

ЕПИФАНОВА МАРИНА АНАТОЛЬЕВНА

**ЭКОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ НА
ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ ОТ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-
БУМАЖНЫХ КОМБИНАТОВ**

05.21.03 – технология и оборудование химической переработки биомассы
дерева; химия древесины

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург 2022

Работа выполнена на кафедре Охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Научный руководитель: **Аким Эдуард Львович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии целлюлозы и композиционных материалов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Официальные оппоненты: **Вураско Алеся Валерьевна**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Кондратьев Сергей Алексеевич
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Математических методов моделирования ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской Академии наук»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Защита диссертации состоится «16» сентября 2022 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.236.08 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана-Черных,4, А-231.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4, А-231, Ученый Совет.

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28 Положения о присуждении учёных степеней).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 года

Ученый секретарь
диссертационного
совета

Махотина Людмила Герцевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная система нормирования антропогенной нагрузки на водные объекты от целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК) представляет собой сложную систему эколого-технологического нормирования, состоящую из 3 основных элементов: 1 - расчета технологических нормативов по маркерным для отрасли веществам и сравнении фактических применяемых технологий с наилучшими доступными технологиями; 2 - расчета нормативов допустимых сбросов (НДС) для веществ 1 и 2 классов опасности; 3 - сравнения рассчитанных НДС всех водопользователей водохозяйственного участка с установленными на основе решения государственной экологической экспертизы нормативами допустимых воздействий (НДВ).

На сегодняшний день каждый из трех приведенных элементов проработан в отдельности, а единый алгоритм эколого-технологической оптимизации нагрузки от водопользователей с учетом действующей экологической системы нормирования и современного технологического нормирования на основе наилучших доступных технологий отсутствует.

При расчете технологических нормативов не проработаны вопросы расчета фактических технологических показателей образования загрязняющих веществ на единицу выпускаемой продукции отдельно для каждого из объектов технологического нормирования с исключением нагрузки от абонентов.

В условиях перехода к циркулярной био-экономике, улучшение состояния водного объекта как правило связано с сокращением или оптимизацией антропогенной нагрузки. С учетом принципов ESG (ESG = Экология-Environmental + Социальное развитие-Social + Корпоративное управление -Governance), приоритет на сброс загрязняющих веществ должны получать социальнозначимые предприятия, внедрившие наилучшие доступные технологий (НДТ), что предопределяет целесообразность разработки коэффициентов социальной значимости и уровня экологичности применяемой технологии для водопользователей.

Распределение квот сброса между предприятиями водохозяйственного участка требует обеспечения нормативов качества воды как в замыкающих, так и промежуточных створах. Для этого необходима разработка комбинированных математических моделей конвективно-диффузионного переноса загрязняющих веществ.

Цель работы - разработка усовершенствованной методики эколого-технологического нормирования нагрузки на водные объекты от целлюлозно-бумажных комбинатов на основе ESG – подхода (E – environmental, S – social, G – governance), с учетом локальной и общезаводской очистки и способностей водоема к самоочищению.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать алгоритм оптимизации нагрузки от ЦБК на основе ESG – подхода, учитывающий технологию производства, локальные и общезаводские очистные сооружения, экологические стандарты качества водных объектов и апробировать его на примере НΠΑО «Сильвамо Корпорейшн Рус».

2. Разработать коэффициенты оценки уровня применяемых технологий ЦБК по сравнению с НДТ и балансовые модели расчета технологических показателей сброса для объектов технологического нормирования.
3. Разработать комбинированную математическую модель переноса загрязняющих веществ в реке Вуокса в зоне влияния НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус».

Научная новизна. В рамках диссертации впервые разработаны:

1. Алгоритм оптимизации нагрузки от ЦБК на основе ESG – подхода, учитывающий технологию производства, локальные и общезаводские очистные сооружения, экологические стандарты качества водных объектов.
2. Коэффициенты оценки уровня применяемых технологий ЦБК по сравнению с НДТ и балансовые модели расчета технологических показателей сброса для объектов технологического нормирования: при недостатке данных производственного экологического контроля; отдельно для каждого из основных производств и технологических процессов для интегрированных ЦБК.
3. Комбинированная математическая модель переноса загрязняющих веществ в реке Вуокса в зоне влияния НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус».

