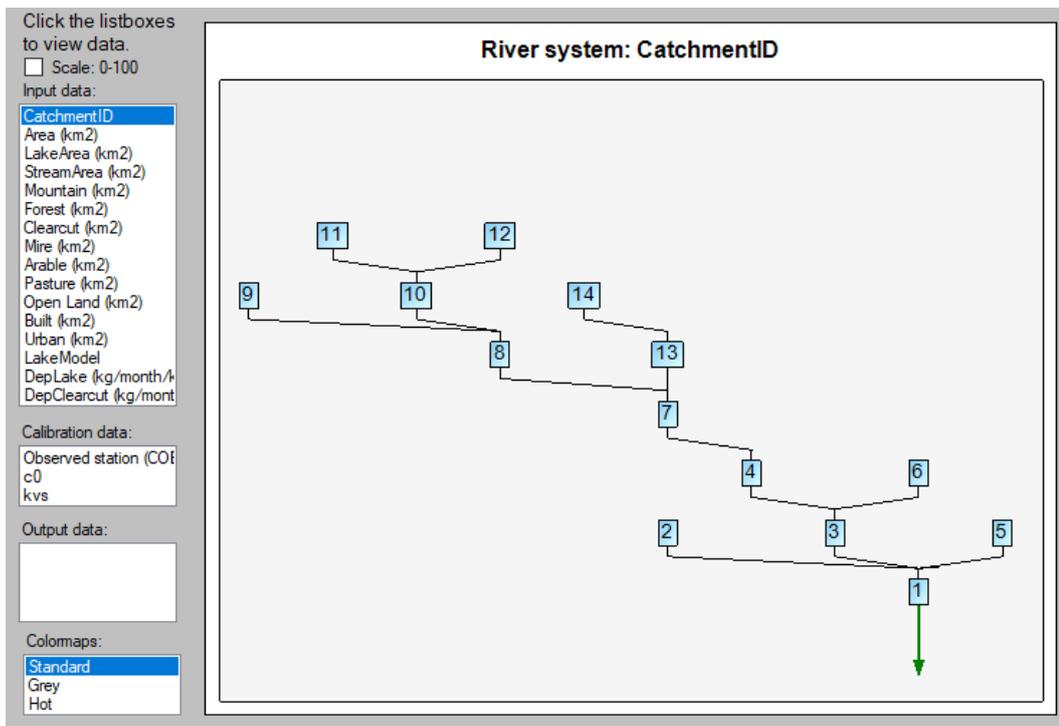


Рисунок 6.6 – Окно представления схемы суббассейнов реки Селезневка

Такие же схемы можно получить для распределения тех или иных характеристик по подбассейнам исследуемой реки. На рисунке 6.7 продемонстрировано распределение озер по суббассейнам реки Селезневка.

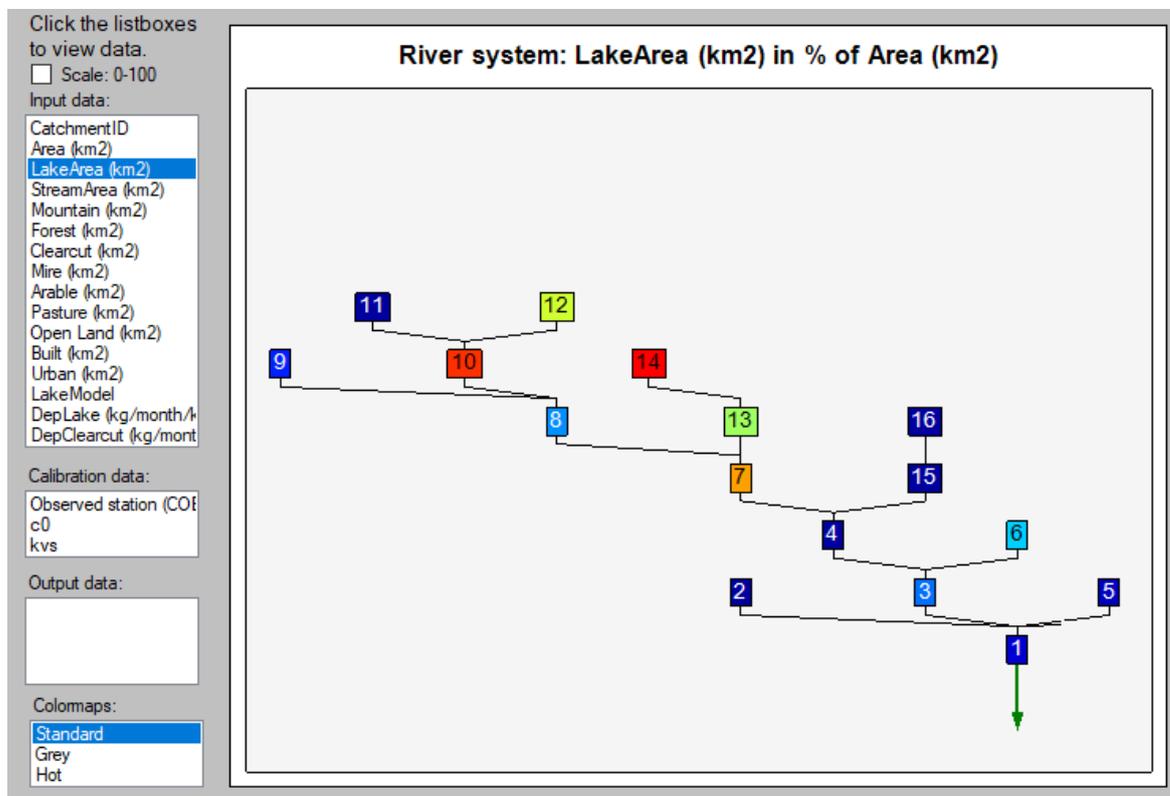


Рисунок 6.7 – Распределение озер по суббассейнам реки Селезневка

6.5. Калибровка модели FyrisNP

Калибровка модели осуществляется с помощью нескольких параметров:

– c_0 – эмпирический критерий, описывающий уменьшение удержания биогенного вещества в зависимости от температуры воды. Диапазон температуры колеблется от 0 до 20 градусов Цельсия,

– kvs – калибрационный критерий, описывающий расход воды

Эти параметры для каждого исследуемого водосбора подбираются с помощью калибровки.

Модель FyrisNP позволяет провести калибровку тремя методами: ручным, Монте Карло и автоматическим.

Ручная калибровка позволяет пользователю самостоятельно подобрать критерии, которые будут лучше всего описывать процесс стока биогенного вещества. Процесс ручной калибровки запускается на вкладке Calibration с помощью кнопки RUN.

Калибровка Монте Карло позволяет подобрать лучшие калибрационные критерии путем подбора случайных параметров из заданного диапазона. Калибровка Монте Карло запускается на вкладке Calibration.

Автоматическая калибровка подбирает самые подходящие значения калибрационных параметров автоматически. Полученные значения далее используются в ручной калибровке. Окно автоматической калибровки представлено на рисунке 6.8.

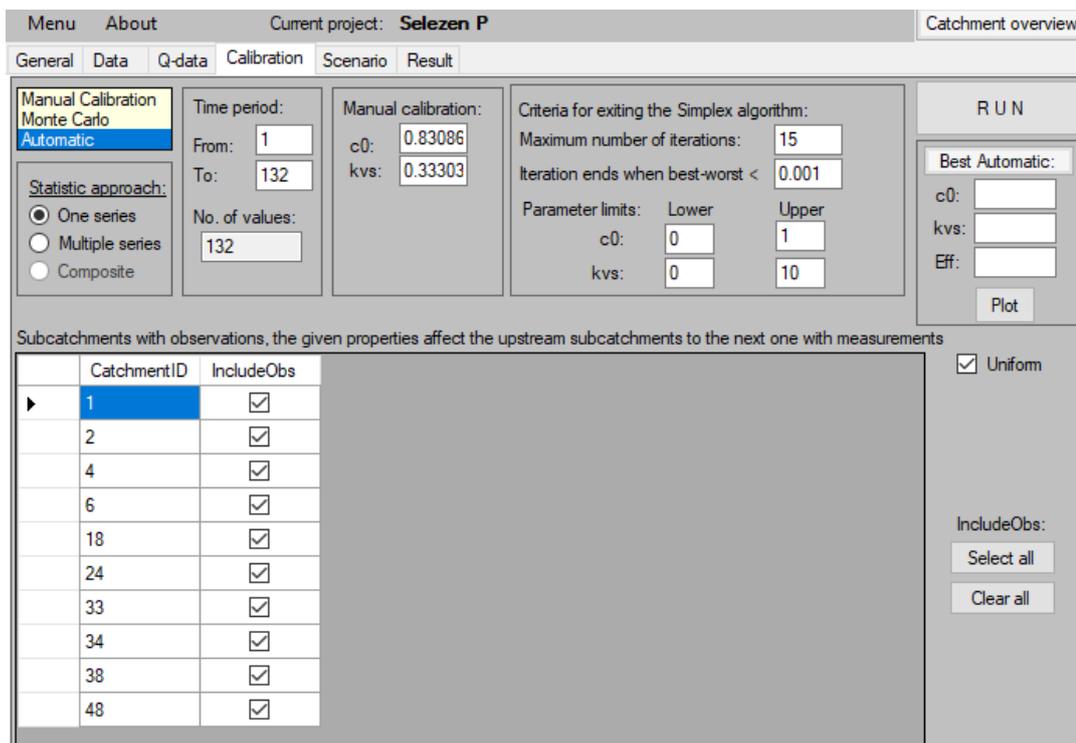


Рисунок 6.8 – Окно автоматической калибровки модели FytisNP

6.6. Расчет биогенной нагрузки на реках Селезневка и Гороховка

После проведения калибровки осуществляется расчет биогенной нагрузки. На каждом подбассейне расчет осуществляется по каждому подбассейну в отдельности за каждый месяц из исследуемого временного периода.

Результаты работы модели выводятся непосредственно в интерфейс программы. Они могут быть представлены в виде графиков или в виде таблиц, которые в дальнейшем могут быть экспортированы в другие программы, например, Excel.

На данном этапе был проведен расчет для рек Селезневка и Гороховка. Результаты работы программы могут быть представлены в виде таблиц или в виде графиков. Соответствующие таблицы и графики для рек Селезневка и Гороховка представлены на рисунках 6.9, 6.10, 6.11 и 6.12.

Menu About Current project: **Selezen P** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load	Catchment ID	Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concent (mg/l)
Sources	1	2003	9	10.4586350282337	4.73925092223175	0.043059
Apportionment	1	2003	10	9.2100311619017	20.6537420400857	0.035650
Catch contr	1	2003	11	8.43988751861344	30.7389161026096	0.033409
Out: <input type="text"/>	1	2003	12	5.36238535860505	43.6933803204336	0.020655
Plot	1	2004	1	5.51002678155814	42.7033189015949	0.021250
Copy	1	2004	2	4.74266118385449	50.5810874419875	0.018286
Write file	1	2004	3	5.02419083512446	45.4621341583572	0.019243
Catchment: 1	1	2004	4	6.5657097027571	30.484009449434	0.024891
2	1	2004	5	7.29693894935953	14.9276628925303	0.026629
3	1	2004	6	3.90269902588376	4.59515595609201	0.013037
4	1	2004	7	3.54511414293625	3.10230056768293	0.011794
5	1	2004	8	4.22827328986837	2.91997814139674	0.014355
6	1	2004	9	5.65271440766911	9.3605157189549	0.019667
7	1	2004	10	7.61853868751821	16.8978462851742	0.028156
8	1	2004	11	6.70626120439896	30.4381757566396	0.025506
9	1	2004	12	7.01599829207078	36.9475021853152	0.027582
10	1	2005	1	27.8275607676157	5.46856170355044	0.005468
11						
12						

Рисунок 6.9 – Окно с результатами работы программы по расчету стока общего азота на реке Селезневка

Menu About Current project: **Gorohovka N** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load	Catchment ID	Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concent (mg/l)
Sources	1	2004	1	104.765265491138	11076.2548279524	0.669097
Apportionment	1	2004	2	47.5401587481883	11858.9490876259	0.667529
Catch contr	1	2004	3	150.614363930257	12580.67675692	0.663633
Out: <input type="text"/>	1	2004	4	282.669321328769	8849.93787724194	0.691782
Plot	1	2004	5	654.421174610548	5538.00098616254	0.686461
Copy	1	2004	6	1520.42584677732	4113.06214704636	0.755984
Write file	1	2004	7	1397.00005032158	3392.49681254883	0.783957
Catchment: 1	1	2004	8	1358.188840866	2800.33525623045	0.798868
2	1	2004	9	1043.95913429594	4978.93205124588	0.747691
3	1	2004	10	689.001268250509	6235.31614876947	0.805650
4	1	2004	11	307.881804660812	8863.617630257	0.830077
5	1	2004	12	9.71874482242856	8871.19148349874	0.727417
6	1	2005	1	0	0	0
7	1	2005	2	0	0	0
8	1	2005	3	0	0	0
9	1	2005	4	0	0	0
10	1	2005	5	0	0	0
11						
12						

Рисунок 6.10 – Окно с результатами работы программы по расчету стока
общего азота на реке Гороховка

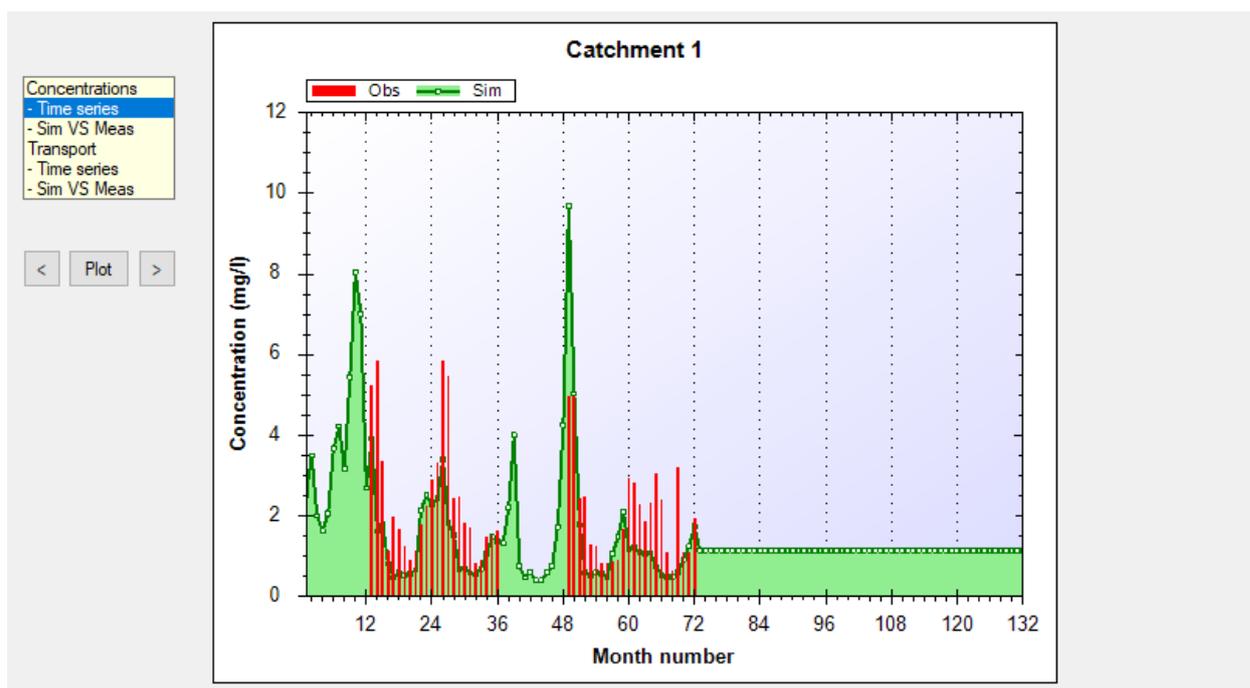


Рисунок 6.11 – График результатов работы по расчету стока общего азота на
реке Селезневка

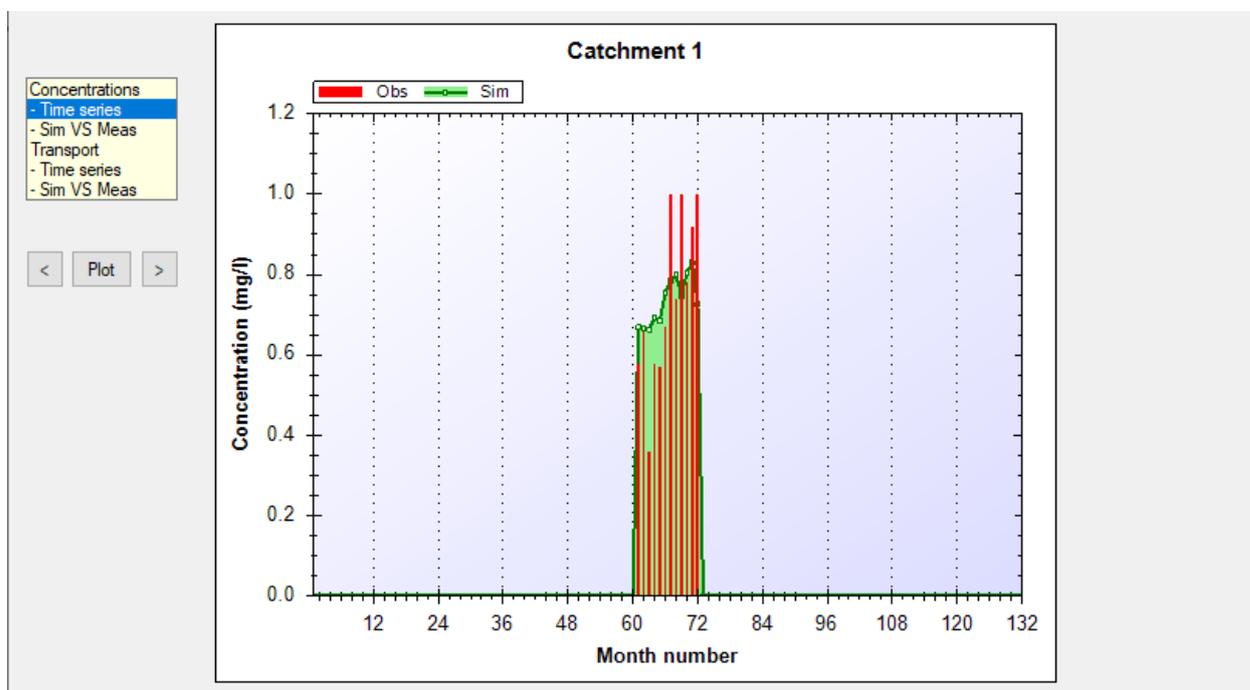


Рисунок 6.12 – График результатов работы по расчету стока общего азота на
реке Гороховка

Результаты работы модели FyrisNP по расчету концентрации общего азота и фосфора на реках Гороховка и Селезневка на основе значений слоя стока, смоделированных моделью FyrisNP представлены в таблицах 6.3 и 6.4.

Таблица 6.3 – Оценка погрешности расчета концентрации общего азота моделью FyrisNP

Река	Измеренное значение, мг/л	Рассчитанное значение, мг/л	Погрешность, %
	сред.	сред.	
Селезневка	2.26	1.81	23.92
Гороховка	0.74	0.74	0.26

Таблица 6.4 – Оценка погрешности расчета концентрации общего фосфора моделью FyrisNP

Река	Измеренное значение, мг/л	Рассчитанное значение, мг/л	Погрешность, %
	сред.	сред.	
Селезневка	0.07	0.04	79.32
Гороховка	0.05	0.05	1.61

Для оценки качества работы модели на основе смоделированных моделью HBV слоев стока представлены результаты работы модели на основе данных, полученных с помощью непосредственного гидрометеорологического наблюдения. Результаты расчетов представлены в таблицах 6.5 и 6.6.

Таблица 6.5 – Оценка погрешности расчета концентрации общего азота моделью FyrisNP на основе данных непосредственного мониторинга

Река	Измеренное значение, мг/л	Рассчитанное значение, мг/л	Погрешность, %
	сред.	сред.	
Селезневка	2.26	1.84	23.24
Гороховка	0.74	0.76	2.34

Таблица 6.6 – Оценка погрешности расчета концентрации общего фосфора моделью FyrisNP на основе данных непосредственного мониторинга

Река	Измеренное значение, мг/л	Рассчитанное значение, мг/л	Погрешность, %
	сред.	сред.	
Селезневка	0.07	0.05	49.75
Гороховка	0.05	0.05	0.03

Результаты работы модели, представленные в таблицах 6.3 и 6.4, позволяют сделать вывод, что расчет стока биогенного вещества на основе смоделированных значений слоя стока дает результаты с большей погрешностью. Особенно это заметно в случае, если расчет осуществляется для реки с повышенной антропогенной нагрузкой, например Селезневки. Однако, даже на Селезневке расчет концентраций общего азота позволяет получить средние значения схожие с измеренными. Результаты расчетов по Гороховке удовлетворительны и в случае с азотом, и с фосфором.

7. Расчет речного и биогенного стока на малых реках Ленинградской области, не освещенных данными наблюдений

7.1 Расчет речного и биогенного стока на малых реках юго-восточного побережья Финского залива

В качестве тестовых объектов были выбраны малые реки, расположенные на юго-восточном побережье Ленинградской области. Исходными данными стали восстановленные ряды слоев стока, ряды температуры воздуха, полученные с метеорологических станций в Санкт-Петербурге, а также осредненные для региона данные по испарению с поверхности воды.

7.1.1 Расчет речного стока на малых реках южного побережья Финского залива

Поскольку на исследуемых реках не ведется регулярное наблюдение за гидрологическими характеристиками, расходы воды на малых реках были восстановлены с помощью метода гидрологической аналогии. В качестве аналогов были выбраны близлежащие к исследуемым рекам водотоки. Для южного побережья аналогом стала река Систа.

Методом гидрологической аналогии были получены расходы воды на малых реках, которые затем были переведены в слой стока. В силу того, что аналоги для всех рек используются одни и те же, то и слои стока получаются едиными для всех водосборов в пределах исследуемого побережья Финского залива. Ряд этих слоев стока был признан средним для моделируемых рек.