Теоретическая и практическая значимость заключается в комплексном подходе к оценке воздействия ЦБК на водные объекты. На примере НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус» показаны подходы по определению объектов технологического нормирования и расчету технологических нормативов. Для водохозяйственного участка р. Вуокса построены: комбинированная гидродинамическая модель, учитывающая быстрины и застойные зоны Лесогорского водохранилища, а также модель конвективно-диффузионного переноса и превращения загрязняющих веществ. Результаты работы применимы для интегрированных ЦБК при расчёте технологических нормативов и бассейновых водных управлений при квотировании нагрузки на водохозяйственных участках.

Методы исследования. В диссертации использован балансовый метод расчёта значений масс загрязняющих веществ, образующихся на тонну выпускаемой продукции ЦБК, с учетом масс загрязняющих веществ, образующихся во вспомогательных технологических процессах и очистки сточных вод на общепроизводственных очистных сооружениях. Используются методы математического моделирования ветровых течений и переноса загрязняющих веществ.

Достоверность научных результатов диссертационной работы подтверждается данными производственного экологического контроля НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус».

Положения выносимые на защиту:

- Алгоритм оптимизации нагрузки от интегрированных ЦБК на основе ESG – подхода, учитывающий технологию производства, локальные и общезаводские очистные сооружения, экологические стандарты качества водных объектов
- Коэффициенты оценки уровня применяемых технологий ЦБК по сравнению с НДТ и балансовые модели расчета технологических показателей сброса для объектов технологического нормирования.
- Комбинированная математическая модель переноса загрязняющих веществ в реке Вуокса в зоне влияния НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус»
- Результаты расчета допустимых сбросов НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус» по разработанной методике эколого-технологического нормирования.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Всероссийский Шестой молодежный конгресс «Северная пальмира» (СПб, 2014); Международного форума «PAR-FOR 2014» (СПб, 2014), Научно-практическая конференция «Дни науки в СПбГТУРП - 2015» (СПб, 2015); Конференция «Международное и межрегиональное сотрудничество по защите водных ресурсов» (СПб НЦ РАН) в рамках XXI Международного и межрегионального молодежного Биос-форума (СПб, 2016); Международная конференция «Энергетика, экология, бизнес» (СПб, 2017) Международный экологический Форум «День Балтийского моря» (СПб, 2019), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Красноярск, 2019) Международная научная конференция «Инновационные исследования в области био-окружающей среды» (СПб, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 2 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи, входящие в базу Scopus, получено 1 авторское свидетельство на программу для ЭВМ.

Личный вклад автора заключается в разработке алгоритмов и подходов к эколого-технологическому нормированию, разработке комбинированной математической модели переноса загрязняющих веществ в р. Вуокса в зоне влияния НПАО «Сильвамо Корпарейшен Рус», обработке полученных результатов, формулировке выводов. Предложенные алгоритмы математического моделирования реализованы в программе для ЭВМ НДС-река, на которое получено авторское свидетельство.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка цитируемой литературы (114 источников) и приложения. Основное содержание включает 113 страниц машинописного текста, содержащего 26 рисунков и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, продемонстрирована научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** (аналитический обзор) описаны существующие подходы к нормированию антропогенной нагрузки на водные объекты. Определены недостатки существующей системы нормирования нагрузки на водные объекты, приведен обзор математических моделей расчета ветровых течений и конвективно-диффузионного переноса загрязняющих веществ.

Во **второй главе** (методическая часть) предложен алгоритм квотирования нагрузки на водный объект. В основу алгоритма квотирования ложатся современные принципы ESG (E – environmental, S – social, G – governance), которые строятся на бережном отношении к окружающей среде, высокой социальной ответственности и высоком уровне управления предприятием.

В **первой части** разработан коэффициент эффективности управления предприятием, являющийся функцией следующих критериев:

1. Учет соответствия технологии предприятия требованиям НДТ (коэффициент $K_{\text{тех}}$).

2. Учет социальной значимости предприятия (коэффициент $K_{соц}$).
3. Экологическое состояние водного объекта (коэффициент $K_э$).

Соответственно коэффициент ESG для предприятия рассчитывается по формуле:

$$K_{ESG} = K_{тех} \cdot K_э \cdot K_{соц} \quad (1)$$

Предприятия с максимальным коэффициентом ESG имеют приоритет при распределении квот нагрузки.

Коэффициент социальной значимости ($K_{соц}$) определяется исходя из социальной и экономической значимости того или иного предприятия. В диссертации предложены следующие градации $K_{соц}$: градообразующие предприятия – 1,2; прочие предприятия - 1.