Ряд слоев стока был загружен в текстовый файл RTQ, в котором также указаны исходные данные для проведения калибровки модели. Был создан текстовый файл evar, в котором указаны осредненные значения испарения для всей Ленинградской области.

Результаты расчета слоя стока представлены на рисунке 7.1.

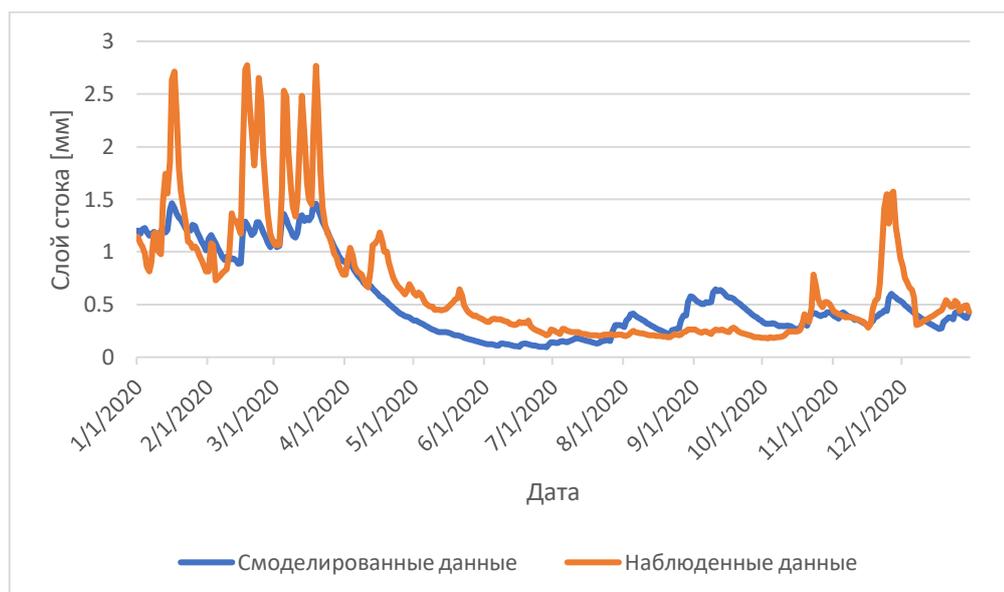


Рисунок 7.1 – График слоев стока на реках южного побережья Финского залива за 2020 год

Оценка погрешности моделирования слоя стока на реках южного побережья Финского залива представлен в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Оценка погрешности при расчете слоя стока на реках южного побережья Финского залива

Характеристика	Измеренное значение, мм	Смоделированное значение, мм	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Среднее	0.68	0.55	0.13	23.0
Максимальное	2.77	1.46	1.31	89.7

График и таблица показывают, что моделирование слоя стока на основе восстановленных расходов воды осуществляется с заметной погрешностью. Однако, общность тенденций установлена верно, и оценка среднего значения произведена с удовлетворительной точностью.

7.1.2 Расчет биогенного стока на малых реках юго-восточного побережья Финского залива

С помощью GIS системы ArcGis на исследуемых водосборах были выделены конкретные типы подстилающей поверхности. Кроме того, достаточно крупные бассейны для большей точности моделирования были разделены на суббассейны. На каждом суббассейны выделены отдельные типы подстилающей поверхности.

Полученные данные легли в основу файлов параметризации для модели FyrisNP.

Первым тестовым объектом стала река Стрелка. В модель были загружены файлы параметризации для расчета концентрации азота и общей нагрузки в реке Стрелка (рисунки 7.3 и 7.4).

Итоговые результаты представлены на рисунке 7.5 и в таблице 7.2 и 7.3.

Internal load	Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)	St ID
Sources	2003	10	0	0	0	10
Apportionment	2003	11	0	0	0	10
Catch contr	2003	12	0	0	0	10
Out:	2004	1	114.093484042693	3079.51373512243	1.91741441881907	10
Plot	2004	2	108.131548217258	3115.6580670544	2.34488732227029	10
Copy	2004	3	131.369872116742	2904.0005507847	1.8218574811466	10
Write file	2004	4	258.819520101436	1877.45982920947	2.37212183804543	10
Catchment:	2004	5	560.664579468444	939.968618264209	3.01253826655136	10
1	2004	6	942.183595285272	437.872780546104	2.97788763874184	10
2	2004	7	829.445800320061	583.652063765076	2.62156591150537	10
3	2004	8	641.310465148272	875.869373937262	2.02694094475567	10
4	2004	9	461.73754668784	1193.27097514399	1.8026871599105	10
5	2004	10	419.223910671709	1298.14809746062	2.94338211306314	10
6	2004	11	288.490911168804	1912.03869318108	3.68196726184946	10
7	2004	12	145.555249397415	2848.32990252507	5.64735216675523	10
8	2005	1	0	0	0	10
9	2005	2	0	0	0	10

Рисунок 7.3 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Стрелка

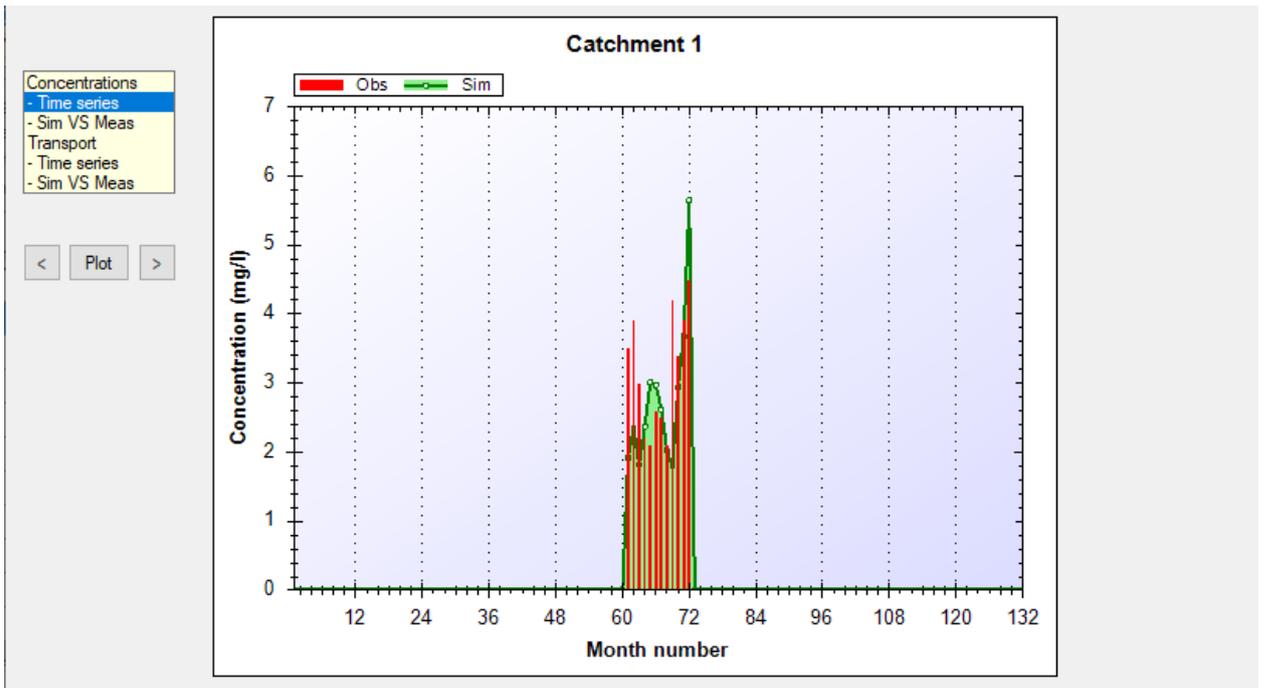


Рисунок 7.4 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактических в реке Стрелка в окне программы

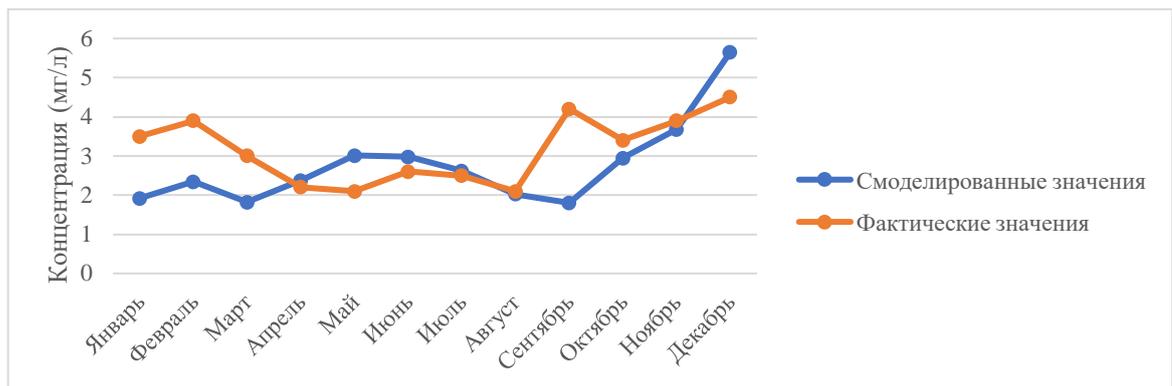


Рисунок 7.5 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на реке Стрелка

Таблица 7.2 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р. Стрелка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погр	Отн. погр
2020	Январь	1.92	3.50	-1.58	82.5
2020	Февраль	2.34	3.90	-1.56	66.3
2020	Март	1.82	3.00	-1.18	64.7
2020	Апрель	2.37	2.20	0.17	7.26
2020	Май	3.01	2.10	0.91	30.3
2020	Июнь	2.98	2.60	0.38	12.7
2020	Июль	2.62	2.50	0.12	4.64
2020	Август	2.03	2.10	-0.07	3.60
2020	Сентябрь	1.80	4.20	-2.40	133
2020	Октябрь	2.94	3.40	-0.46	15.5
2020	Ноябрь	3.68	3.90	-0.22	5.92
2020	Декабрь	5.65	4.50	1.15	20.3
Среднее		2.76	3.16	-0.39	37.2

Таблица 7.3 – Сравнение выноса Азота рекой Стрелка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность
Январь	440	241	199	45.2
Февраль	405	244	162	39.9
Март	374	227	147	39.3
Апрель	136	147	-10.7	7.82

Продолжение таблицы 7.3

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность
Май	51.3	73.6	-22.3	43.5
Июнь	29.9	34.3	-4.35	14.5
Июль	43.6	45.7	-2.12	4.86
Август	71.0	68.5	2.47	3.48
Сентябрь	218	93.4	124	57.1
Октябрь	117	102	15.8	13.4
Ноябрь	158	150	8.86	5.59
Декабрь	178	223	-45.3	25.5
Сумма	2223	1648	574	25.8

Аналогичные процедуры проведены для расчета концентрации фосфора в реке Стрелка (рисунки 7.6, 7.7, 7.8 и таблица 7.4 и 7.5).

The screenshot shows a software window titled "Current project: Стрелка P" with a "Catchment overview" tab. The main table displays data for the years 2003 and 2004, with columns for Year, Month, Retention (kg/month), Mass flow rate (kg/month), and Concentration (mg/l). The concentration values range from 0 to 0.112662386960005 mg/l. The interface also includes a sidebar with buttons for "Internal load", "Sources", "Apportionment", "Catch contr", "Out:", "Plot", "Copy", and "Write file", and a "Catchment:" list on the left.

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	379.006537211203	147.582136147645	0.091889869683716
2004	2	393.571813687204	127.31686299723	0.0958204307174432
2004	3	379.72739474818	146.601015895266	0.091971798952554
2004	4	427.555151359239	82.4948476060339	0.104230102017629
2004	5	465.310753839529	35.4156648604914	0.11350490171109
2004	6	480.800820773565	16.805771376418	0.114292783348946
2004	7	473.942155694108	25.0825792208092	0.112662386960005
2004	8	456.148103394508	46.8551926037183	0.10843250282398
2004	9	438.044613966176	69.4144312875078	0.104865119994543
2004	10	454.129049749157	49.073734601012	0.111268315940515
2004	11	447.218426030042	57.5136602624207	0.110752682438163
2004	12	447.701778294343	56.7594797539269	0.112536392181284
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.6 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Стрелка

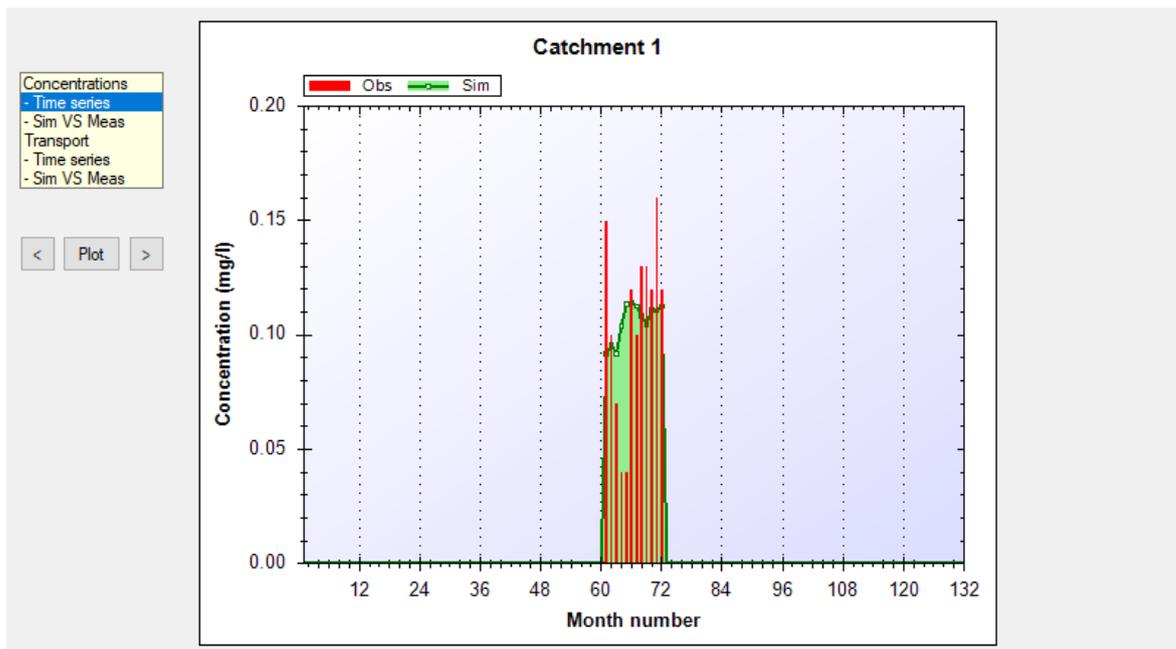


Рисунок 7.7 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактических в реке Стрелка в окне программы

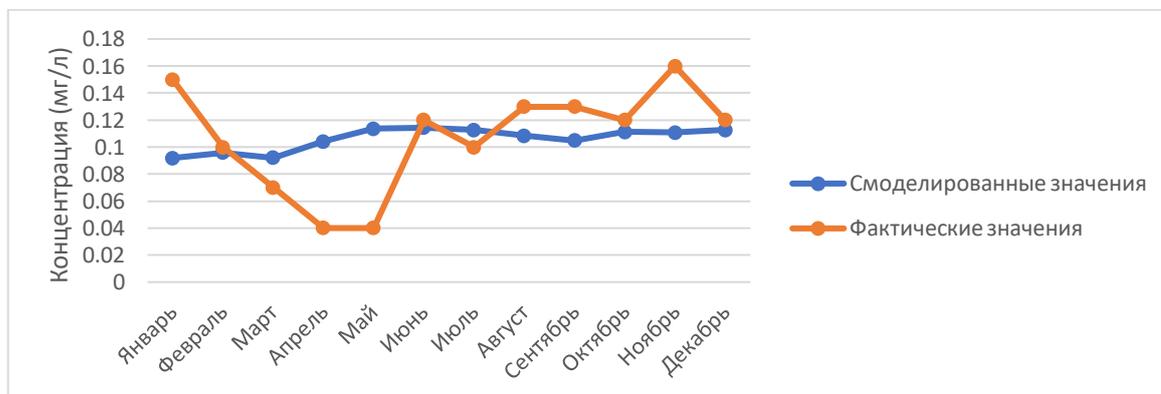


Рисунок 7.8 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных на реке Стрелка

Таблица 7.4 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р. Стрелка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность
2020	Январь	0.09	0.15	-0.06	63.2
2020	Февраль	0.10	0.10	0.00	4.36
2020	Март	0.09	0.07	0.02	23.9
2020	Апрель	0.10	0.04	0.06	61.6
2020	Май	0.11	0.04	0.07	64.8
2020	Июнь	0.11	0.12	-0.01	4.99
2020	Июль	0.11	0.10	0.01	11.2
2020	Август	0.11	0.13	-0.02	19.9
2020	Сентябрь	0.10	0.13	-0.03	24.0
2020	Октябрь	0.11	0.12	-0.01	7.85
2020	Ноябрь	0.11	0.16	-0.05	44.5
2020	Декабрь	0.11	0.12	-0.01	6.63
Среднее		0.11	0.11	0.00	28.1

Таблица 7.5 – Сравнение выноса фосфора рекой Стрелка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	18.9	11.5	7.30	39
Февраль	10.4	10.0	0.43	4
Март	8.73	11.5	-2.74	31
Апрель	2.48	6.46	-3.98	161
Май	0.98	2.77	-1.79	184
Июнь	1.38	1.32	0.07	4.8
Июль	1.74	1.96	-0.22	12.7
Август	4.40	3.67	0.73	16.6
Сентябрь	6.73	5.43	1.30	19.3
Октябрь	4.14	3.84	0.30	7.28
Ноябрь	6.50	4.50	2.00	30.8
Декабрь	4.74	4.44	0.29	6.22
Сумма	71.1	67.4	3.70	5.20

Результаты работы модели по расчету концентраций азота и общей нагрузки на реке Шингарка представлены на рисунках 7.9 – 7.11 и в таблице 7.6 и 7.7. Результаты работы по расчету концентраций фосфора и общей нагрузки на реке Шингарка представлены на рисунках 7.12 – 7.14 и в таблице 7.8 и 7.9.

Menu		About		Current project: Шингарка N			Catchment overview
General		Data	Q-data	Calibration	Scenario	Result	
Internal load		Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)	
Sources		2003	10	0	0	0	
Apportionment		2003	11	0	0	0	
Catch contr		2003	12	0	0	0	
Out:		2004	1	147.919400269583	5755.6910633144	1.25387393606509	
		2004	2	93.872882397096	4995.13790529677	1.315352723482	
		2004	3	205.523635492321	5703.06122735909	1.25183847788874	
Plot		2004	4	416.005544366348	3115.3509220106	1.37719636733317	
Copy		2004	5	831.899693769141	1279.20972998267	1.43444376831227	
Write file		2004	6	1211.00226013049	462.234741896997	1.09988049018105	
		2004	7	1218.87654447596	704.418823323427	1.10703222887788	
Catchment:		2004	8	1233.08660618291	1383.15169799165	1.11993837294574	
1		2004	9	1020.79910508197	2253.97936744924	1.19138953470705	
2		2004	10	646.525668730741	1931.4705872643	1.53226210323628	
3		2004	11	328.640843103401	2496.20472361395	1.68184513382496	
4		2004	12	32.7979650724724	2635.27277624793	1.82811163898022	
5		2005	1	0	0	0	
6		2005	2	0	0	0	
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Рисунок 7.9 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Шингарка

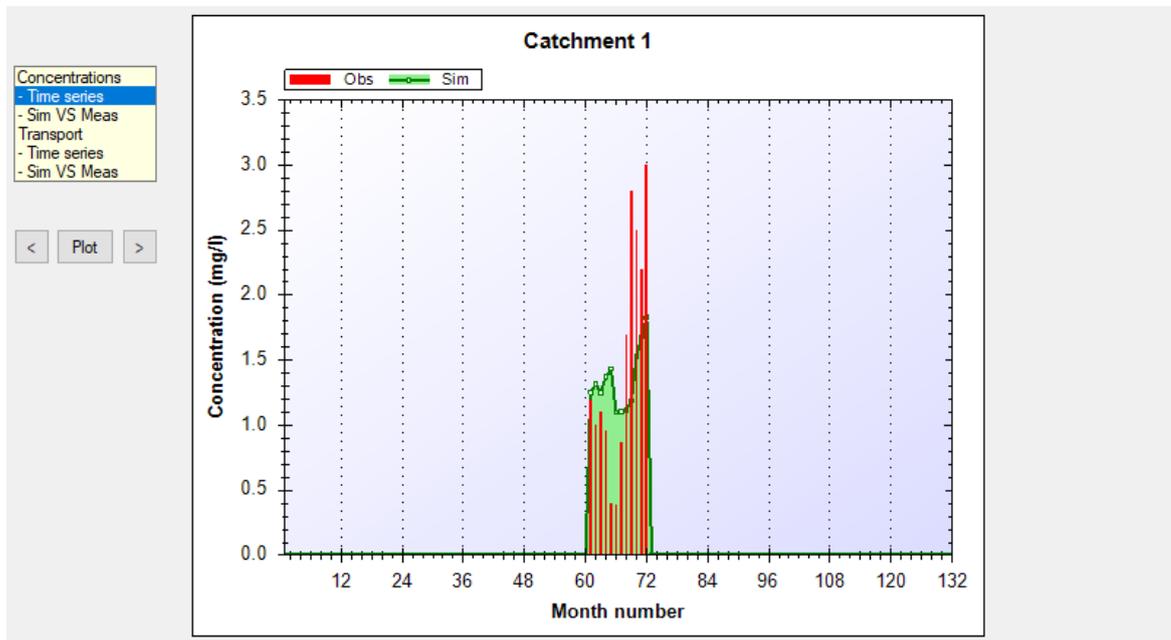


Рисунок 7.10 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактических в реке Шингарка в окне программы



Рисунок 7.11 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на реке Шингарка

Таблица 7.6 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р. Шингарка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	1.25	1.20	0.05	4.30
2020	Февраль	1.32	1.00	0.32	24.0
2020	Март	1.25	1.10	0.15	12.1
2020	Апрель	1.38	0.96	0.42	30.3
2020	Май	1.43	0.40	1.03	72.1
2020	Июнь	1.10	0.39	0.71	64.5
2020	Июль	1.11	0.87	0.24	21.4
2020	Август	1.12	1.70	-0.58	51.8
2020	Сентябрь	1.19	2.80	-1.61	135
2020	Октябрь	1.53	2.50	-0.97	63.2
2020	Ноябрь	1.68	2.20	-0.52	30.8
2020	Декабрь	1.83	3.00	-1.17	64.1
Среднее		1.35	1.51	-0.16	47.8

Таблица 7.7 – Сравнение выноса азота рекой Шингарка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. Погрешность, %
Январь	151	158	-6.8	4.5
Февраль	104	137	-32.8	31.5
Март	137	156	-18.9	13.8
Апрель	59.5	85.3	-25.8	43.5
Май	9.77	35.0	-25.3	259
Июнь	4.49	12.7	-8.17	182
Июль	15.2	19.3	-4.13	27.2
Август	57.5	37.9	19.6	34.1
Сентябрь	145	61.7	83.3	57.5
Октябрь	86.3	52.9	33.4	38.7
Ноябрь	89.4	68.3	21.1	23.6
Декабрь	118	72.2	46.3	39.1
Сумма	977	896	81.8	8.36

Menu About Current project: **Шингарка Р** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load	Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)	St ID
Sources	2003	10	0	0	0	10
Apportionment	2003	11	0	0	0	10
Catch contr	2003	12	0	0	0	10
Out: <input type="text"/>	2004	1	517.551747534612	74.2847172201402	0.0161828822543966	10
Plot	2004	2	505.85766043018	60.1675418098383	0.0158437147252466	10
Copy	2004	3	517.078065023037	73.6325767823162	0.0161625641331023	10
Write file	2004	4	481.858025400769	34.1743395756956	0.0151073755406287	10
Catchment:	2004	5	458.583983007177	12.832727044475	0.0143899979088252	10
1	2004	6	450.188839265848	5.87573965762594	0.0139812325405994	10
2	2004	7	454.124785848069	8.97421828721368	0.014103468766009	10
3	2004	8	464.765992467845	17.8262817563443	0.0144339460486228	10
4	2004	9	475.939857380749	28.0391164381556	0.0148206813111404	10
5	2004	10	465.001011340767	18.421852541896	0.0146143082413357	10
6	2004	11	468.750376844399	21.9549082144505	0.0147923586534154	10
7	2004	12	467.904025501946	21.4116948676093	0.0148534789075995	10
8	2005	1	0	0	0	10
9	2005	2	0	0	0	10
10						
11						
12						

Рисунок 7.12 – Результирующее окно FugisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Шингарка

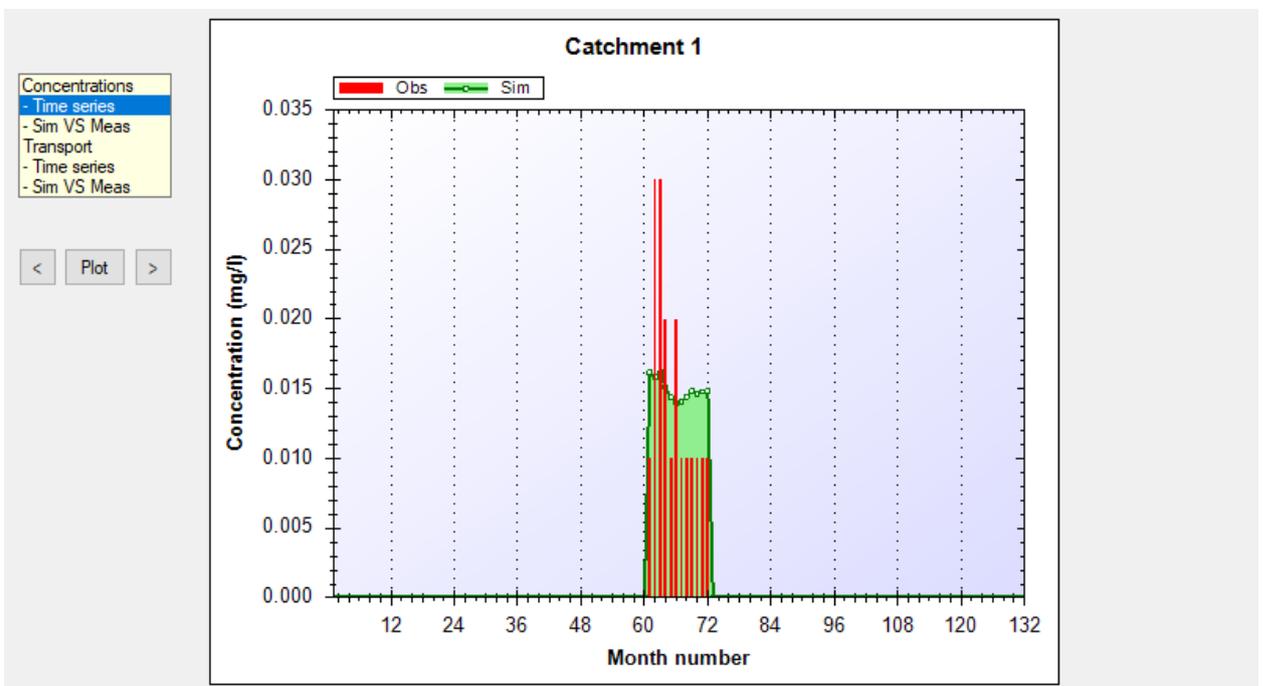


Рисунок 7.13 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфор и фактических в реке Шингарка в окне программы

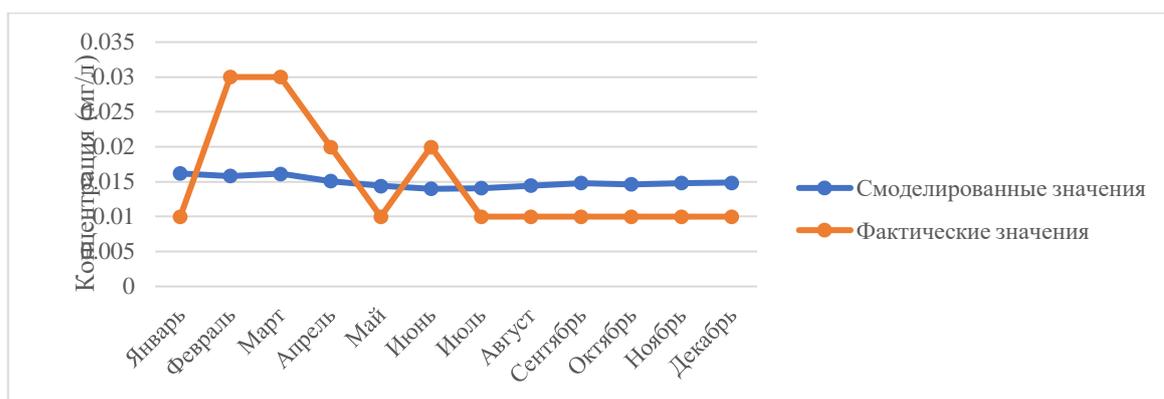


Рисунок 7.14 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных на реке Шингарка

Таблица 7.8 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р. Шингарка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.02	0.01	0.01	38.2
2020	Февраль	0.02	0.03	-0.01	89.3
2020	Март	0.02	0.03	-0.01	85.6
2020	Апрель	0.02	0.02	0.00	32.4
2020	Май	0.01	0.01	0.00	30.5
2020	Июнь	0.01	0.02	-0.01	43.0
2020	Июль	0.01	0.01	0.00	29.1
2020	Август	0.01	0.01	0.00	30.7
2020	Сентябрь	0.01	0.01	0.00	32.5
2020	Октябрь	0.01	0.01	0.00	31.6
2020	Ноябрь	0.01	0.01	0.00	32.4
2020	Декабрь	0.01	0.01	0.00	32.7
Среднее		0.01	0.02	0.00	42.3

Таблица 7.9 – Сравнение выноса фосфора рекой Шингарка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. Погрешность, %
Январь	1.26	2.03	-0.78	61.8
Февраль	3.12	1.65	1.47	47.2
Март	3.74	2.02	1.73	46.1
Апрель	1.24	0.94	0.30	24.5
Май	0.24	0.35	-0.11	43.9
Июнь	0.23	0.16	0.07	30.1
Июль	0.17	0.25	-0.07	41.0
Август	0.34	0.49	-0.15	44.3
Сентябрь	0.52	0.77	-0.25	48.2
Октябрь	0.35	0.50	-0.16	46.1
Ноябрь	0.41	0.60	-0.19	47.9
Декабрь	0.39	0.59	-0.19	48.5
Сумма	12.0	10.3	1.67	13.9

Результаты работы модели по расчету концентраций азота и общей нагрузки на реке Лебяжья представлены на рисунках 7.14 – 7.16 и в таблице 7.10 и 7.11. Результаты работы по расчету концентраций фосфора и общей нагрузки на реке Лебяжья представлены на рисунках 7.17 – 7.19 и в таблице 7.12 и 7.13.

Menu About Current project: **Лебязья N** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	408.286552152106	1452.43265669016	0.681051394793527
2004	2	433.395865590602	1275.94915341482	0.723195300956813
2004	3	414.144152039225	1461.89178174991	0.6906896827437
2004	4	522.179268652032	915.100214250449	0.870733058734345
2004	5	715.710364292714	493.993075271288	1.19231255462823
2004	6	878.789134272605	285.215391851748	1.46077509183624
2004	7	805.90137183074	396.026071450821	1.33961675734809
2004	8	678.933092399647	647.55082498783	1.12856260019836
2004	9	581.93458086739	850.923558962578	0.968103687414143
2004	10	659.008513717834	643.411188108451	1.09865427963635
2004	11	626.363632592231	721.006596780676	1.04561672765327
2004	12	608.505446100663	681.337134411981	1.01734130957239
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.14 – Результирующее окно FygisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Лебязья

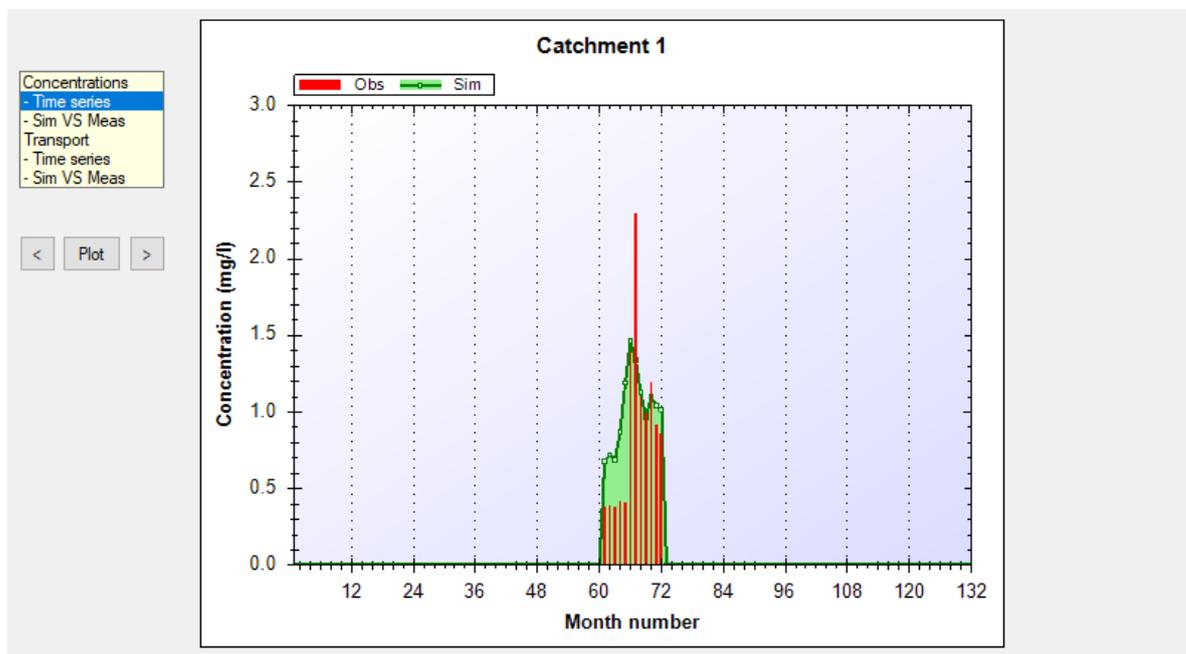


Рисунок 7.15 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактических в реке Лебязья в окне программы

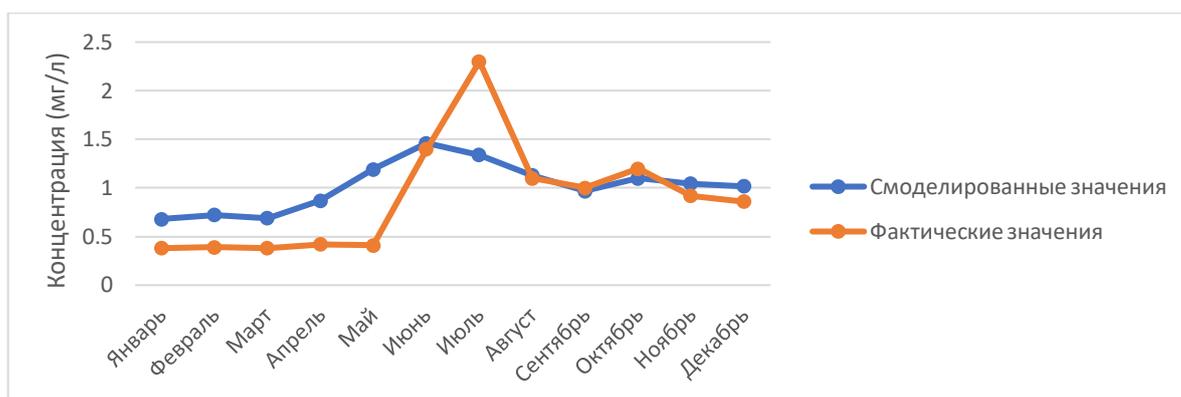


Рисунок 7.16 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на реке Лебяжья

Таблица 7.10 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р. Лебяжья)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.68	0.38	0.30	44.2
2020	Февраль	0.72	0.39	0.33	46.1
2020	Март	0.69	0.38	0.31	45.0
2020	Апрель	0.87	0.42	0.45	51.8
2020	Май	1.19	0.41	0.78	65.6
2020	Июнь	1.46	1.40	0.06	4.2
2020	Июль	1.34	2.30	-0.96	71.7
2020	Август	1.13	1.10	0.03	2.53
2020	Сентябрь	0.97	1.00	-0.03	3.29
2020	Октябрь	1.10	1.20	-0.10	9.22
2020	Ноябрь	1.05	0.92	0.13	12.0
2020	Декабрь	1.02	0.86	0.16	15.5
Среднее		1.02	0.90	0.12	30.9

Таблица 7.11 – Сравнение выноса азота рекой Лебязья, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	47.8	85.6	-37.8	79.2
Февраль	40.5	75.2	-34.6	85.4
Март	47.4	86.2	-38.8	81.8
Апрель	26.0	53.9	-27.9	107
Май	10.0	29.1	-19.1	191
Июнь	16.1	16.8	-0.70	4.34
Июль	40.1	23.3	16.7	41.8
Август	37.2	38.2	-0.97	2.60
Сентябрь	51.8	50.1	1.65	3.19
Октябрь	41.4	37.9	3.50	8.45
Ноябрь	37.4	42.5	-5.10	13.7
Декабрь	33.9	40.2	-6.21	18.3
Сумма	430	579	-149	-34.8

Menu About Current project: **Лебязь Р** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load Sources Apportionment Catch contr Out: Plot Copy Write file Catchment: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	358.079166228757	60.7433967771006	0.0284828180563046
2004	2	366.244023490941	51.3987102057037	0.0291322781919047
2004	3	358.425783365625	60.3441815166594	0.0285103891460962
2004	4	383.464482070702	32.0562465598956	0.0305020512332663
2004	5	400.621671161251	13.2028924160645	0.0318667916072193
2004	6	406.966971958626	6.32051797462648	0.0323715181179169
2004	7	404.02970076762	9.50080490271439	0.0321378777143251
2004	8	396.150313726078	18.0805698162865	0.0315111248376831
2004	9	387.921631626085	27.1216791144882	0.0308565878603837
2004	10	395.822804738338	18.4387837337566	0.0314850736741714
2004	11	392.979153362857	21.5546080771742	0.0312588801047538
2004	12	393.517919609371	20.9635001398022	0.0313017353792896
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.17 – Результирующее окно FygisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Лебязь

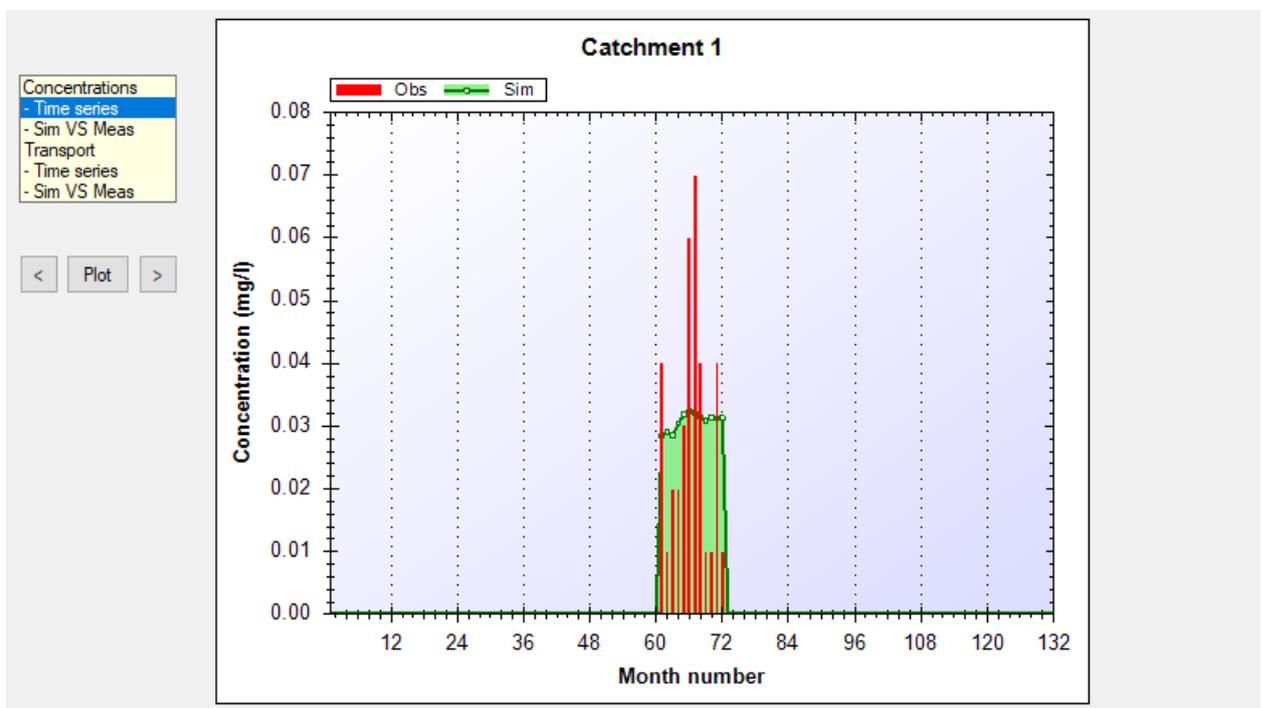


Рисунок 7.18 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактических в реке Лебязь в окне программы

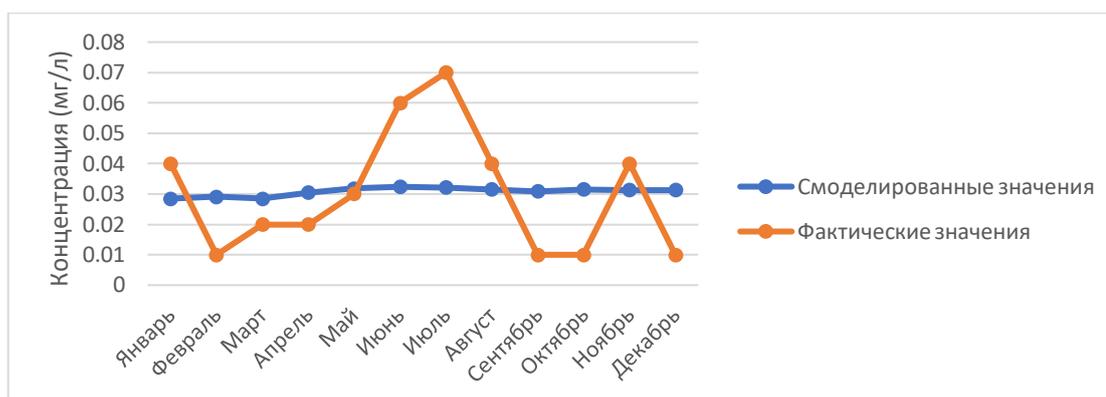


Рисунок 7.19 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных на реке Лебязья

Таблица 7.12 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р.Лебязья)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.03	0.04	-0.01	40.4
2020	Февраль	0.03	0.01	0.02	65.7
2020	Март	0.03	0.02	0.01	29.9
2020	Апрель	0.03	0.02	0.01	34.4
2020	Май	0.03	0.03	0.00	5.86
2020	Июнь	0.03	0.06	-0.03	85.3
2020	Июль	0.03	0.07	-0.04	118
2020	Август	0.03	0.04	-0.01	26.9
2020	Сентябрь	0.03	0.01	0.02	67.6
2020	Октябрь	0.03	0.01	0.02	68.2
2020	Ноябрь	0.03	0.04	-0.01	28.0
2020	Декабрь	0.03	0.01	0.02	68.1
Среднее		0.03	0.03	0.00	53.2

Таблица 7.13 – Сравнение выноса фосфора рекой Лебязья, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	5.03	3.58	1.45	28.8
Февраль	1.04	3.03	-1.99	191
Март	2.49	3.56	-1.06	42.6
Апрель	1.24	1.89	-0.65	52.5
Май	0.73	0.78	-0.05	6.22
Июнь	0.69	0.37	0.32	46.0
Июль	1.22	0.56	0.66	54.1
Август	1.35	1.07	0.29	21.2
Сентябрь	0.52	1.60	-1.08	209
Октябрь	0.35	1.09	-0.74	215
Ноябрь	1.63	1.27	0.36	21.9
Декабрь	0.39	1.24	-0.84	213
Сумма	16.7	20.0	-3.34	-20.0

Результаты работы модели по расчету концентраций азота и общей нагрузки на реке Воронка представлены на рисунках 7.20 – 7.22 и в таблице 7.14 и 7.15. Результаты работы по расчету концентраций фосфора и общей нагрузки на реке Воронка представлены на рисунках 7.23 – 7.25 и в таблице 7.16 и 7.17.