Коэффициент экологической обстановки, утверждается отдельно для каждого региона постановлением Правительства РФ.

$K_{тех}$ зависит от величины технологических показателей образования загрязняющих веществ на единицу выпускаемой продукции и удельных норм водопотребления на единицу выпускаемой продукции и рассчитывается по формуле:

$$K_{тех} = K_{тех1} \cdot K_{тех2} \cdot K_{тех3} \quad (2)$$

где $K_{тех1}$ - уровень соответствия НДТ по удельным нормам образования загрязняющих веществ на единицу продукции; $K_{тех2}$ - уровень соответствия НДТ по удельным нормам водопотребления на единицу выпускаемой продукции; $K_{тех3}$ - выполнение технологических требований.

Сложность расчета технологических показателей (ТП) сброса связана с тем, что большинство интегрированных ЦБК, производящих широкий ассортимент продукции, не осуществляют производственный экологический контроль маркерных загрязняющих веществ по отдельным стадиям производства и видам продукции.

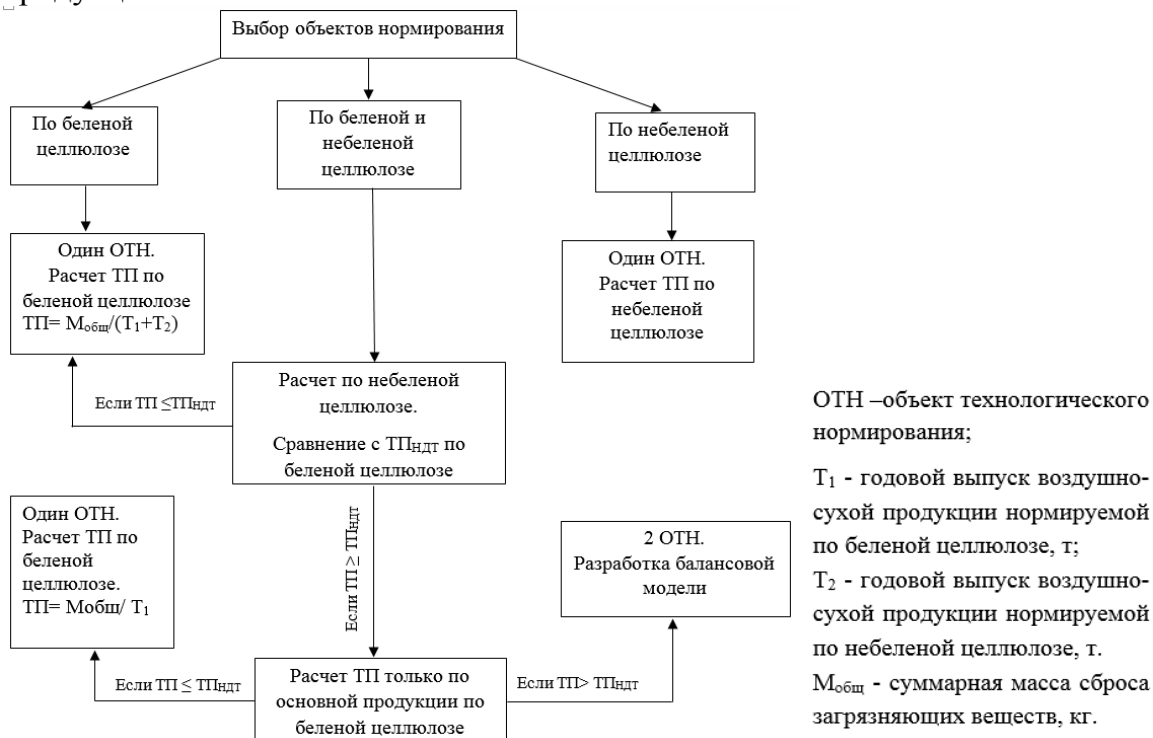


Рис.1 Алгоритм определения технологических показателей

Сейчас любая продукция ЦБК должна нормироваться либо по беленой, либо по небеленой целлюлозе. Поэтому одним из предложенных решений является нормирование всей продукции интегрированного ЦБК только по беленой или только по небеленой целлюлозе. Разработанная упрощенная схема расчета технологических нормативов только по беленой или только по небеленой целлюлозе приведена на рис. 1.

Исходя из принципа наилучших условий для комбината целесообразно провести сравнение фактических технологических показателей с технологическими показателями НДТ (ТП_{НДТ}) для небеленой целлюлозы. Если фактические технологические показатели меньше ТП_{НДТ}, то можно остановиться на этом варианте расчета. Если производство продукции, нормируемой по беленой целлюлозе, значительно превышает производство продукции, нормируемой по небеленой целлюлозе, то можно отнести всю массу загрязняющих веществ к продукции, нормируемой по беленой целлюлозе.

Если всю продукцию нельзя нормировать по беленой целлюлозе, то комбинату нужно либо выбрать один из ранее озвученных вариантов с разработкой программы повышения экологической эффективности или производить расчеты технологических показателей для нескольких объектов технологического нормирования.

Для расчета технологических показателей по каждому виду продукции предложен алгоритм, состоящий из 4 этапов:

Этап 1- Построение балансовой схемы расчета технологических показателей. Балансовая схема может содержать: первичные небеленые и беленые волокнистые полуфабрикаты, продукцию полного цикла, а также типовые технологические процессы, приводящие к загрязнению сточных вод маркерными веществами.

Этап 2- Расчет технологических показателей для первичных волокнистых небеленых полуфабрикатов (ПВПФн/б) и первичных волокнистых беленых полуфабрикатов (ПВПФб).

Расчет технологических показателей для волокнистых полуфабрикатов производится по формуле:

$$ТП_X^i = \frac{\sum_{j=1}^J N_i^j}{M_X} \quad (3)$$

где ТП_{Х_і} – технологический показатель образования і-го загрязняющего вещества при производстве продукции Х, кг/т;

N_i^j - масса поступления в сточные воды і-го загрязняющего вещества при выполнении технологической операции j, кг;

J – количество технологических операций для производства продукции Х;

M_X – масса произведенной продукции Х, т.

Если все ПВПФб являются товарным продуктом, то вся масса загрязняющих веществ относится к этой продукции. Если часть ПВПФб является сырьем для производства продукции полного цикла, то выделяются доли загрязняющих веществ, относящиеся к ПВПФн/б и продукции полного цикла.

Этап 3- Расчет технологических показателей для продукции полного цикла.

На данном этапе производится расчет технологических показателей сброса для каждого вида продукции с учетом композиции продукции.

Этап 4- Расчет значений технологических показателей для каждого вида продукции, с учетом очистки сточных вод на общезаводских очистных сооружениях. На данном этапе производится пересчет технологических показателей сброса сточных вод с учетом эффективности работы локальных и общезаводских очистных сооружений.

Во второй части описан разработанный алгоритм квотирования антропогенной нагрузки на водный объект.

Для реализации квотирования нагрузки на водный объект предложен следующий алгоритм:

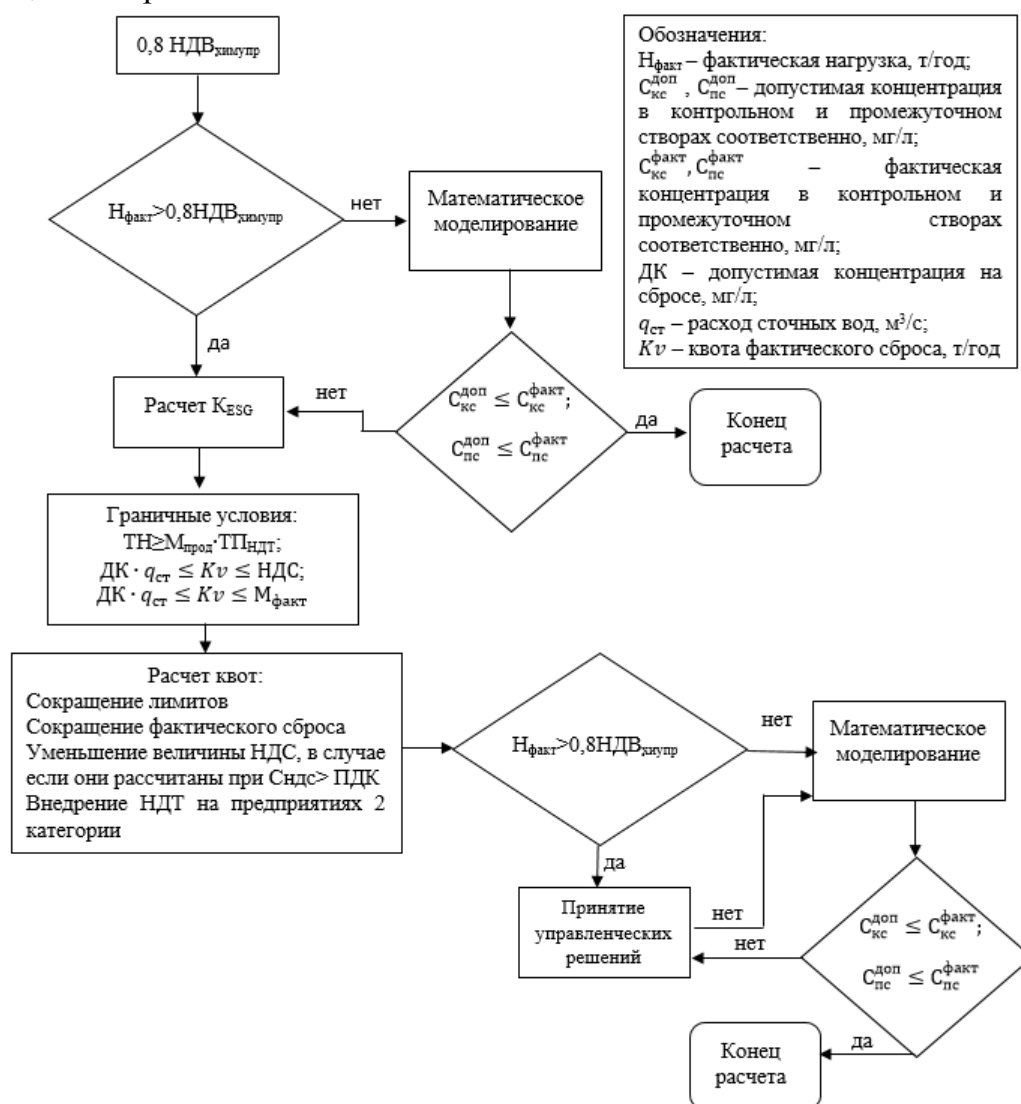


Рис. 2. Алгоритм квотирования нагрузки на водный объект

Суммарная допустимая антропогенная нагрузка по химическим показателям на водохозяйственном участке (ВХУ) не может превышать 80% от величины $НДВ_{химупр}$:

$$\sum НДС_i + \sum ВРС + \sum ТН + \sum C_{фактIII} \leq 0.8 \cdot НДВ_{химупр} \quad (4)$$

$\sum НДС_{i-1}$ – установленные НДС водопользователей, т/год, $\sum ВРС$ – установленные временно разрешенные сбросы, т/год, $\sum ТН$ – установленные

технологические нормативы, кг/т в год, $\sum C_{\text{фактIII}}$ - фактические массы сброса предприятий III категории НВОС, т/год; 0,8 - коэффициент, показывающий, что для целей перспективного развития региона, на настоящий момент времени может быть использовано, не более 80% от допустимой нагрузки; $\text{НДВ}_{\text{химупр}}$ - норматив допустимого воздействия химически управляемый, т/год.

Этапы квотирования нагрузки

Определяем суммарную нагрузку на водохозяйственный участок по формуле 4. В случае если суммарная фактическая нагрузка меньше 80 % от $\text{НДВ}_{\text{химупр}}$, то разрабатываем математическую модель конвективно-диффузионного переноса загрязняющих веществ на водохозяйственном участке и рассчитываем результирующее поле концентраций. Согласно разработанных критериев нагрузка на водный объект считается допустимой, если в контрольном створе не превышены допустимые концентрации ($\text{ДК}_{\text{КС}}$), а в промежуточных створах не превышены допустимые концентрации промежуточных створов ($\text{ДК}_{\text{ПС}}$). Если данное условие выполняется, то в качестве квот допустимой нагрузки принимаются фактически утверждённые НДС для предприятий 1 и 2 категорий негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) и фактические сбросы для предприятий третьей категории НВОС. Улучшение качества воды на ВХУ в перспективе будет обеспечено за счет выполнения водоохраных мероприятий, направленных на снижение временно разрешенных сбросов.

Если фактический сброс от всех предприятий превышает $\text{НДВ}_{\text{химупр}}$, то нужно сократить нагрузку на водный объект. Наиболее технологичные и социально значимые производства, должны получить приоритет на сброс загрязняющих веществ. В первую очередь целесообразно сократить временно согласованные сбросы.

При квотировании задаем следующие граничные условия:

1. Квота на сброс не может превышать величину нормативов допустимых сбросов (НДС) по веществам 1 и 2 классов опасности для предприятий 1 и 3 категорий НВОС, и по всем веществам для предприятий 2 категории НВОС; величину фактических сбросов для предприятий 3 категории НВОС, величину технологических нормативов для предприятий 1 категории НВОС.