Menu		About		Current project: Воронка N			Catchment overview
General		Data	Q-data	Calibration	Scenario	Result	
Internal load		Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)	
Sources		2003	10	0	0	0	
Apportionment		2003	11	0	0	0	
Catch contr		2003	12	0	0	0	
Out:	<input type="text"/>	2004	1	42.2801155529864	3954.85796423978	0.87449885904412	
		2004	2	27.908039619083	3475.50037925805	0.928932254071215	
		2004	3	58.9481794466546	3951.97580598287	0.880494192994112	
		2004	4	130.209634608771	2236.79175004991	1.00365950873732	
		2004	5	255.368031324605	884.827814992249	1.007099770768	
		2004	6	277.419093665593	285.591576461572	0.689763588134474	
		2004	7	318.622132418778	496.636445926332	0.792209153351049	
		2004	8	361.455457766744	1093.50918462648	0.898708197066322	
		2004	9	305.072849754372	1723.5088378017	0.924675425901046	
		2004	10	222.014927193889	1465.1829898575	1.17980107129775	
		2004	11	121.128404429346	1934.44097323979	1.32291896168969	
		2004	12	12.5032478678984	1983.26107045507	1.39646154856985	
		2005	1	0	0	0	
		2005	2	0	0	0	

Рисунок 7.20 – Результирующее окно FygisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Воронка

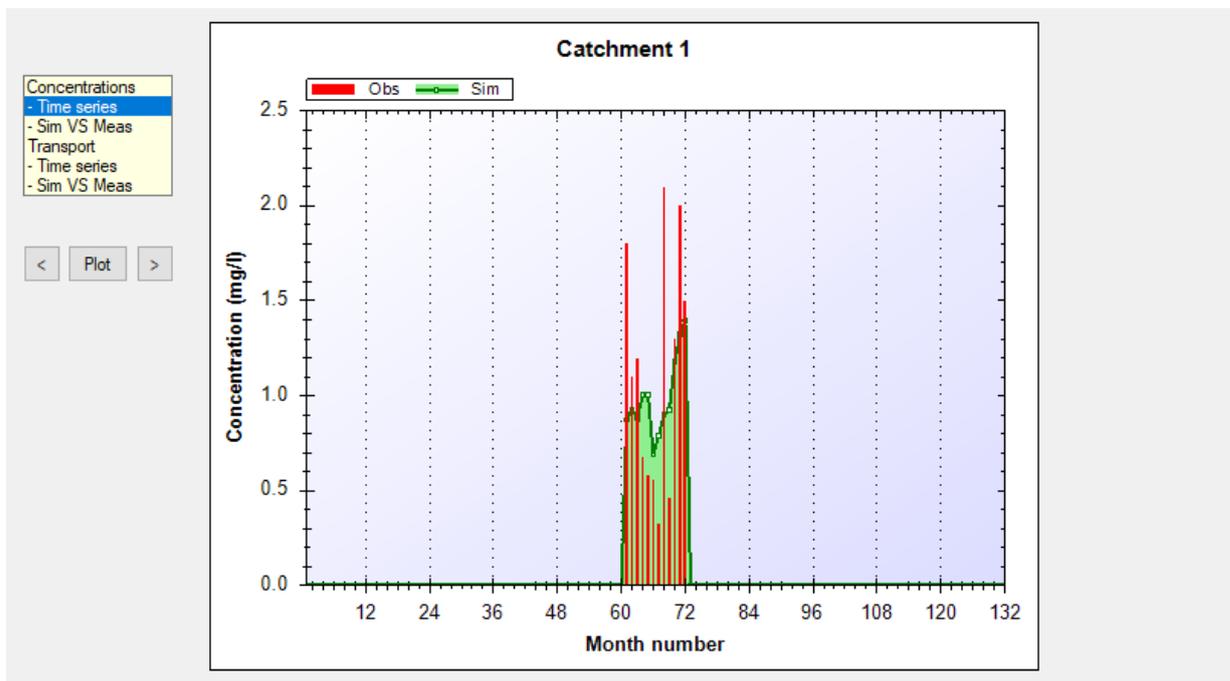


Рисунок 7.21 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактических в реке Воронка в окне программы

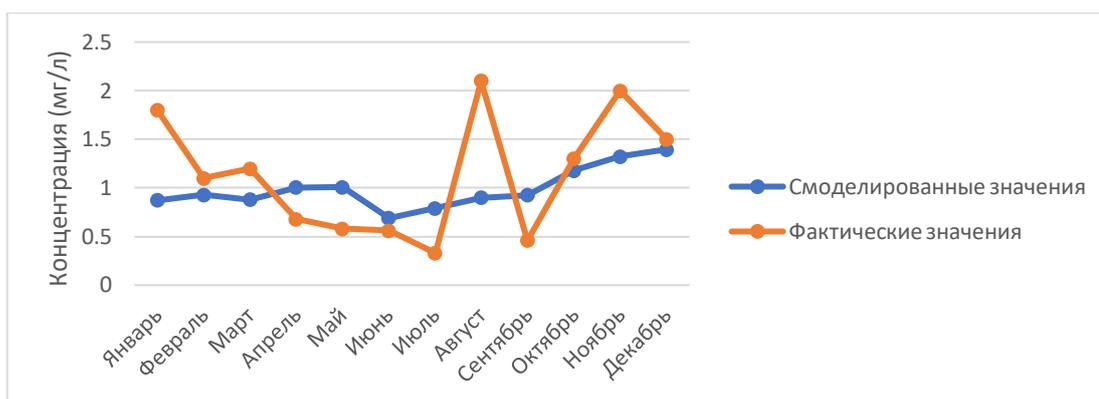


Рисунок 7.22. График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на реке Воронка

Таблица 7.14 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р.Воронка)

Год	Месяц	Расчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.87	1.80	-0.93	106
2020	Февраль	0.93	1.10	-0.17	18.4
2020	Март	0.88	1.20	-0.32	36.3
2020	Апрель	1.00	0.68	0.32	32.2
2020	Май	1.01	0.58	0.43	42.4
2020	Июнь	0.69	0.56	0.13	18.8
2020	Июль	0.79	0.33	0.46	58.3
2020	Август	0.90	2.10	-1.20	134
2020	Сентябрь	0.92	0.46	0.46	50.3
2020	Октябрь	1.18	1.30	-0.12	10.2
2020	Ноябрь	1.32	2.00	-0.68	51.2
2020	Декабрь	1.40	1.50	-0.10	7.41
Среднее		0.99	1.13	-0.14	47.1

Таблица 7.15 – Сравнение выноса азота рекой Воронка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	226	109	117	51.7
Февраль	114	96.7	17.7	15.5
Март	150	110	39.9	26.7
Апрель	42.1	61.9	-19.8	47.1
Май	14.2	24.7	-10.5	74.1
Июнь	6.44	7.94	-1.50	23.2
Июль	5.75	13.8	-8.01	139
Август	71.0	30.4	40.6	57.1
Сентябрь	23.8	47.7	-23.8	100
Октябрь	44.9	40.7	4.14	9.23
Ноябрь	81.3	53.6	27.6	34.0
Декабрь	59.2	55.3	3.95	6.67
Сумма	839	652	187	22.3

Menu About Current project: **Воронка P** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load Sources Apportionment Catch contr Out: Plot Copy Write file Catchment: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	71.6201772070257	199.77472017634	0.0441742197671188
2004	2	73.6461297668391	178.982407527198	0.0478384442872156
2004	3	72.1315053115046	194.727258004046	0.0433849366260448
2004	4	76.5487608937677	102.323654643256	0.0459131293510747
2004	5	57.2649495094299	27.4044950065192	0.0311914478404142
2004	6	23.7266888226923	3.96579366239827	0.00957822391076321
2004	7	32.451054164003	8.21250016815127	0.0131001618154934
2004	8	49.3807446463203	24.2554433803874	0.0199345063543093
2004	9	65.2556157507443	54.4396934197502	0.0292073040733788
2004	10	69.3754229159044	51.0368297182399	0.0410960998005285
2004	11	77.2791623395976	78.7504913042916	0.0538556201145518
2004	12	80.9819587383573	96.9322068510101	0.068252284937149
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.23 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Воронка

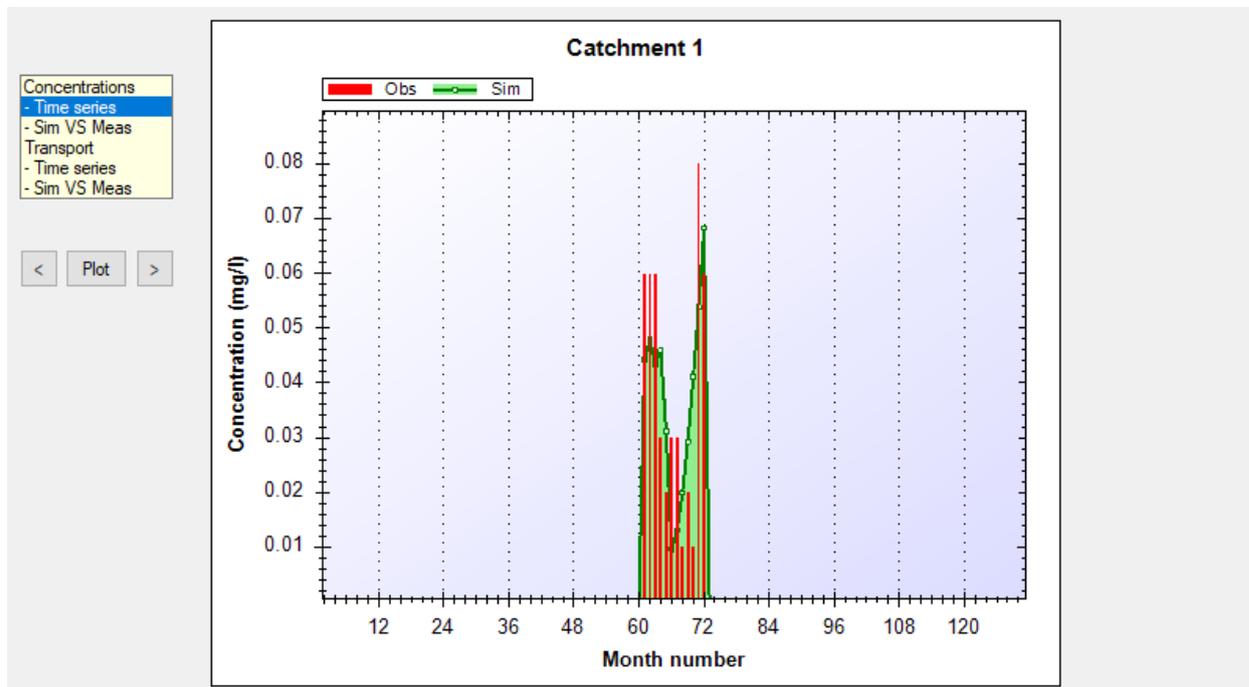


Рисунок 7.24 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактических в реке Воронка в окне программы

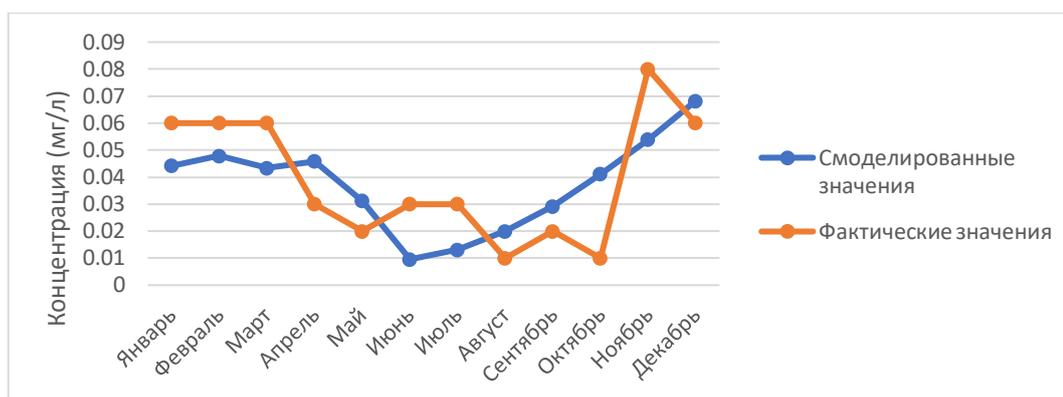


Рисунок 7.25 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфор и фактически измеренных на реке Воронка

Таблица 7.16 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р.Воронка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.04	0.06	-0.02	35.8
2020	Февраль	0.05	0.06	-0.01	25.4
2020	Март	0.04	0.06	-0.02	38.3
2020	Апрель	0.05	0.03	0.02	34.7
2020	Май	0.03	0.02	0.01	35.9
2020	Июнь	0.01	0.03	-0.02	213
2020	Июль	0.01	0.03	-0.02	129
2020	Август	0.02	0.01	0.01	49.8
2020	Сентябрь	0.03	0.02	0.01	31.5
2020	Октябрь	0.04	0.01	0.03	75.7
2020	Ноябрь	0.05	0.08	-0.03	48.5
2020	Декабрь	0.07	0.06	0.01	12.1
Среднее		0.04	0.04	0.00	60.8

Таблица 7.17 – Сравнение выноса фосфора рекой Воронка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	7.54	5.03	3	33.3
Февраль	6.24	5.20	1.0	16.7
Март	7.48	4.99	2.5	33.3
Апрель	1.86	3.10	-1.2	66.7
Май	0.49	0.73	-0.2	50.0
Июнь	0.35	0.12	0.23	66.7
Июль	0.52	0.17	0.35	66.7
Август	0.34	0.68	-0.3	100
Сентябрь	1.04	1.55	-0.5	50.0
Октябрь	0.35	1.38	-1.04	300
Ноябрь	3.25	2.03	1.2	37.5
Декабрь	2.37	2.76	-0.39	16.7
Сумма	31.8	27.7	4.08	12.8

Результаты работы модели по расчету концентраций азота на реке Черная представлены на рисунках 7.26 – 7.28 и в таблице 7.18 и 7.19. Результаты работы по расчету концентраций фосфора на реке Черная представлены на рисунках 7.29 – 7.31 и в таблице 7.20 и 7.21.

Menu About Current project: **Черная N** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load	Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
Sources	2003	10	0	0	0
Apportionment	2003	11	0	0	0
Catch contr	2003	12	0	0	0
Out:	2004	1	124.197440674844	2419.85283436964	0.646754446530585
Plot	2004	2	109.725729498682	2091.63105410675	0.67573108136615
Copy	2004	3	143.810513388	2443.52082345829	0.658037093327568
Write file	2004	4	214.757635839878	1351.76194974421	0.73313369585761
Catchment:	2004	5	367.638632027601	589.009023304747	0.810322299820031
1	2004	6	559.31246989046	264.304304001763	0.771580455719538
2	2004	7	559.180751831466	400.088021757363	0.771398748560379
3	2004	8	558.95573731612	776.221655465542	0.771088337454534
4	2004	9	445.947667490033	1143.58443212595	0.741593898381263
5	2004	10	324.086733108073	921.790478969904	0.897162780482596
6	2004	11	213.265249138567	1154.35871551415	0.954202735517726
7	2004	12	99.0973419041256	1083.79549970452	0.922398419532772
8	2005	1	0	0	0
9	2005	2	0	0	0
10					
11					
12					

Рисунок 7.26 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Черная

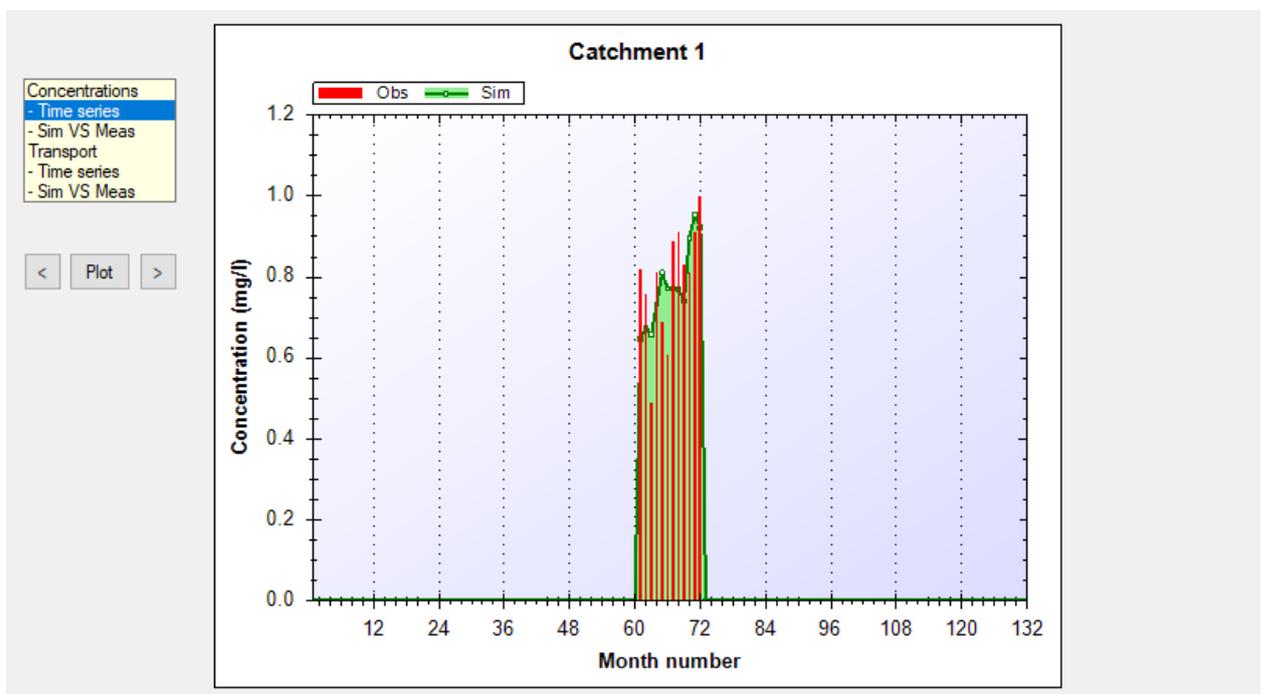


Рисунок 7.27 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактических в реке Черная в окне программы

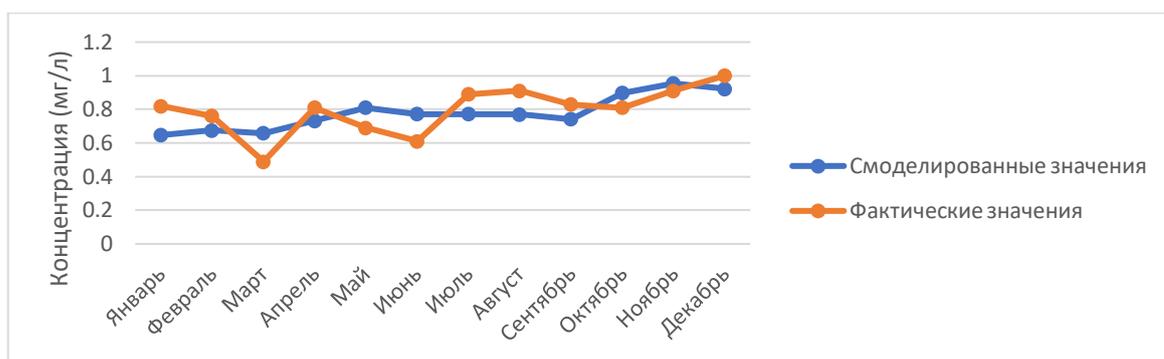


Рисунок 7.28 – График-сравнение смоделированных концентраций азот и фактически измеренных на реке Черная

Таблица 7.18 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р.Черная)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.65	0.82	-0.17	26.8
2020	Февраль	0.68	0.76	-0.08	12.5
2020	Март	0.66	0.49	0.17	25.5
2020	Апрель	0.73	0.81	-0.08	10.5
2020	Май	0.81	0.69	0.12	14.8
2020	Июнь	0.77	0.61	0.16	20.9
2020	Июль	0.77	0.89	-0.12	15.4
2020	Август	0.77	0.91	-0.14	18.0
2020	Сентябрь	0.74	0.83	-0.09	11.9
2020	Октябрь	0.90	0.81	0.09	9.72
2020	Ноябрь	0.95	0.91	0.04	4.63
2020	Декабрь	0.92	1.00	-0.08	8.41
Среднее		0.78	0.79	-0.01	14.9

Таблица 7.19 – Сравнение выноса азот рекой Черная, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	103	81.3	21.8	21.1
Февраль	79.0	70.3	8.76	11.1
Март	61.1	82.1	-21.0	34.3
Апрель	50.2	45.4	4.76	9.49
Май	16.8	19.8	-2.94	17.4
Июнь	7.02	8.88	-1.86	26.5
Июль	15.5	13.4	2.07	13.3
Август	30.8	26.1	4.70	15.3
Сентябрь	43.0	38.4	4.58	10.7
Октябрь	28.0	31.0	-3.01	10.8
Ноябрь	37.0	38.8	-1.80	4.86
Декабрь	39.5	36.4	3.06	7.76
Сумма	511	492	19.1	3.75