2. Сброс сточных вод с концентрацией, не превышающей ПДК не может нанести ущерб водным биоресурсам, поэтому минимальная допустимая масса сброса рассчитывается как произведение расхода сточных вод на ПДК водного объекта.

На основе решения оптимизационной задачи определяются ориентировочные значения квот сброса, сумма которых не должна превышать 80% от $\text{НДВ}_{\text{химупр}}$, затем аналогично 2 этапу производится проверка на основе математического моделирования в контрольном и промежуточных створах. В случае, если допустимые значения концентраций в промежуточных контрольных створах превышены, а фактическую нагрузку сократить невозможно, то необходимо выработать индивидуальные управленческие решения, к которым могут относиться: сокращение объемов временно согласованных сбросов; внедрение НДТ на предприятиях 2 категории; внедрения дополнительных НДТ и перспективных технологий.

В третьей главе (экспериментальная часть) разработанная методика эколого-технологического квотирования нагрузки апробирована на примере

водохозяйственного участка р. Вуокса 01.04.03.002 от границы с Финляндией до города Каменногорска Выборгского района Ленинградской области. На данном ВХУ находятся 4 предприятия, сбрасывающие сточные воды через 8 водовыпусков, из них максимальную нагрузку на р. Вуокса оказывает НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус».

НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус» - один из крупнейших ЦБК Северо-Запада РФ, очищающий не только собственные стоки, но и принимающий сточные воды от г. Светогорска и ООО «Эссити», выпускающего санитарно-гигиенические виды бумаги.

НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус» является градообразующим предприятием для г. Светогорска Ленинградской области с населением около 16 тысяч человек. Непосредственно на предприятии трудится около 1600 человек, кроме того еще около 1500 человек работают в подрядных организациях, обеспечивающих деятельность предприятия. Таким образом, город Светогорск является моногородом, экономическая деятельность в котором тесно связана с единственным градообразующим предприятием. Это является одним из компонентов ESG-оценки предприятия.

Произведенный анализ технологических процессов комбината позволил выделить 3 основных производственных процесса, обеспечивающих выпуск товарной продукции: производство бумаги, картона и производство белой химико-термомеханической массы (БХТММ), а также производство волокнистых полуфабрикатов, используемых на самом ЦБК: хвойной небелёной и белой целлюлозы; лиственной белой целлюлозы. Таловое масло и скипидар являются побочными видами продукции, получаемыми в основном производстве, поэтому в расчете технологических показателей их не учитываем.

На основе разработанной балансовой модели, на первом этапе из массы сбросов загрязняющих веществ комбината были исключены массы сброса загрязняющих веществ от г. Светогорска и ООО «Эссити». На втором этапе расчет технологических нормативов был произведен в соответствии с разработанным упрощенным алгоритмом, и все производство было принято одним объектом технологического нормирования. Результаты расчетов фактических технологических показателей приведены в табл. 1.

Таблица 1-Результаты расчета фактических технологических показателей сброса

| Показатель | Технологический показатель, кг/т | ТП _{НДТ} белая целлюлоза, кг/т | ТП НДТ небелая целлюлоза, кг/т |
|---------------------|----------------------------------|---|--------------------------------|
| ХПК | 12,22 | 8-30 | 5-12 |
| БПК _п | 0,37 | 0,8-1,2 | 0,3-0,7 |
| Взвешенные вещества | 0,31 | 0,6-1,9 | 0,9-1,2 |

Результаты расчета показали небольшое превышение фактического технологического показателя образования ХПК по сравнению с технологическим показателем, отвечающим наилучшим доступным технологиям при нормировании по небеленой целлюлозе. Так как в общем объеме производства продукции, производство бумаги составляет около 60%, то целесообразным является разработка балансовой модели расчета технологических показателей по каждому виду продукции.

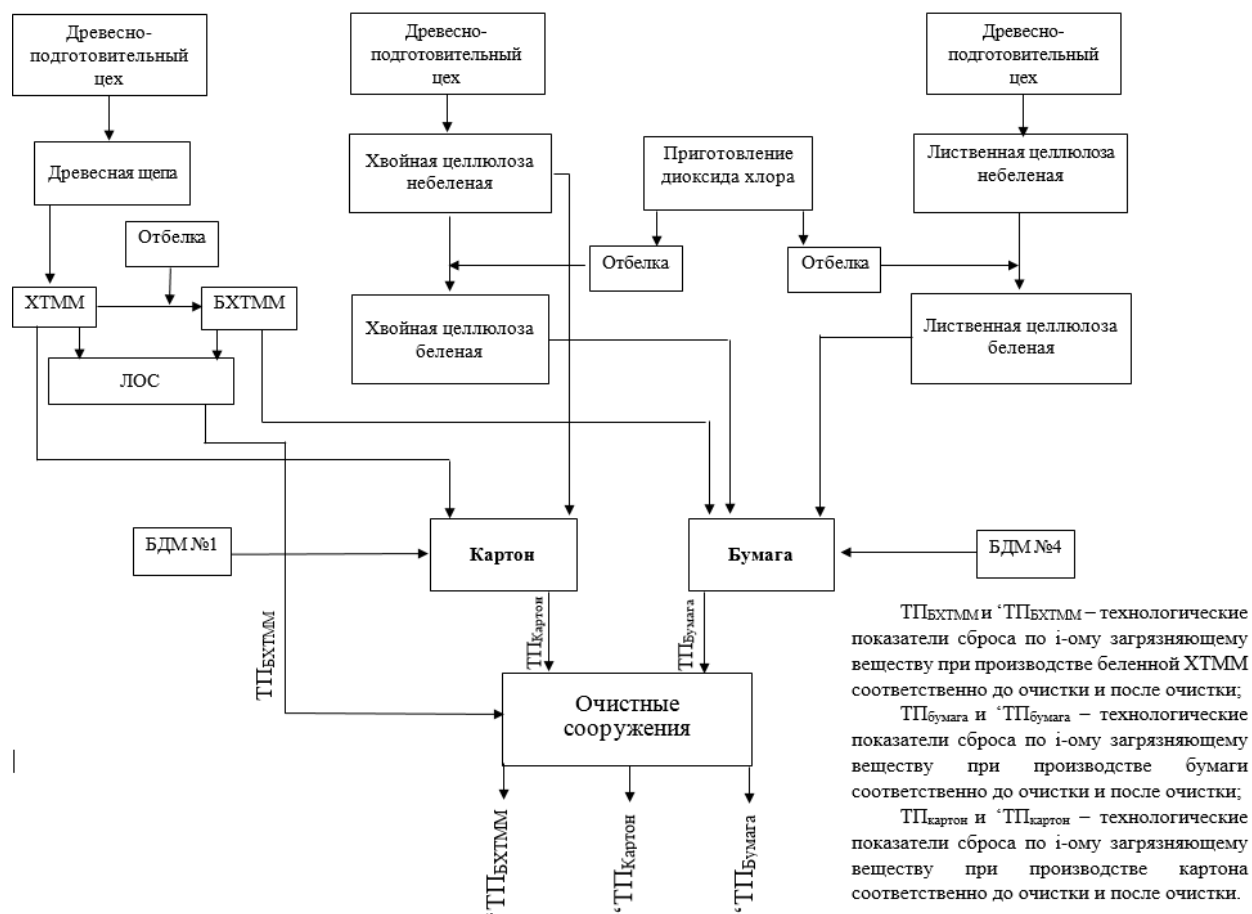


Рис.3 Балансовая модель расчета технологических показателей сброса маркерных загрязняющих веществ для отдельных видов продукции НΠΑО «Сильвамо Корпорейшн Рус»

Для расчета технологических показателей отдельно по бумаге, картону и БХТММ была построена балансовая модель, см. рис. 3. Бумага и картон на комбинате производятся из первичных полуфабрикатов: беленой лиственной целлюлозы, хвойной небеленой целлюлозы, хвойной беленой целлюлозы и БХТММ. Стандартная композиция бумаги включает следующие волокнистые полуфабрикаты: хвойную беленую целлюлозу (32%), лиственную беленую целлюлозу (48%) и БХТММ (20%)*. Стандартная композиция картона включает: хвойную небеленую целлюлозу (60%), хвойную беленую целлюлозу (10%), лиственную беленую целлюлозу (19%) и БХТММ (11%).
* При переходе от режима «в условиях глобализации к условиям локализации» композиция была изменена.