Menu About Current project: **Черная P** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load	Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)	
Sources	2003	10	0	0	0	1
Apportionment	2003	11	0	0	0	1
Catch contr	2003	12	0	0	0	1
Out:	2004	1	107.095447059576	141.36712576741	0.0377832138734742	1
Plot	2004	2	115.478379494052	126.107162818894	0.0407407077516452	1
Copy	2004	3	107.426580064388	140.73603382909	0.0379000374125216	1
Write file	2004	4	138.301229742082	89.9644578311502	0.0487925965648448	1
Catchment:	2004	5	172.215040478356	44.1634633452766	0.0607573700402321	1
1	2004	6	189.399054911071	22.889099819263	0.0668198807289915	1
2	2004	7	181.03628649148	33.1260871695529	0.0638695007040032	1
3	2004	8	161.86870384326	57.4873643588016	0.0571071882573098	1
4	2004	9	145.756842803269	79.2973963279942	0.0514229326863421	1
5	2004	10	161.159591104011	58.4177754720721	0.0568570136791827	1
6	2004	11	155.254492620127	66.2631677566233	0.0547736982340692	1
7	2004	12	156.339791026307	64.8076403171271	0.0551565909052622	1
8	2005	1	0	0	0	1
9	2005	2	0	0	0	1
10						
11						
12						

Рисунок 7.29 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Черная

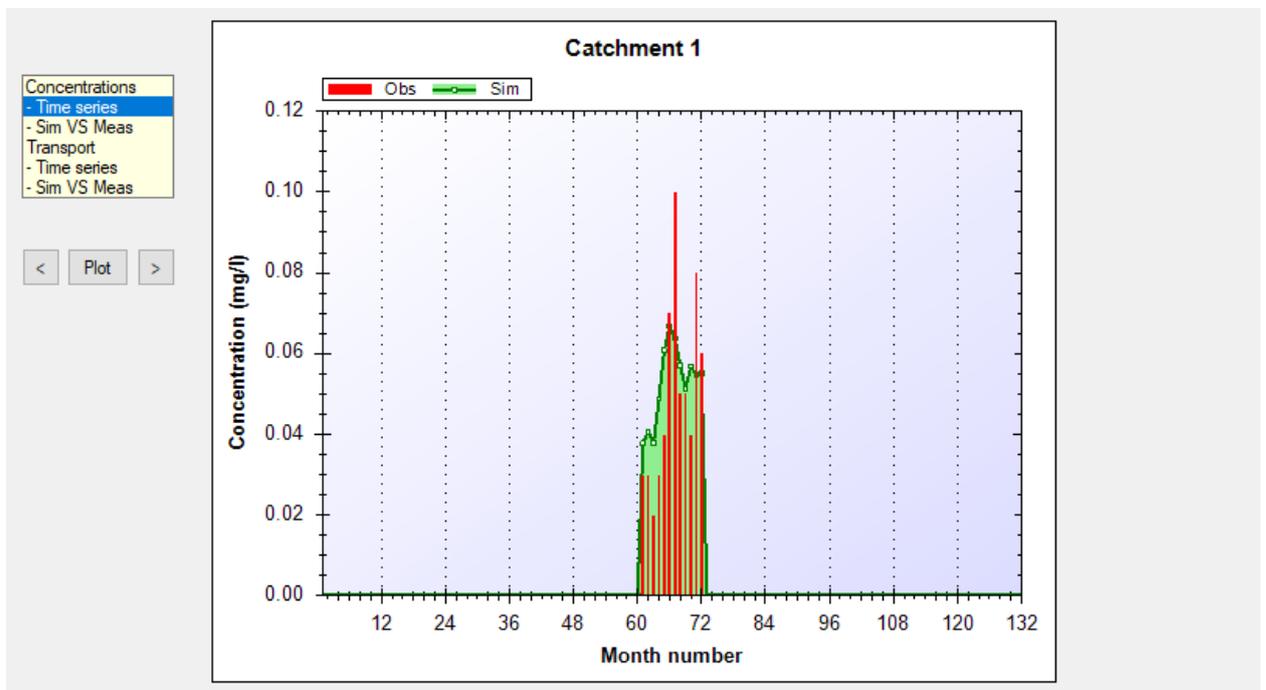


Рисунок 7.30 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Черная

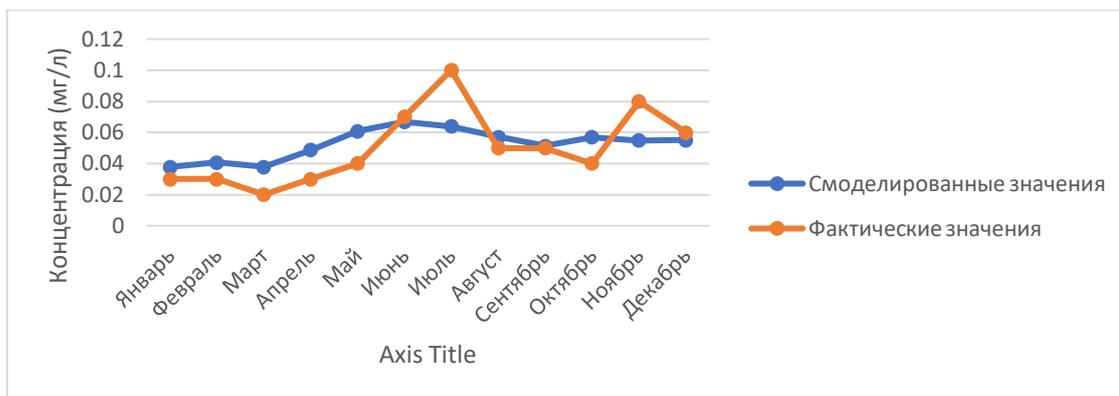


Рисунок 7.31 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфор и фактически измеренных на реке Черная

Таблица 7.20 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р.Черная)

Год	Месяц	Расчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.04	0.03	0.01	20.6
2020	Февраль	0.04	0.03	0.01	26.4
2020	Март	0.04	0.02	0.02	47.2
2020	Апрель	0.05	0.03	0.02	38.5
2020	Май	0.06	0.04	0.02	34.2
2020	Июнь	0.07	0.07	0.00	4.76
2020	Июль	0.06	0.10	-0.04	56.6
2020	Август	0.06	0.05	0.01	12.4
2020	Сентябрь	0.05	0.05	0.00	2.77
2020	Октябрь	0.06	0.04	0.02	29.6
2020	Ноябрь	0.05	0.08	-0.03	46.1
2020	Декабрь	0.06	0.06	0.00	8.78
Среднее		0.05	0.05	0.00	27.3

Таблица 7.21 – Сравнение выноса фосфора рекой Черная, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	3.77	4.75	-0.98	25.9
Февраль	3.12	4.24	-1.12	35.8
Март	2.49	4.73	-2.23	89.5
Апрель	1.86	3.02	-1.16	62.6
Май	0.98	1.48	-0.51	51.9
Июнь	0.81	0.77	0.04	4.54
Июль	1.74	1.11	0.63	36.1
Август	1.69	1.93	-0.24	14.2
Сентябрь	2.59	2.66	-0.07	2.846
Октябрь	1.38	1.96	-0.58	42.1
Ноябрь	3.25	2.23	1.03	31.5
Декабрь	2.37	2.18	0.19	8.07
Сумма	26.0	31.1	-5.01	-19.2

Результаты работы модели по расчету концентраций азота и общей нагрузки на реке Хаболовка представлены на рисунках 7.32 – 7.34 и в таблице 7.22 и 7.23. Результаты работы по расчету концентраций фосфора и общей нагрузки на реке Хаболовка представлены на рисунках 7.35 – 7.37 и в таблице 7.24 и 7.25.

Menu About Current project: **Хаболовка N** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load	Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)	
Sources	2003	10	0	0	0	1
Apportionment	2003	11	0	0	0	1
Catch contr	2003	12	0	0	0	1
Out:	2004	1	11.7119186983468	2040.44575065626	0.678989272673345	1
Plot	2004	2	7.42502097252464	1706.78343354847	0.686522262365563	1
Copy	2004	3	16.5057083945417	2064.40763077984	0.692177022597478	1
Write file	2004	4	32.3157852357274	1017.59023903702	0.68713692573262	1
Catchment:	2004	5	57.7124424044937	364.23454156231	0.623884740603802	1
1	2004	6	84.7526458839067	168.330052786297	0.611823331317886	1
2	2004	7	91.9288309437208	276.448179181018	0.663627701596346	1
3	2004	8	103.282440629583	602.828101950919	0.745588603560427	1
4	2004	9	84.0184746511306	901.697526183568	0.728024816061019	1
5	2004	10	53.3733846725526	636.959642323527	0.771859650227661	1
6	2004	11	28.3787925700727	804.214349913863	0.827673558116182	1
7	2004	12	2.5486953842352	698.896362716431	0.740578975977648	1
8	2005	1	0	0	0	1
9	2005	2	0	0	0	1
10						
11						
12						

Рисунок 7.32 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Хаболовка

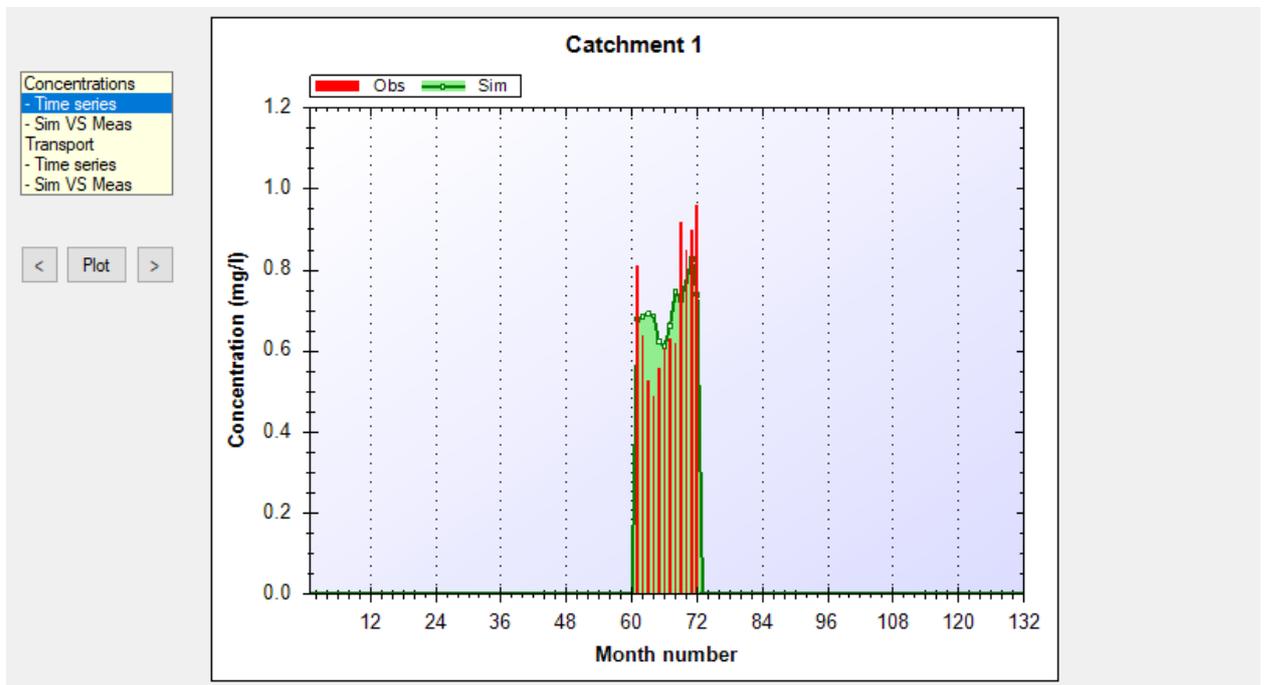


Рисунок 7.33 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Хаболовка

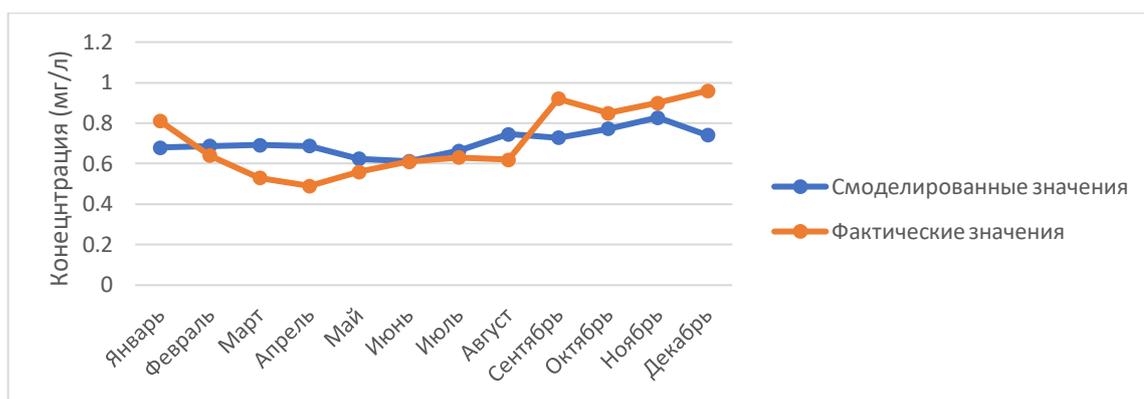


Рисунок 7.34 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на реке Хаболовка

Таблица 7.22 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р.Хаболовка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.68	0.81	-0.13	19.3
2020	Февраль	0.69	0.64	0.05	6.78
2020	Март	0.69	0.53	0.16	23.4
2020	Апрель	0.69	0.49	0.20	28.7
2020	Май	0.62	0.56	0.06	10.2
2020	Июнь	0.61	0.61	0.00	0.30
2020	Июль	0.66	0.63	0.03	5.07
2020	Август	0.75	0.62	0.13	16.8
2020	Сентябрь	0.73	0.92	-0.19	26.4
2020	Октябрь	0.77	0.85	-0.08	10.1
2020	Ноябрь	0.83	0.90	-0.07	8.74
2020	Декабрь	0.74	0.96	-0.22	29.6
Среднее		0.70	0.71	-0.01	15.5

Таблица 7.23 – Сравнение выноса азота рекой Хаболовка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	102	85.3	16.5	16.2
Февраль	66.5	71.4	-4.84	7.27
Март	66.1	86.3	-20.2	30.6
Апрель	30.3	42.6	-12.2	40.2
Май	13.7	15.2	-1.56	11.4
Июнь	7.0	7.0	-0.02	0.30
Июль	11.0	11.6	-0.59	5.34
Август	21.0	25.2	-4.25	20.3
Сентябрь	47.7	37.7	9.94	20.9
Октябрь	29.3	26.6	2.70	9.19
Ноябрь	36.6	33.6	2.94	8.04
Декабрь	37.9	29.2	8.66	22.86
Сумма	469	472	-2.98	0.64

Menu About Current project: **Хаболовка P** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load Sources Apportionment Catch contr Out: Plot Copy Write file

Catchment: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	3.93835784616885	60.559869128608	0.0201522150145875
2004	2	3.88058757847474	54.3695636904234	0.0218691575831481
2004	3	4.21937374654478	59.7310211249957	0.0200272658086371
2004	4	6.46187308740778	37.9429952314213	0.0256213474699592
2004	5	12.0261838134296	20.3154254465287	0.0347975891594433
2004	6	18.0383388512803	10.1014273579716	0.0367153032683117
2004	7	15.9696157237715	13.5404866159527	0.0325046163735333
2004	8	12.7245838081744	20.9405649301327	0.0258996661129366
2004	9	10.0413862508078	29.2060180911303	0.0235807522270404
2004	10	9.34378981637477	26.4337730235967	0.0320321123105433
2004	11	6.85133063582514	31.797390484684	0.0327249312625259
2004	12	4.97723686311318	34.4352266803081	0.0364889649923788
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.35 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Хаболовка

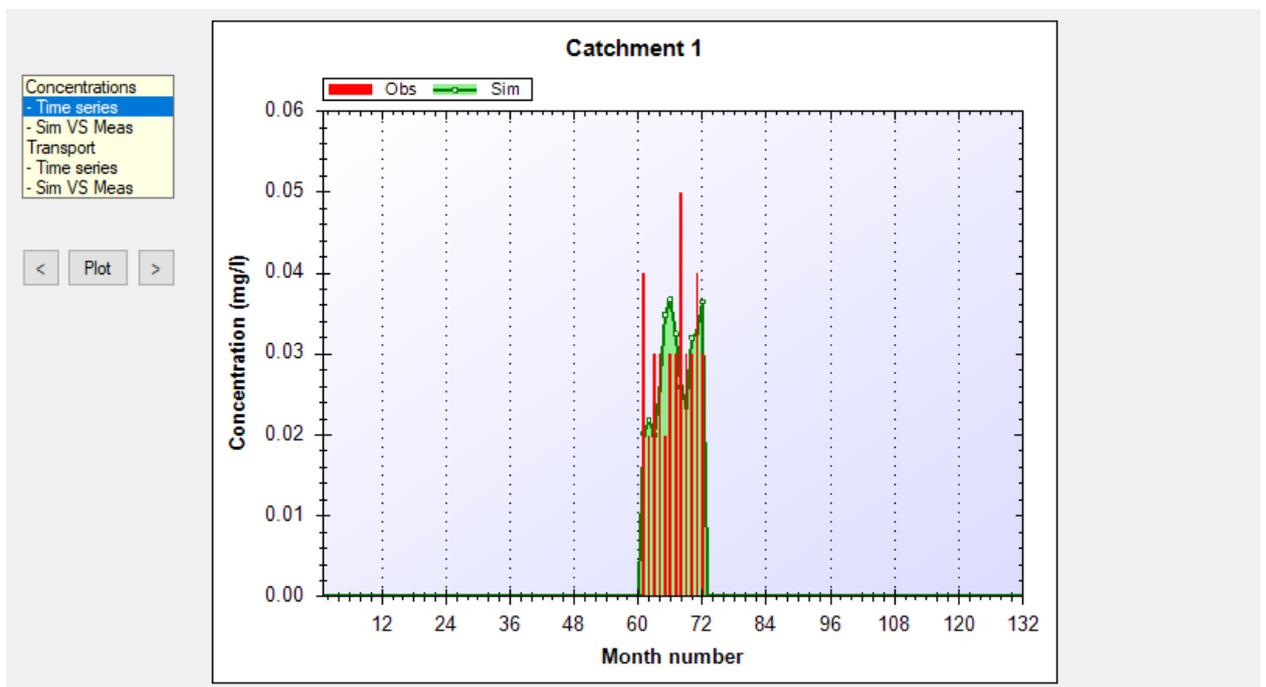


Рисунок 7.36 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Хаболовка

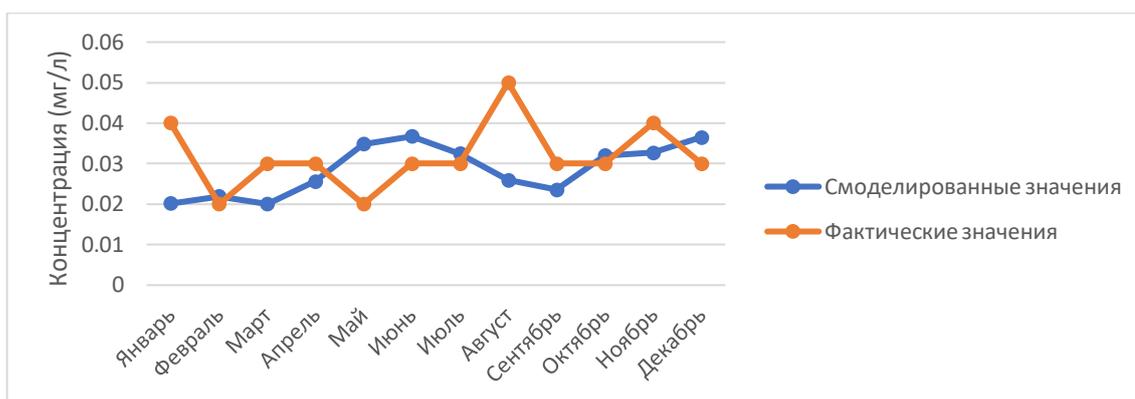


Рисунок 7.37 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных на реке Хаболовка

Таблица 7.24 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р.Хаболовка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.02	0.04	-0.02	98.5
2020	Февраль	0.02	0.02	0.00	8.55
2020	Март	0.02	0.03	-0.01	49.8
2020	Апрель	0.03	0.03	0.00	17.1
2020	Май	0.03	0.02	0.01	42.5
2020	Июнь	0.04	0.03	0.01	18.3
2020	Июль	0.03	0.03	0.00	7.71
2020	Август	0.03	0.05	-0.02	93.1
2020	Сентябрь	0.02	0.03	-0.01	27.2
2020	Октябрь	0.03	0.03	0.00	6.34
2020	Ноябрь	0.03	0.04	-0.01	22.2
2020	Декабрь	0.04	0.03	0.01	17.8
Среднее		0.03	0.03	0.00	34.09

Таблица 7.25 – Сравнение выноса фосфора рекой Хаболовка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	5.03	2.53	2.49	49.6
Февраль	2.08	2.27	-0.19	9.3
Март	3.74	2.50	1.24	33.2
Апрель	1.86	1.59	0.27	14.6
Май	0.49	0.85	-0.36	74.0
Июнь	0.35	0.42	-0.08	22.4
Июль	0.52	0.57	-0.04	8.35
Август	1.69	0.88	0.81	48.2
Сентябрь	1.55	1.22	0.33	21.4
Октябрь	1.04	1.11	-0.07	6.77
Ноябрь	1.63	1.33	0.30	18.2
Декабрь	1.18	1.44	-0.26	21.63
Сумма	21.2	16.7	4.45	21.0

Результаты работы модели по расчету концентраций азота и общей нагрузки на реке Караста представлены на рисунках 7.38 – 7.40 и в таблице 7.26 и 7.27. Результаты работы по расчету концентраций фосфора и общей нагрузки на реке Караста представлены на рисунках 7.41 – 7.43 и в таблице 7.28 и 7.29.

Menu About Current project: **Караста N** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load Sources Apportionment Catch contr Out: Plot Copy Write file

Catchment: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	6678.11988858596	2306.03323521084	1.09264038057994
2004	2	6823.68835681812	1965.19111320736	1.12552416023123
2004	3	6705.94141467802	2293.82188798492	1.09510368270762
2004	4	7186.24294294365	1236.39873463454	1.1887833976495
2004	5	7563.94571666485	513.901458846466	1.2533631134922
2004	6	7756.24307612099	236.171271343944	1.22226469235138
2004	7	7708.46680956612	355.38350421638	1.21473588708197
2004	8	7583.24645486097	678.561836092517	1.19500308386555
2004	9	7385.58698780622	1026.32790028903	1.17990017212714
2004	10	7499.32644369894	726.222683555728	1.25305477596237
2004	11	7427.36897442245	864.204024443685	1.26641886530798
2004	12	7353.8038339521	854.734368566644	1.28962543468871
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.38 – Результирующее окно FygisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Караста

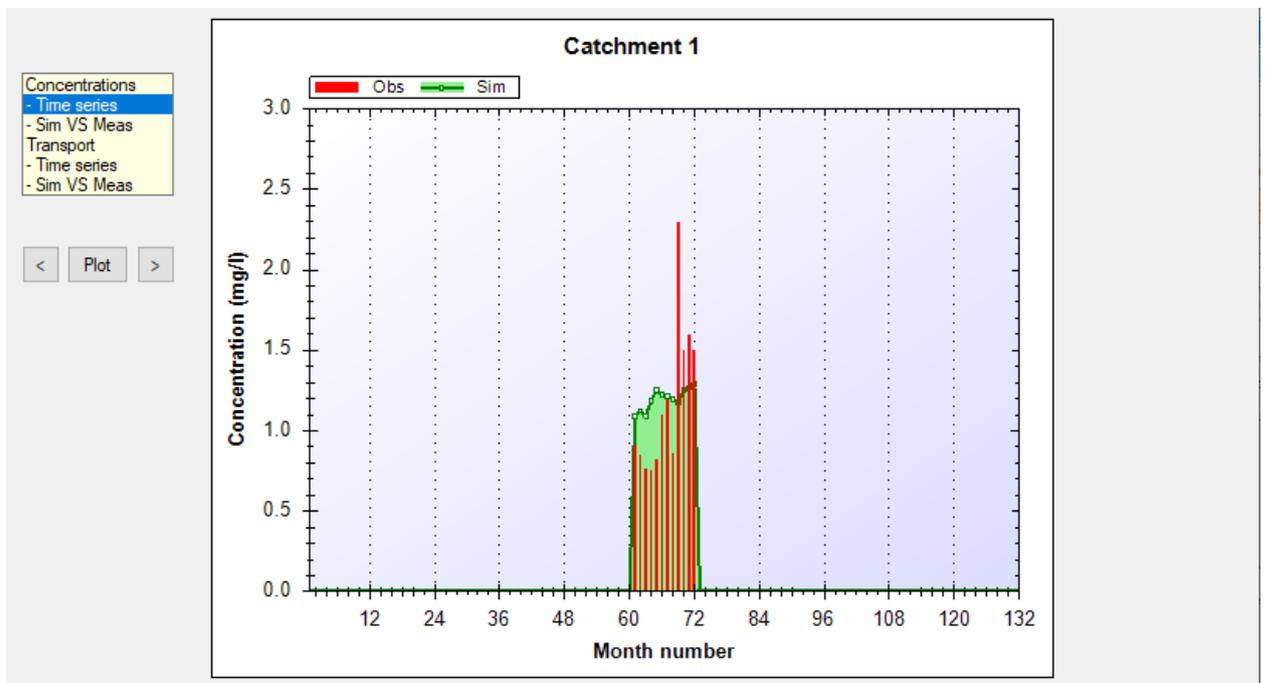


Рисунок 7.39 – Результирующее окно FygisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Караста

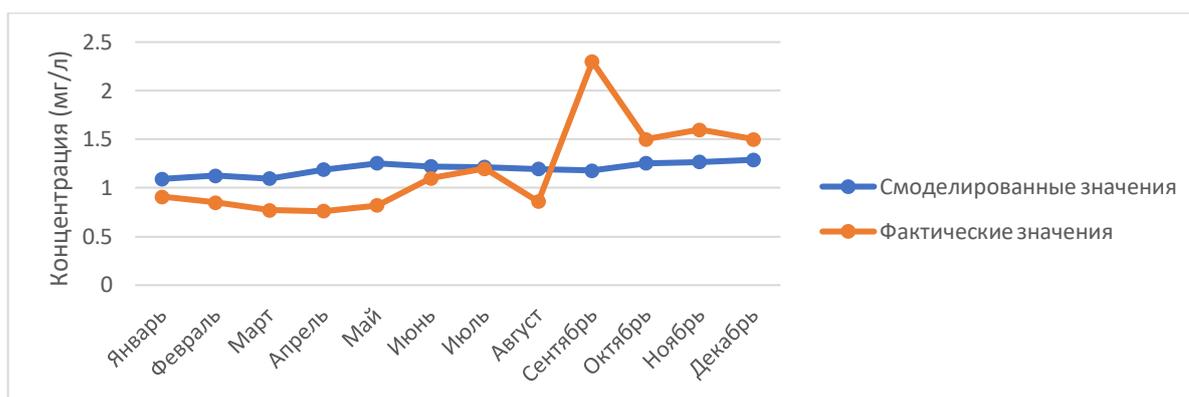


Рисунок 7.40 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на реке Караста

Таблица 6.26 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р.Караста)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	1.09	0.91	0.18	16.7
2020	Февраль	1.13	0.85	0.28	24.5
2020	Март	1.10	0.77	0.33	29.7
2020	Апрель	1.19	0.76	0.43	36.1
2020	Май	1.25	0.82	0.43	34.6
2020	Июнь	1.22	1.10	0.12	10.0
2020	Июль	1.21	1.20	0.01	1.21
2020	Август	1.20	0.86	0.34	28.0
2020	Сентябрь	1.18	2.30	-1.12	94.9
2020	Октябрь	1.25	1.50	-0.25	19.7
2020	Ноябрь	1.27	1.60	-0.33	26.3
2020	Декабрь	1.29	1.50	-0.21	16.3
Среднее		1.20	1.18	0.02	28.2

Таблица 7.27 – Сравнение выноса азота рекой Караста, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	114	137	-23.0	20.1
Февраль	88.4	117	-28.6	32.4
Март	96.0	137	-40.6	42.2
Апрель	47.1	73.6	-26.6	56.4
Май	20.0	30.6	-10.6	52.8
Июнь	12.7	14.1	-1.41	11.1
Июль	20.9	21.2	-0.26	1.23
Август	29.1	40.4	-11.3	39.0
Сентябрь	119.1	61.1	58.0	48.7
Октябрь	51.8	43.2	8.52	16.5
Ноябрь	65.0	51.5	13.6	20.8
Декабрь	59.2	50.9	8.30	14.0
Сумма	724	778	-53.9	7.45

Menu About Current project: **Караста P** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load Sources Apportionment Catch contr Out: Plot Copy Write file

Catchment: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)	Station ID
3	10	0	0	0	10
3	11	0	0	0	10
3	12	0	0	0	10
4	1	2858.39301033082	108.20511233846	0.0512695451743482	10
4	2	2871.54459204328	89.9296820511185	0.0515054384228565	10
4	3	2858.96319272355	107.411440439488	0.0512797722466353	10
4	4	2897.49751126484	54.0525784615639	0.0519709427673003	10
4	5	2921.20993044501	21.483410806827	0.0523962603992551	10
4	6	2929.49281841921	10.1529386566298	0.0525448263583913	10
4	7	2925.68960263287	15.3525731410548	0.0524766100064544	10
4	8	2915.22051759534	29.6913086502595	0.052288831339796	10
4	9	2903.85164807543	45.3056973568884	0.0520849136953975	10
4	10	2914.77671255421	30.2999958096349	0.0522808710339453	10
4	11	2910.89343034143	35.6289269264129	0.0522112185711407	10
4	12	2911.6333095924	34.6132022359191	0.0522244894098755	10
5	1	0	0	0	10
5	2	0	0	0	10

Рисунок 7.41 – Результирующее окно FygisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Караста

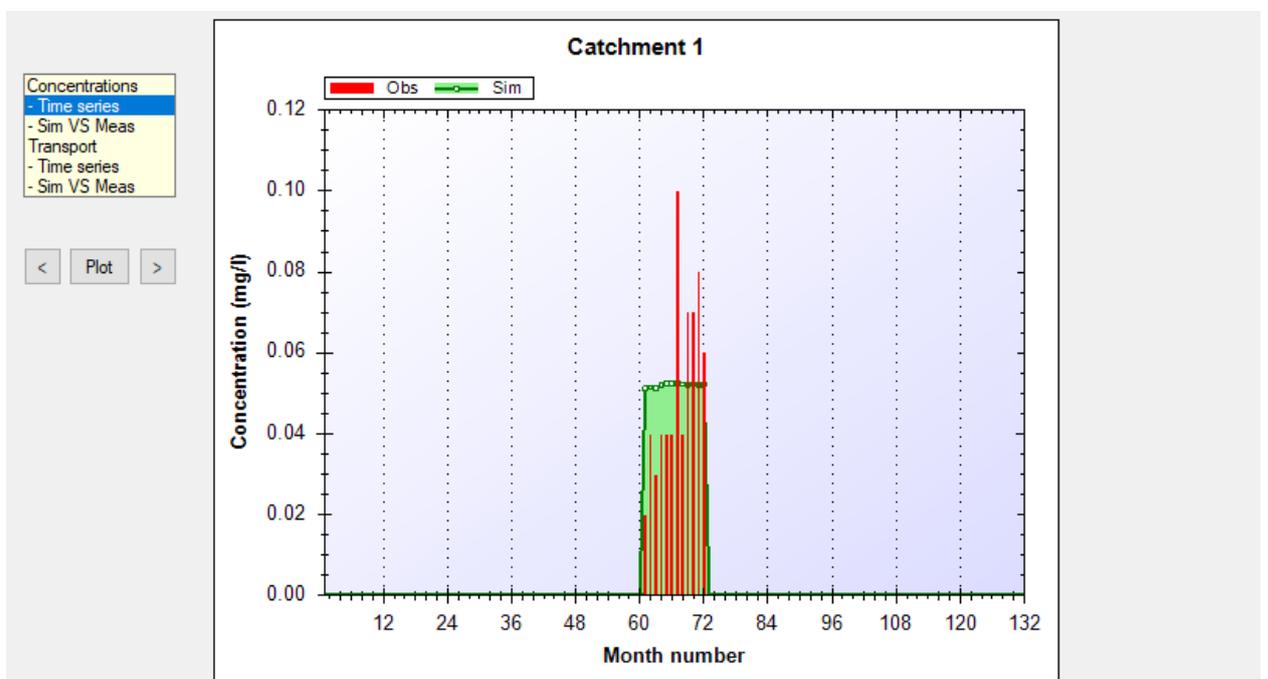


Рисунок 7.42 – Результирующее окно FygisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Караста

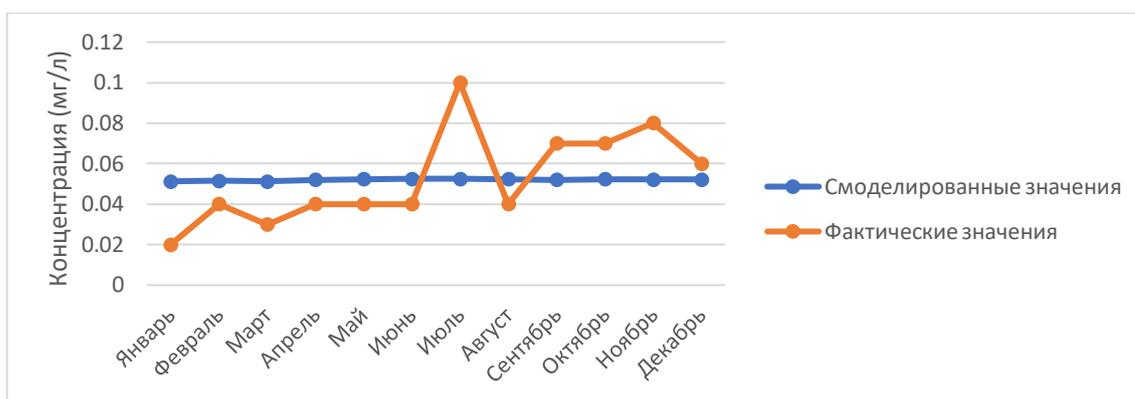


Рисунок 7.43 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных на реке Караста

Таблица 7.28 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р.Караста)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.05	0.02	0.03	61.0
2020	Февраль	0.05	0.04	0.01	22.3
2020	Март	0.05	0.03	0.02	41.5
2020	Апрель	0.05	0.04	0.01	23.0
2020	Май	0.05	0.04	0.01	23.7
2020	Июнь	0.05	0.04	0.01	23.9
2020	Июль	0.05	0.10	-0.05	90.6
2020	Август	0.05	0.04	0.01	23.5
2020	Сентябрь	0.05	0.07	-0.02	34.4
2020	Октябрь	0.05	0.07	-0.02	33.9
2020	Ноябрь	0.05	0.08	-0.03	53.2
2020	Декабрь	0.05	0.06	-0.01	14.9
Среднее		0.05	0.05	0.00	37.15

Таблица 7.29 – Сравнение выноса фосфора рекой Караста, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	2.51	6.44	-3.93	156
Февраль	4.16	5.36	-1.20	28.8
Март	3.74	6.40	-2.65	70.9
Апрель	2.48	3.22	-0.74	29.9
Май	0.98	1.28	-0.30	31.0
Июнь	0.46	0.60	-0.14	31.4
Июль	1.74	0.91	0.83	47.5
Август	1.35	1.77	-0.42	30.7
Сентябрь	3.63	2.70	0.93	25.6
Октябрь	2.42	1.80	0.61	25.3
Ноябрь	3.25	2.12	1.13	34.7
Декабрь	2.37	2.06	0.31	13.0
Сумма	29.1	34.7	-5.58	19.2

7.2. Расчет речного и биогенного стока на малых реках северного побережья Финского залива

Для малых рек северного побережья Финского залива исходными данными стали ряды температуры и осадков, полученные на метеорологической станции Выборг, ряд восстановленных слоев стока, а также осредненные по региону значения испарения.

7.2.1. Расчет речного стока на малых реках северного побережья Финского залива

На малых реках этого района гидрометеорологические наблюдения не ведутся. Для восстановления расходов и получения слоя стока в качестве гидрологического аналога были использованы реки Гороховка и Селезневка.

Методом гидрологической аналогии был получен ряд расходов воды, который был преобразован в слой стока. Поскольку для всех рек в данном районе используются осредненные данные всего по двум аналогам, слои стока получаются едиными для всех рек. Этот ряд слоев стока был признан средним для района.

Исходные данные были загружены в файл RTQ. Также был создан файл евар, в котором указаны осредненные для района значения испарения.

Результаты расчета слоя стока представлены на рисунке 7.44.

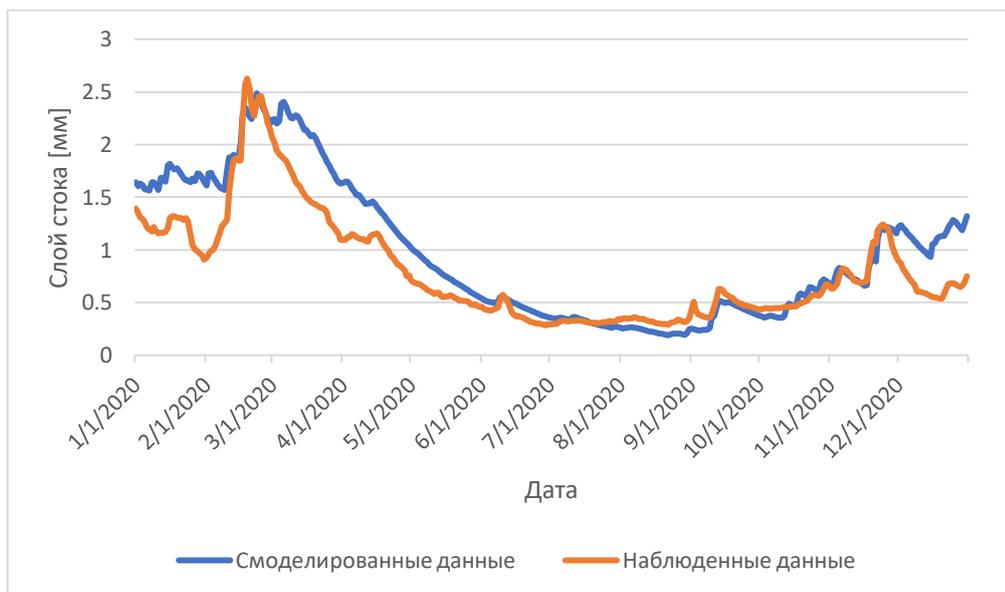


Рисунок 7.44 – График слоев стока на реках северного побережья Финского залива за 2020 год

Оценка погрешности моделирования слоя стока на реках южного побережья Финского залива представлен в таблице 7.30.

Таблица 7.30 – Оценка погрешности при расчете слоя стока на реках северного побережья Финского залива

Характеристика	Измеренное значение, мм	Смоделированное значение, мм	Абс. погрешность Б	Отн. погрешность Б, %
Среднее	0.98	0.81	0.18	18.0
Максимальное	2.49	2.63	-0.14	-5.6

Исходя из графика и таблицы можно сделать вывод, что восстановление слоя стока на основе данных, полученных с помощью гидрологической аналогии, осуществляется с погрешностью, но при этом общность тенденций улавливается и при моделировании среднего значения, и максимального.

7.2.2. Расчет биогенного стока на малых реках северного побережья Финского залива

С помощью системы ArcGIS были выделены бассейны и суббассейны на исследуемых реках. Также определены типы подстилающей поверхности на каждом водосборе.

Полученные данные легли в основу файлов параметризации для модели FyrisNP.

Первой рекой северного побережья Финского залива, для которой был проведен расчет стала река Дрема.

Результаты работы модели по расчету концентраций азота и общей нагрузки на реке Дрема представлены на рисунках 7.44 – 7.46 и в таблице 7.31 и 7.32. Результаты работы по расчету концентраций фосфора и общей нагрузки на реке Дрема представлены на рисунках 7.47 – 7.49 и в таблице 7.33 и 7.34.

Menu About Current project: **Дрема N** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load Sources Apportionment Catch contr Out: Plot Copy Write file Catchment: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	579.483316842909	1347.09871646307	0.563732442958602
2004	2	590.187897828012	1550.77755023106	0.577777626165057
2004	3	630.865654790375	1743.98298903587	0.588461403155148
2004	4	570.15550046962	1016.26941560937	0.536059722059844
2004	5	508.485983480937	484.247801367899	0.443557668247157
2004	6	540.936866422651	234.887826015625	0.361868809734795
2004	7	449.482193196822	149.945765751059	0.329725518994644
2004	8	382.646345893691	96.5206197449928	0.29950499411405
2004	9	434.237270936399	196.133131686762	0.36695714930026
2004	10	460.660983665599	321.939276729381	0.448474380920309
2004	11	534.856044088685	670.842984111911	0.546511582782016
2004	12	498.532025352016	873.01540732306	0.536472034137875
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.44 – Результирующее окно FygisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Дрема

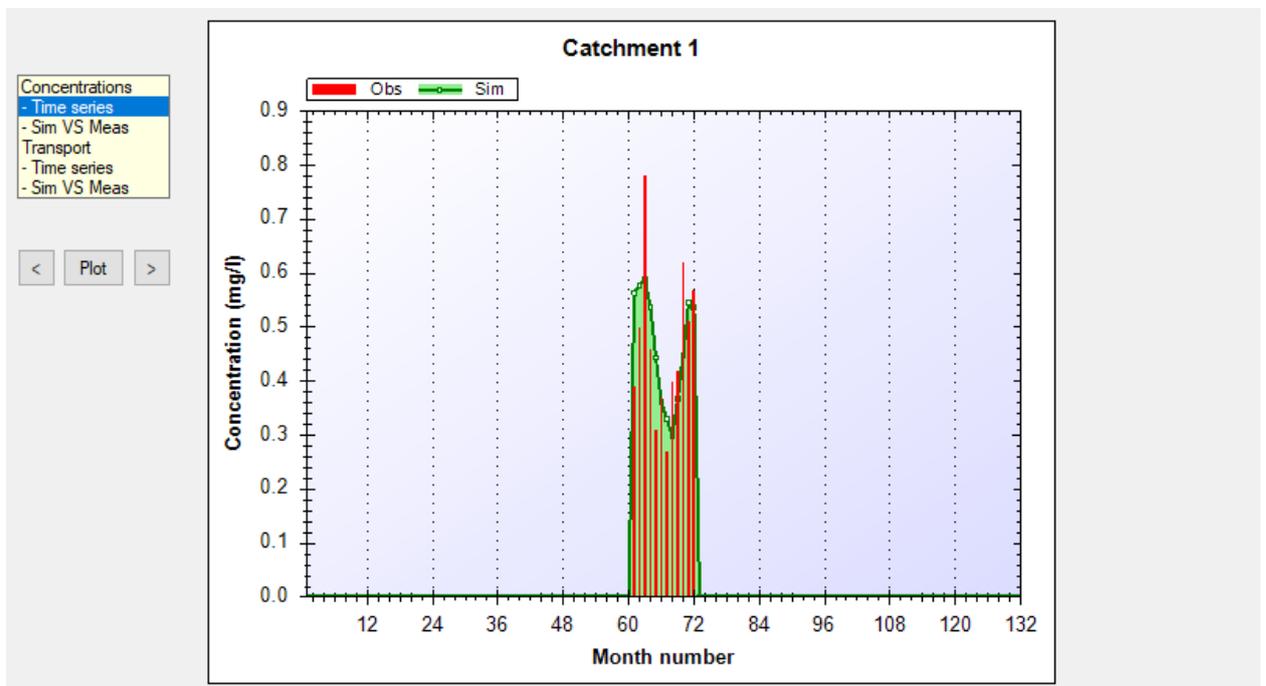


Рисунок 7.45 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактических в реке Дрема в окне программы

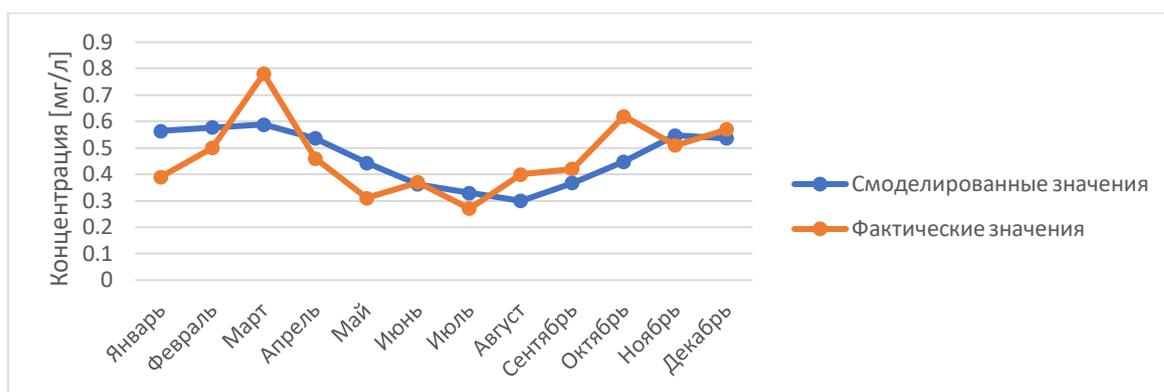


Рисунок 7.46 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на реке Дрема

Таблица 7.31 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р.Дрема)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.56	0.39	-0.17	30.8
2020	Февраль	0.58	0.50	-0.08	13.5
2020	Март	0.59	0.78	0.19	32.5
2020	Апрель	0.54	0.46	-0.08	14.2
2020	Май	0.44	0.31	-0.13	30.1
2020	Июнь	0.36	0.37	0.01	2.2
2020	Июль	0.33	0.27	-0.06	18.1
2020	Август	0.30	0.40	0.10	33.6
2020	Сентябрь	0.37	0.42	0.05	14.5
2020	Октябрь	0.45	0.62	0.17	38.2
2020	Ноябрь	0.55	0.51	-0.04	6.7
2020	Декабрь	0.54	0.57	0.03	6.2
Среднее		0.47	0.47	0.00	20.1

Таблица 7.32 – Сравнение выноса азота рекой Дрема, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	49.0	70.8	-21.8	44.5
Февраль	52.0	60.1	-8.09	15.6
Март	97.3	73.4	23.9	24.6
Апрель	28.5	33.2	-4.71	16.5
Май	7.57	10.8	-3.26	43.1
Июнь	4.26	4.16	0.09	2.20
Июль	4.70	5.74	-1.04	22.1
Август	13.5	10.1	3.40	25.1
Сентябрь	21.8	19.0	2.75	12.6
Октябрь	21.4	15.5	5.92	27.7
Ноябрь	20.7	22.2	-1.48	7.16
Декабрь	22.5	21.2	1.32	5.88
Сумма	343	346	-3.04	0.89

Menu About Current project: **Drema P** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load Sources Apportionment Catch contr Out: Plot Copy Write file

Catchment: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	61.7586020463608	42.6720010376082	0.0178573337624603
2004	2	61.9468076530248	47.5581179504412	0.0177188639919308
2004	3	63.9468165353994	50.3766901802576	0.0169982952678771
2004	4	62.1257984197028	33.7946519335712	0.0178259341906464
2004	5	62.9711381244793	19.0916225558907	0.0174874012024933
2004	6	66.8539138930876	7.58028710661737	0.0116782104856178
2004	7	64.7040864621195	6.38085517544452	0.0140312784013259
2004	8	63.6240066015399	5.17752961364913	0.0160659554461858
2004	9	62.9320993260731	9.52685670478091	0.0178243632175401
2004	10	60.5240402128057	15.0951489226153	0.0210281505156651
2004	11	59.325969627399	25.076586661429	0.020428990675442
2004	12	58.1199272893681	33.173350893208	0.0203851786389643
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.47 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Дрема

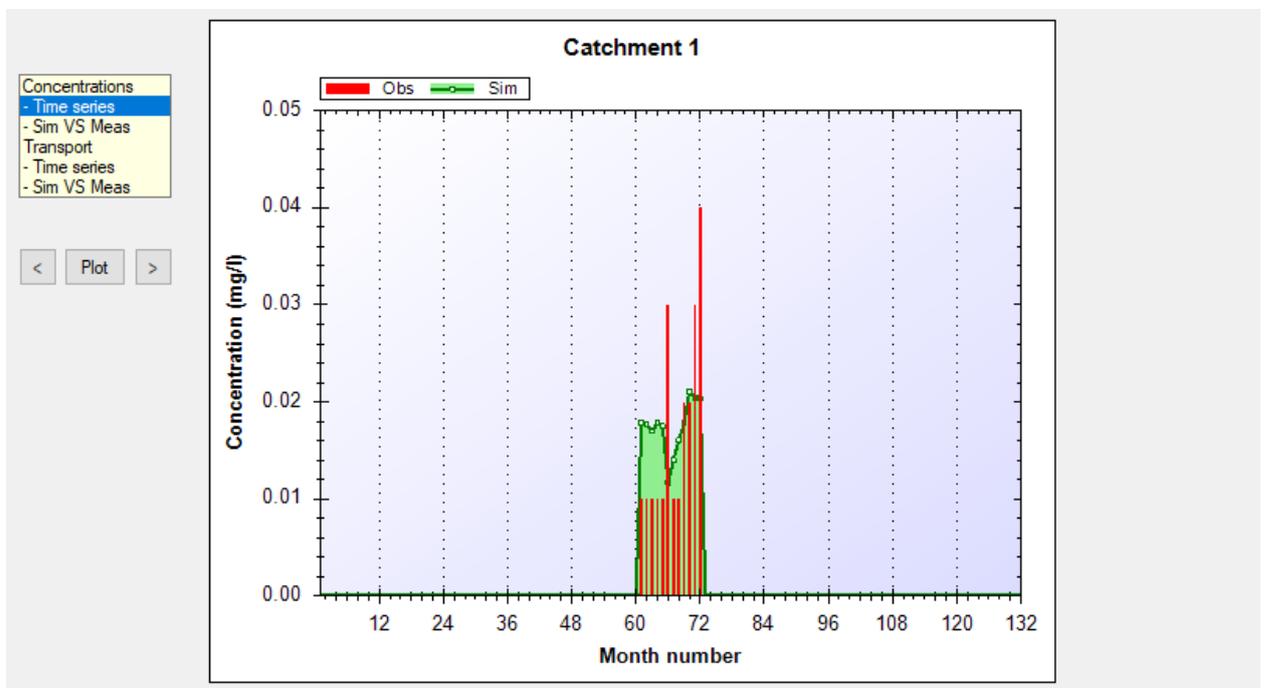


Рисунок 7.48 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактических в реке Дрема в окне программы

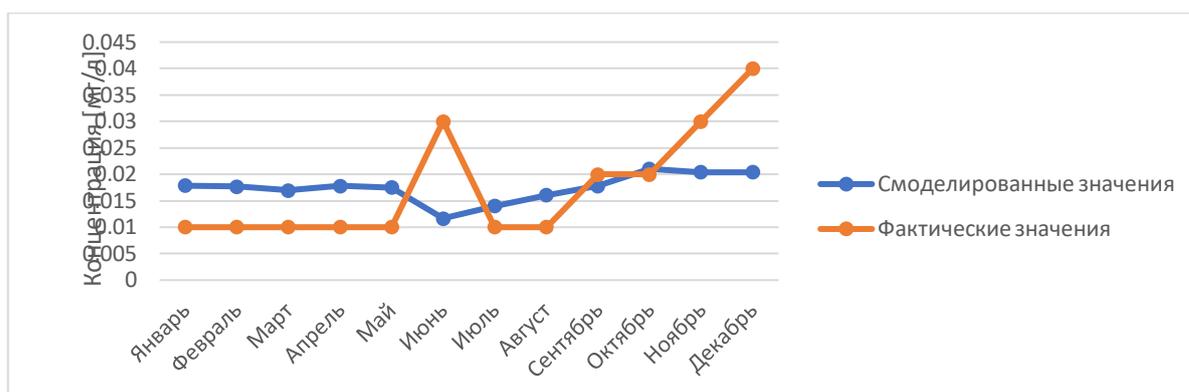


Рисунок 7.48 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфор и фактически измеренных на реке Дрема

Таблица 7.33 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р. Дрема)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.02	0.01	0.01	44.0
2020	Февраль	0.02	0.01	0.01	43.6
2020	Март	0.02	0.01	0.01	41.2
2020	Апрель	0.02	0.01	0.01	43.9
2020	Май	0.02	0.01	0.01	42.8
2020	Июнь	0.01	0.03	-0.02	157
2020	Июль	0.01	0.01	0.00	28.7
2020	Август	0.02	0.01	0.01	37.8
2020	Сентябрь	0.02	0.02	0.00	12.2
2020	Октябрь	0.02	0.02	0.00	4.89
2020	Ноябрь	0.02	0.03	-0.01	46.9
2020	Декабрь	0.02	0.04	-0.02	96.2
Среднее		0.02	0.02	0.00	49.9

Таблица 7.34 – Сравнение выноса фосфора рекой Дрема, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	1.26	2.24	-0.99	78.6
Февраль	1.04	1.84	-0.80	77.2
Март	1.25	2.12	-0.87	70.0
Апрель	0.62	1.10	-0.48	78.3
Май	0.24	0.43	-0.18	74.9
Июнь	0.35	0.13	0.21	61.1
Июль	0.17	0.24	-0.07	40.3
Август	0.34	0.54	-0.21	60.7
Сентябрь	1.04	0.92	0.11	10.9
Октябрь	0.69	0.73	-0.04	5.14
Ноябрь	1.22	0.83	0.39	31.9
Декабрь	1.58	0.80	0.77	49.0
Сумма	9.79	11.9	-2.15	22.0

Результаты работы модели по расчету концентраций азота и общей нагрузки на реке Матросовка представлены на рисунках 7.49 – 7.51 и в таблице 7.35 и 7.36. Результаты работы по расчету концентраций фосфора и общей нагрузки на реке Матросовка представлены на рисунках 7.52 – 7.54 и в таблице 7.37 и 7.38.

Menu About Current project: **Матросовка N** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load
Sources
Apportionment
Catch contr
Out:
Plot
Copy
Write file

Catchment:
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	362.335879840186	1621.2419906945	0.568474863624585
2004	2	368.372223586524	1851.33823116211	0.577945384980361
2004	3	380.02013075339	2108.82709765926	0.596219982685442
2004	4	355.241885947123	1261.0431718339	0.557344977142762
2004	5	315.100996801727	644.13582166374	0.494367260189192
2004	6	337.662193579489	410.394850584315	0.529763901744816
2004	7	293.91622077099	250.273754991056	0.461130108322522
2004	8	252.708851888886	152.491837258255	0.396479173350492
2004	9	285.404457887525	285.631743460785	0.4477758601964
2004	10	317.349856060136	426.564529765232	0.497895533350542
2004	11	371.207283624713	853.194622213672	0.582393358416745
2004	12	339.067309984323	1033.16777208848	0.531968412534548
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.49 – Результирующее окно FygisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Матросовка

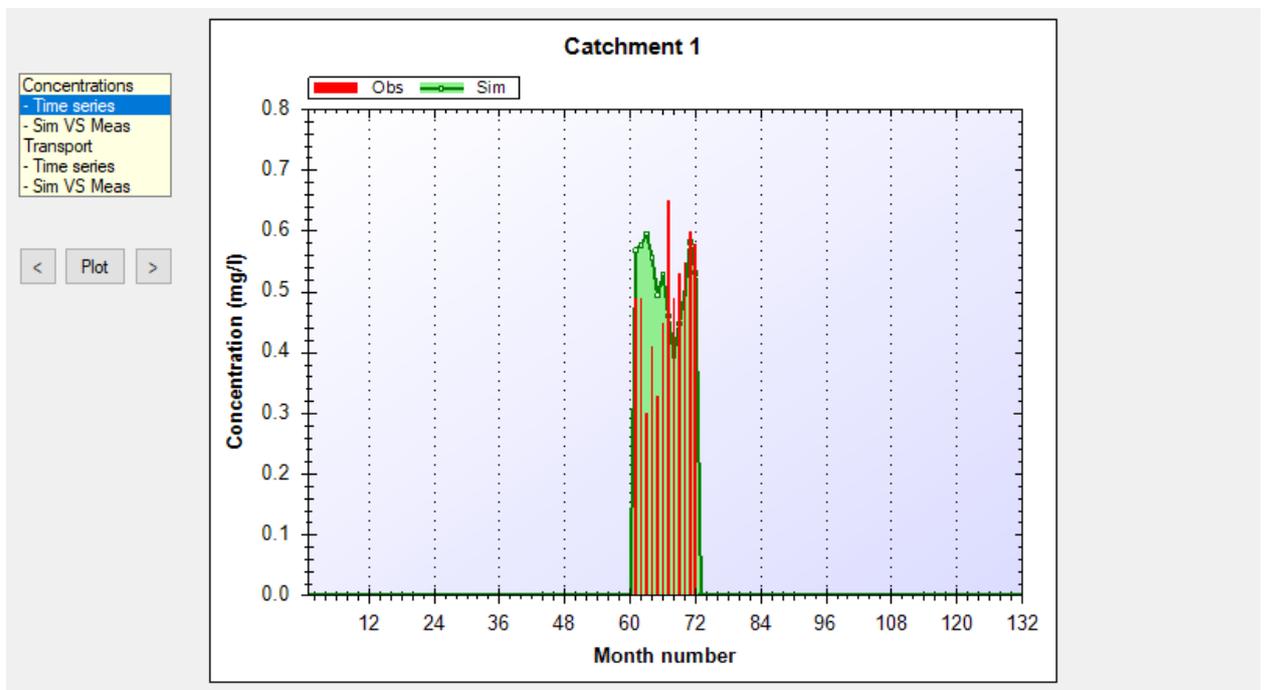


Рисунок 7.50 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактических в реке Матросовка в окне программы

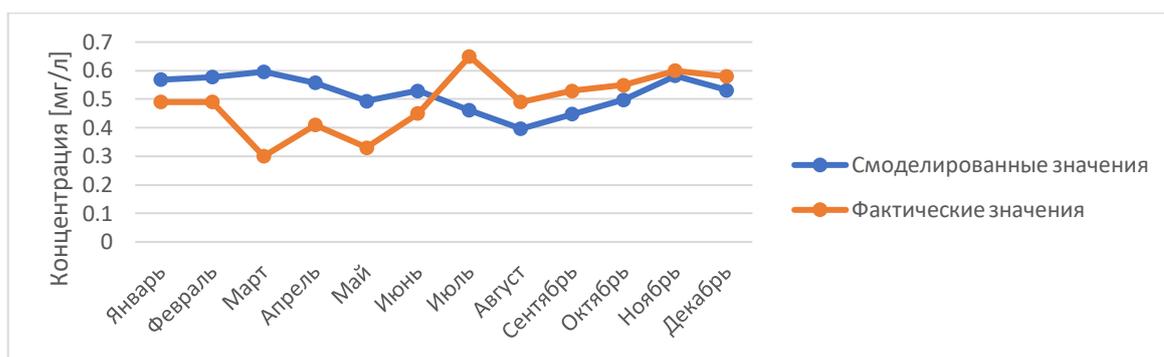


Рисунок 7.51 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на реке Матросовка

Таблица 7.35 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р. Матросовка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.57	0.49	-0.08	16.0
2020	Февраль	0.58	0.49	-0.09	17.9
2020	Март	0.6	0.3	-0.3	98.7
2020	Апрель	0.56	0.41	-0.15	35.9
2020	Май	0.49	0.33	-0.16	49.8
2020	Июнь	0.53	0.45	-0.08	17.7
2020	Июль	0.46	0.65	0.19	29.1
2020	Август	0.4	0.49	0.09	19.1
2020	Сентябрь	0.45	0.53	0.08	15.5
2020	Октябрь	0.5	0.55	0.05	9.47
2020	Ноябрь	0.58	0.6	0.02	2.93
2020	Декабрь	0.53	0.58	0.05	8.28
Среднее		0.52	0.49	0.03	26.7

Таблица 7.36 – Сравнение выноса азота рекой Матросовка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	61.6	71.6	-10.1	16.3
Февраль	50.9	60.3	-9.36	18.4
Март	37.4	74.8	-37.4	100
Апрель	25.4	34.7	-9.29	36.6
Май	8.06	12.0	-3.91	48.5
Июнь	5.18	6.10	-0.92	17.8
Июль	11.3	8.01	3.31	29.2
Август	16.6	13.5	3.04	18.4
Сентябрь	27.5	23.3	4.14	15.1
Октябрь	19.0	17.3	1.73	9.09
Ноябрь	24.4	23.6	0.81	3.33
Декабрь	22.9	20.9	1.97	8.62
Сумма	310	366	-55.9	18.0

Menu		About		Current project: Матросовка P			Catchment overview
General		Data	Q-data	Calibration	Scenario	Result	
Internal load		Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)	
Sources		2003	10	0	0	0	1
Apportionment		2003	11	0	0	0	1
Catch contr		2003	12	0	0	0	1
Out:		2004	1	0.217406320857393	69.5759574525836	0.0243962240994413	1
		2004	2	0.115915910529552	75.4741428207444	0.0235612984134276	1
		2004	3	0.276516433288393	80.8180889107846	0.0228493647604125	1
		2004	4	0.549003400209251	59.5227159103767	0.0263073362431352	1
		2004	5	1.52305010851068	42.7182209904193	0.0327857715111124	1
		2004	6	3.67088795211492	31.8558339106301	0.0411215463395856	1
		2004	7	4.12700659249121	27.5736607019048	0.0508045485902914	1
		2004	8	4.92773063798072	24.1644692900403	0.0628276829817648	1
		2004	9	3.06049250859494	30.2097916706111	0.047358935977363	1
		2004	10	1.70577961378449	35.1746234004845	0.0410565967311616	1
		2004	11	0.606803988750983	46.307352279341	0.0316095457134734	1
		2004	12	0.0621451651025637	54.7236851449614	0.028176713115779	1
		2005	1	0	0	0	1
		2005	2	0	0	0	1

Рисунок 7.52 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Матросовка

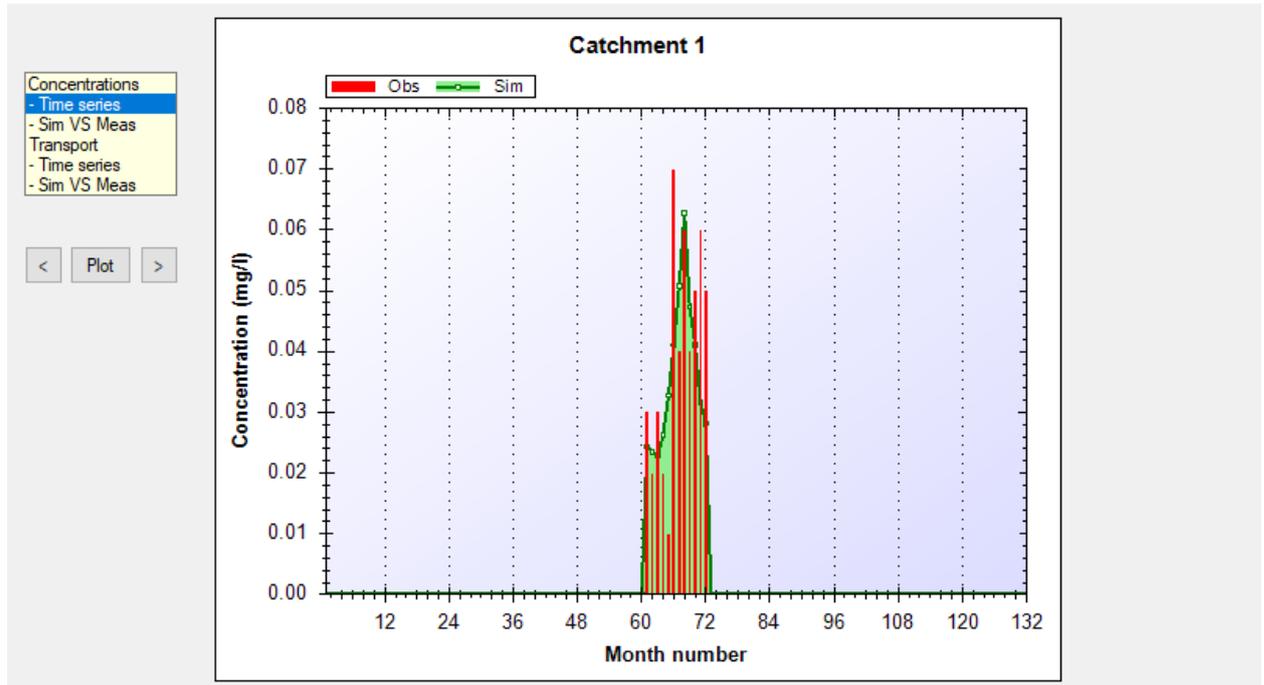


Рисунок 7.53 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактических в реке Матросовка в окне программы

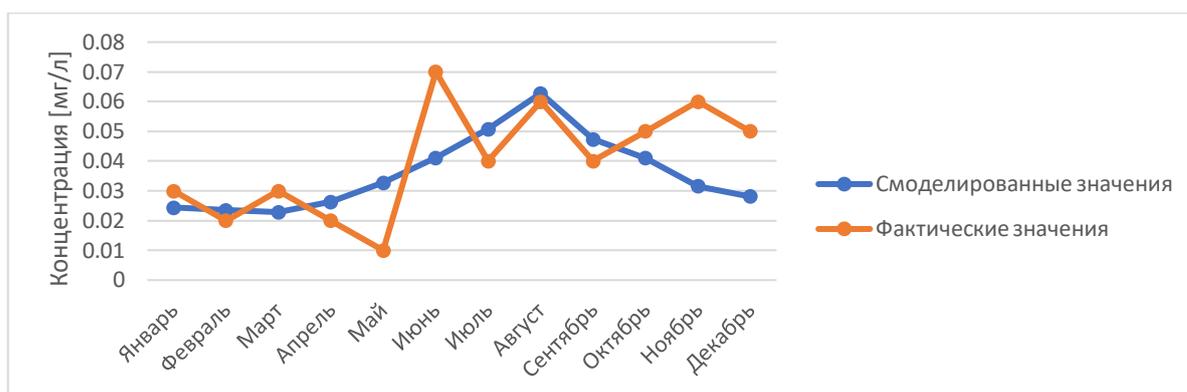


Рисунок 7.54 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфор и фактически измеренных на реке Матросовка

Таблица 7.37 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р. Матросовка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.02	0.03	0.01	18.7
2020	Февраль	0.02	0.02	0.00	17.8
2020	Март	0.02	0.03	0.01	23.8
2020	Апрель	0.03	0.02	-0.01	31.5
2020	Май	0.03	0.01	-0.02	228
2020	Июнь	0.04	0.07	0.03	41.3
2020	Июль	0.05	0.04	-0.01	27.0
2020	Август	0.06	0.06	0.00	4.71
2020	Сентябрь	0.05	0.04	-0.01	18.4
2020	Октябрь	0.04	0.05	0.01	17.9
2020	Ноябрь	0.03	0.06	0.03	47.3
2020	Декабрь	0.03	0.05	0.02	43.6
Среднее		0.04	0.04	0.00	43.3

Таблица 7.38 – Сравнение выноса фосфора рекой Матросовка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	3.77	2.51	1.26	33.3
Февраль	2.08	2.08	0.00	0.00
Март	3.74	2.49	1.25	33.3
Апрель	1.24	1.86	-0.62	50.0
Май	0.24	0.73	-0.49	200.0
Июнь	0.81	0.46	0.35	42.9
Июль	0.70	0.87	-0.17	25.0
Август	2.03	2.03	0.00	0.00
Сентябрь	2.07	2.59	-0.52	25.0
Октябрь	1.73	1.38	0.35	20.00
Ноябрь	2.44	1.22	1.22	50.0
Декабрь	1.97	1.18	0.79	40.0
Сумма	22.8	19.4	3.40	14.9

Результаты работы модели по расчету концентраций азота и общей нагрузки на реке Чулковка представлены на рисунках 7.55 – 7.57 и в таблице 7.39 и 7.40. Результаты работы по расчету концентраций фосфора и общей нагрузки на реке Чулковка представлены на рисунках 7.58 – 7.69 и в таблице 7.41 и 7.42.

Menu About Current project: **Чулкова N** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	9.14837340517693	1822.54242196983	0.489593021721874
2004	2	8.56809999801226	2040.93341774313	0.488117094992571
2004	3	9.83367162623472	2316.36241328684	0.50172554566532
2004	4	11.2205643476236	1499.86936751812	0.507857327267332
2004	5	15.2555712789807	882.051090189719	0.51863299350748
2004	6	31.0993362676342	763.557882334966	0.755121045954663
2004	7	30.1590296046287	545.724953893451	0.770328796835089
2004	8	30.4210346092757	396.311170153804	0.789412949289827
2004	9	23.0496265804309	553.404667184089	0.664647191912145
2004	10	18.4648558521052	733.819895067875	0.656201355672833
2004	11	13.8803998057363	1227.0972452289	0.641713884553093
2004	12	8.30902792256893	1259.47393232047	0.49681915125043
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.55 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего азота в реке Чулковка

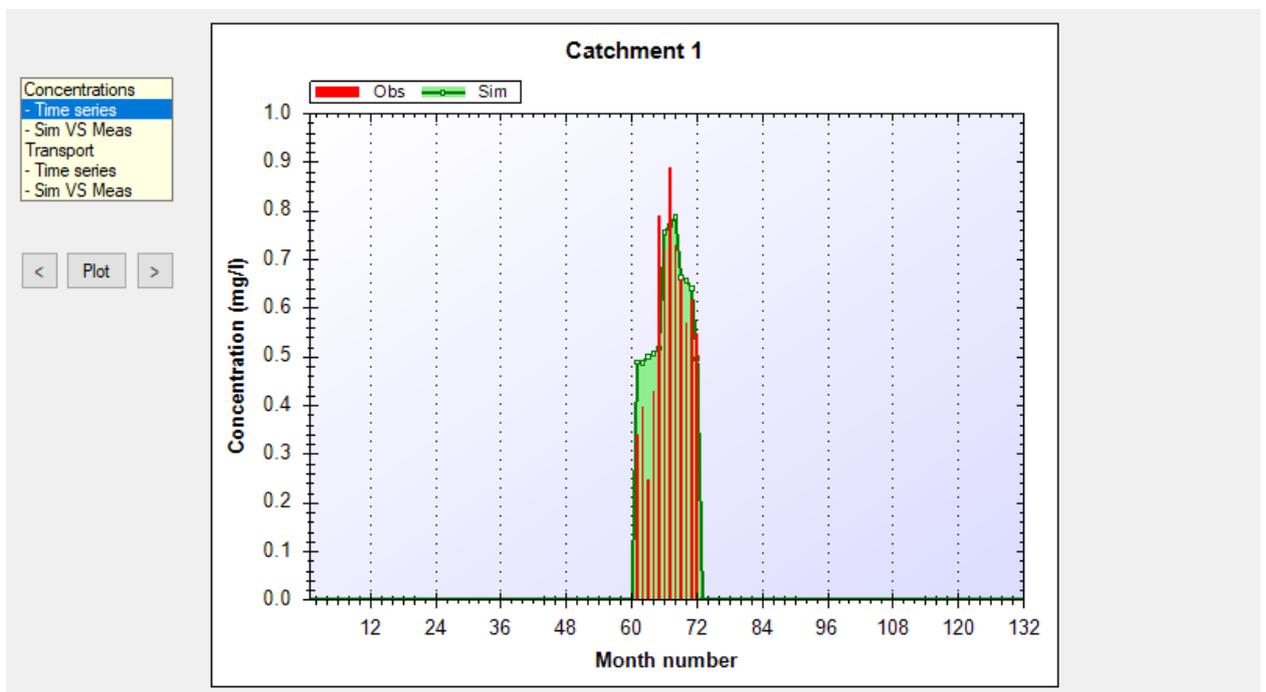


Рисунок 7.56 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактических в реке Чулковка в окне программы

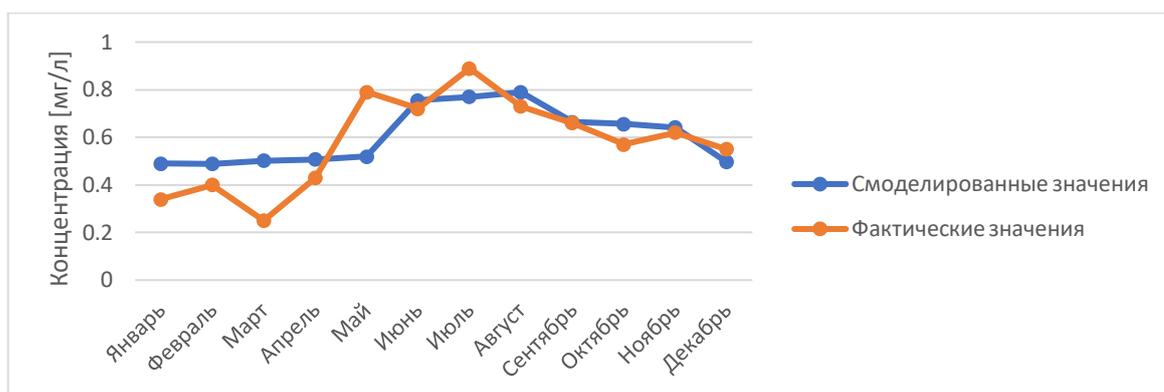


Рисунок 7.57 – График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на реке Чулковка

Таблица 7.39 – Результаты работы программы по расчету концентрации азота и их погрешности (р.Чулковка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.49	0.34	-0.15	44.0
2020	Февраль	0.49	0.4	-0.09	22.0
2020	Март	0.50	0.25	-0.25	101
2020	Апрель	0.51	0.43	-0.08	18.1
2020	Май	0.52	0.79	0.27	34.4
2020	Июнь	0.76	0.72	-0.04	4.90
2020	Июль	0.77	0.89	0.12	13.4
2020	Август	0.79	0.73	-0.06	8.10
2020	Сентябрь	0.66	0.66	0.00	0.70
2020	Октябрь	0.66	0.57	-0.09	15.1
2020	Ноябрь	0.64	0.62	-0.02	3.50
2020	Декабрь	0.50	0.55	0.05	9.67
Среднее		0.61	0.58	0.03	22.9

Таблица 7.40 – Сравнение выноса азота рекой Чулковка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	42.7	61.6	-18.9	44.1
Февраль	41.6	50.9	-9.36	22.5
Март	31.2	62.4	-31.2	100
Апрель	26.6	31.6	-4.95	18.6
Май	19.3	12.7	6.59	34.2
Июнь	8.28	8.74	-0.46	5.56
Июль	15.5	13.4	2.09	13.5
Август	24.7	26.7	-2.03	8.22
Сентябрь	34.2	34.2	0.00	0.00
Октябрь	19.7	22.8	-3.11	15.8
Ноябрь	25.2	26.0	-0.81	3.23
Декабрь	21.7	19.7	1.97	9.09
Сумма	311	371	-60.1	19.3

Menu About Current project: **Чулковка P** Catchment overview

General Data Q-data Calibration Scenario Result

Internal load Sources Apportionment Catch contr Out: Plot Copy Write file

Catchment: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Year	Month	Retention (kg/month)	Mass flow rate (kg/month)	Concentration (mg/l)
2003	10	0	0	0
2003	11	0	0	0
2003	12	0	0	0
2004	1	0.0673607240758969	55.0894214153021	0.0147987755843161
2004	2	0.027604910999969	59.255515600092	0.0141717656664115
2004	3	0.0902184286002949	63.1112766170337	0.0136699419385697
2004	4	0.200959867671017	48.035534957117	0.0162648820793943
2004	5	0.621576184565853	36.3461204073742	0.0213709811584783
2004	6	1.61906510185764	29.1452381483524	0.0288232015205977
2004	7	1.89690606331275	26.1438459404553	0.0369038601666818
2004	8	2.36813780925338	23.8157942197646	0.0474387243423084
2004	9	1.37109375687902	27.786979483869	0.0333725734183777
2004	10	0.726155677129679	31.0017564086723	0.027722598856124
2004	11	0.230092059461327	38.6402798874747	0.0202070408056247
2004	12	0.00363291006588895	44.4701373328461	0.0175419397882965
2005	1	0	0	0
2005	2	0	0	0

Рисунок 7.58 – Результирующее окно FyrisNP, с итогами расчета стока общего фосфора в реке Чулковка

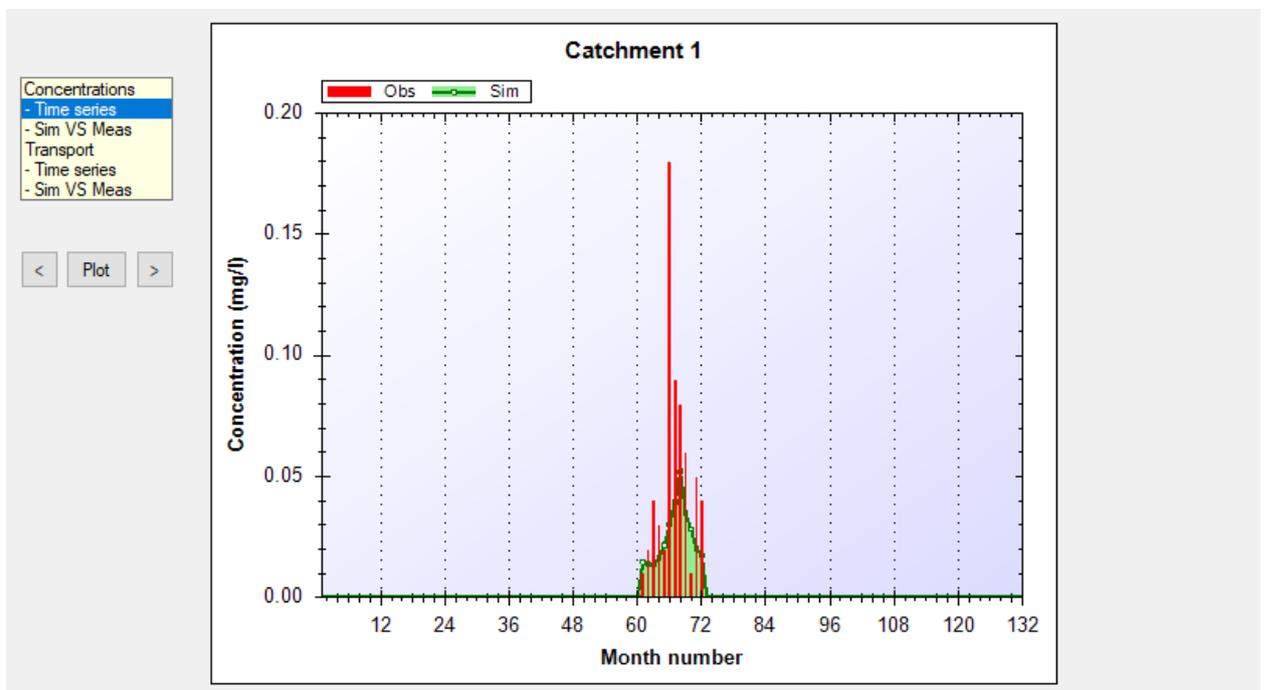


Рисунок 7.59 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактических в реке Чулковка в окне программы

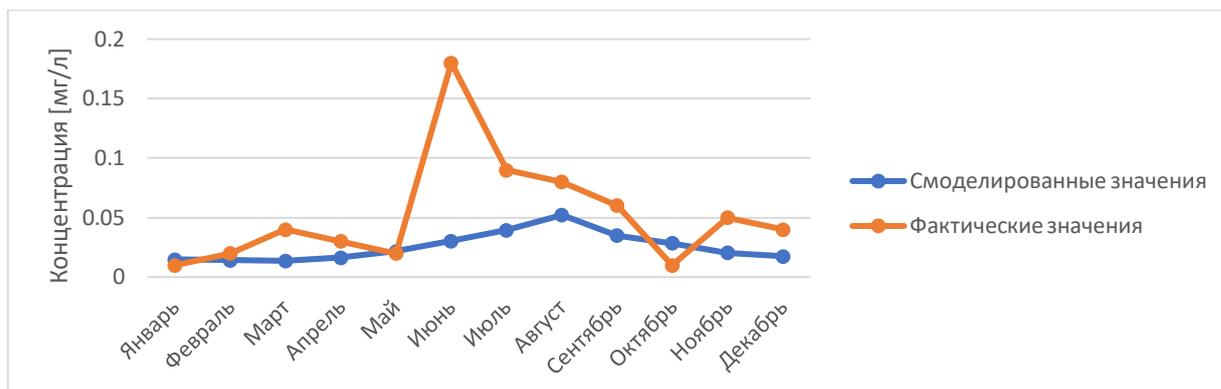


Рисунок 7.60 – График-сравнение смоделированных концентраций фосфор и фактически измеренных на реке Чулковка

Таблица 7.41 – Результаты работы программы по расчету концентрации фосфора и их погрешности (р. Чулковка)

Год	Месяц	Рассчитанная концентрация (мг/л)	Измеренная концентрация (мг/л)	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
2020	Январь	0.01	0.01	0.00	48.2
2020	Февраль	0.01	0.02	0.01	29.1
2020	Март	0.01	0.04	0.03	65.8
2020	Апрель	0.02	0.03	0.01	45.6
2020	Май	0.02	0.02	0.00	8.70
2020	Июнь	0.03	0.18	0.15	83.1
2020	Июль	0.04	0.09	0.05	56.0
2020	Август	0.05	0.08	0.03	34.8
2020	Сентябрь	0.04	0.06	0.02	41.6
2020	Октябрь	0.03	0.01	-0.02	184
2020	Ноябрь	0.02	0.05	0.03	59.3
2020	Декабрь	0.02	0.04	0.02	56.1
Среднее		0.03	0.05	-0.03	59.4

Таблица 7.42 – Сравнение выноса фосфора рекой Чулковка, рассчитанной на основе фактических значений и на основе смоделированных данных

Месяц	Биогенная нагрузка фактическая, кг	Биогенная нагрузка смоделированная, кг	Абс. погрешность	Отн. погрешность, %
Январь	1.26	1.26	0.00	0.00
Февраль	2.08	1.04	1.04	50.0
Март	4.99	1.25	3.74	75.0
Апрель	1.86	1.24	0.62	33.3
Май	0.49	0.49	0.00	0.00
Июнь	2.07	0.35	1.73	83.3
Июль	1.57	0.70	0.87	55.6
Август	2.71	1.69	1.01	37.5
Сентябрь	3.11	2.07	1.04	33.3
Октябрь	0.35	1.04	-0.69	200.0
Ноябрь	2.03	0.81	1.22	60.0
Декабрь	1.58	0.79	0.79	50.00
Сумма	24.1	12.7	11.4	47.2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хельсинкская конвенция призвана защитить экологические системы Балтийского моря и восстановить уже уничтоженные. Для этого требуется слаженная работа всех стран-участников. Россия, как одна из стран-подписантов, обязана своевременно предоставлять данные о биогенном стоке в Балтику и принимать участие во всех мероприятиях по охране окружающей среды, а также вести оценку эффективности уже принятых решений.

Не все реки, впадающие в Балтийское море покрыты сетью гидрометеорологического мониторинга. В таком случае данные о речном и биогенном стоке на них могут быть получены только с помощью математического моделирования.

Применение комплекса математических моделей начинается с модели, позволяющей рассчитать речной сток на исследуемых реках. Такие модели позволяют описать, спрогнозировать и восстановить поведение стока на реках, не освещенных данными непосредственного мониторинга.

Точки наблюдений за состоянием исследуемой реки, зачастую, приурочены к какому-либо инфраструктурному сооружению. Такое расположение не позволяет с достаточной точностью описать процессы, происходящие на отдаленных участках исследуемого водосбора. Математические модели позволяют получить полное представление о протекающих процессах благодаря своей гибкой настройке и учету многочисленных параметров гидрометеорологического и геофизического характера исследуемого бассейна.

Были рассмотрены три модели, рекомендованные Хельсинкской конвенцией: Нуре, позволяющая рассчитывать гидрологические характеристики и моделировать речной сток, модель HBV, также описывающая формирование речного стока на водосборах и модель FyrisNP,

позволяющая спрогнозировать и восстановить биогенный стока на исследуемой реке.

В качестве тестовых объектов были выбраны малые реки Ленинградской области, а именно реки северо-восточного и юго-восточного побережий Финского залива. На реках Селезневка и Гороховка был проведен первичный тест комплекса работоспособности метода и сравнение результатов работы модели FyrisNP на основе данных непосредственного мониторинга и данных, полученных с помощью модели HBV.

После тестирования были осуществлены расчеты на малых реках юго-восточного и северо-восточного побережья Финского залива, на которых данные мониторинга отсутствуют. Результат работы модели сравнивались с результатами нерегулярных наблюдений за концентрациями биогенных веществ в воде этих рек.

Моделирование продемонстрировало удовлетворительные концентрации и суммарную годовую нагрузку. Комплекс моделей позволяет с достаточной точностью рассчитать среднегодовые концентрации и общую нагрузку фосфора и азота. Также удовлетворительные результаты показало моделирование речного стока на основе данных, полученных с помощью метода гидрологической аналогии.

Полученные результаты показывают общность тенденций с натурными данными. Это позволяет сделать вывод, что комплекс моделей может использоваться для создания ежегодных отчетов в рамках Хельсинкской конвенции.

Дальнейшее развитие моделей возможно при более подробном изучении исследуемых водосборов и установки всех источников биогенного загрязнения.

Апробация исследований

Результаты проведенных работ были представлены на нескольких конференциях, а также на их основе был подготовлен ряд публикаций.

Публикации по теме представлены ниже:

- 1) Лукас Р. М., Козьмин Г. Г., Викторова Н. В. Использование модели HBV-light в гидрологическом прогнозировании для рек Танзании и России / Моря и воды суши в теории и практике. Сборник материалов Межрегиональной молодежной научно-практической конференции - Санкт-Петербург, РГГМУ, 2024. — С. 34-42.
- 2) Козьмин Г.Г., Рафаэль Мучунгузи Лукас, Викторова Н.В. Использование математических моделей в оценке речного стока / Гидрология и океанология — 2024 : сборник материалов конференции студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ. — Казань : Бук, 2024. — С. 70-76
- 3) Г.Г. Козьмин., Н.В. Викторова., Использование математических моделей для оценки выноса загрязняющего вещества / Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. — Иркутск: ИГУ, 2023 — С. 40-45

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. Козьмин Г.Г. ВКР: Использование математических моделей для оценки выноса загрязняющих веществ. – 2023: РГГМУ, 2023. – 83 с.
3. Сенников А.Н. Фитогеографическое районирование Северо-Запада европейской части России (Ленинградская, Псковская и Новгородская области) // Биogeография Карелии. Труды Карельского научного центра РАН Выпуск 7. – Петрозаводск: 2005. – С. 206 – 243.
4. Энциклопедия. Балтийское море [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://knowledge.su/b/baltiyskoe-more> (дата обращения – 20.03.2025).
5. РИА Новости. Экологические проблемы Балтийского моря [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/eco/20100210/208437078.html> (дата обращения – 20.03.2025).
6. О воде. Экологические проблемы Балтийского моря [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.o8ode.ru/article/planetwa/ezze/balticsea.htm> (дата обращения – 20.03.2025)
7. Проект ХЕЛКОМ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.helcom.ru/about> (дата обращения – 20.03.2025)
8. 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 – 13.04.2025)
9. 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.

10. HYPE model description [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description (дата обращения – 13.01.2025)
11. HYPE file reference [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_file_reference (дата обращения – 19.02.2025)
12. 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 – 20.02.2025)
13. Land routines [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description:hype_land (дата обращения – 13.01.2025)
14. River and lakes [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description:hype_routing (дата обращения – 13.01.2025)
15. 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 – 12.01.2025)
16. 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 – 13.04.2025)
17. HBV-light Model [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/Services/HBV-Model.html> (дата обращения – 24.02.2025)
18. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hess.copernicus.org/articles/16/3315/2012/> (дата обращения – 24.02.2025)