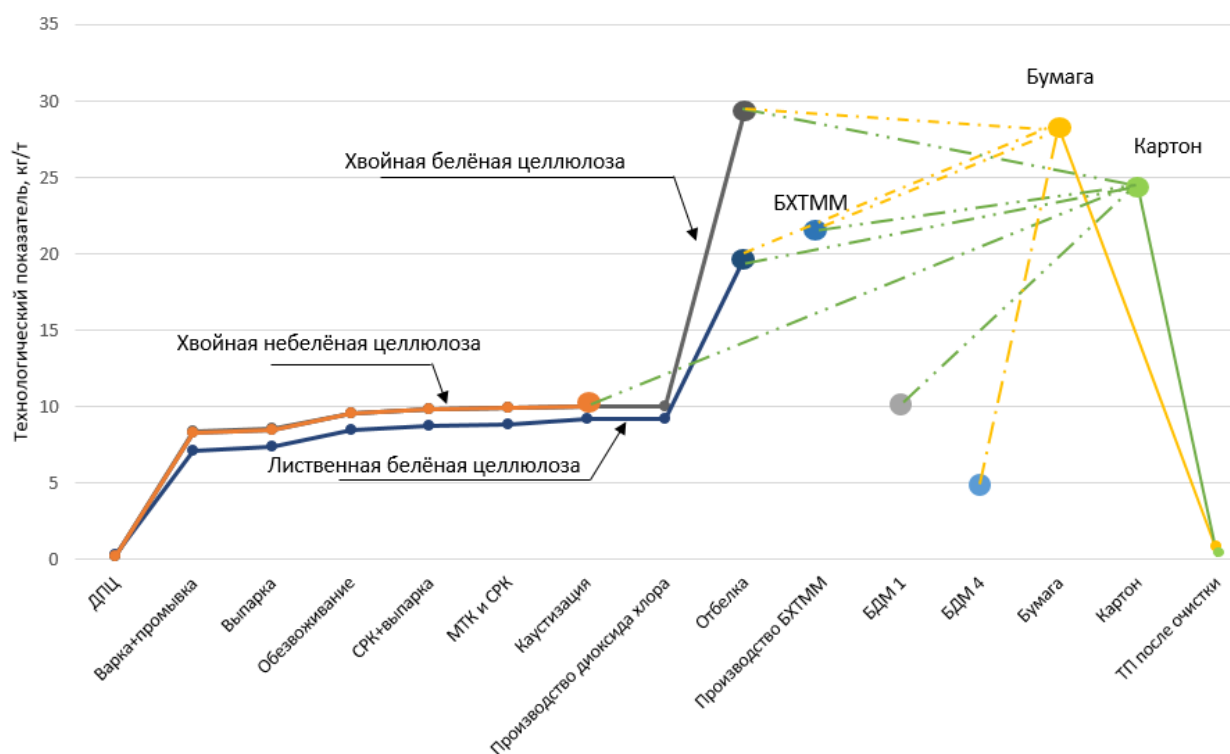


Рис. 4 Накопительный график вклада технологических процессов в технологический показатель сброса БПК_п производства бумаги и картона

Результаты расчета технологических показателей по каждому виду продукции, с учетом композиции бумаги и картона приведены в таблице 2

Таблица 2 - Фактические технологические показатели по видам продукции

| Продукт | Показатели ТП _{факт} , кг/т | | | ТП _{НДТ} кг/т | | | Нормирование по |
|---------|--------------------------------------|------------------|---------------------|------------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| | ХПК | БПК _п | Взвешенные вещества | ХПК | БПК _п | Взвешенные вещества | |
| Бумага | 12,94 | 0,51 | 0,35 | 8-30 | 0,8-1,2 | 0,6-1,9 | беленой целлюлозе |
| Картон | 11,60 | 0,24 | 0,43 | 5-12 | 0,3-0,7 | 0,9-1,2 | небеленой целлюлозе |
| ХТММ | 9,73 | 0,12 | 0,10 | 5-12 | 0,3-0,7 | 0,9-1,2 | беленой целлюлозе |

Результаты расчета показали, что фактические технологические показатели не превышают технологические показатели НДТ.

Для водохозяйственного участка в соответствии с предложенным в диссертации алгоритмом бассейнового квотирования была разработана комбинированная модель конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ, соответствующая индивидуальным морфометрическим и гидродинамическим характеристикам участка реки Вуокса.

Для мелководной, правобережной части Лесогорского водохранилища, в которой образуются застойные зоны, была построена модель ветровых течений, решенная на основе уравнений (4) методом сеток, при котором водный объект разбивался на сегменты квадратной формы.

$$\begin{aligned}
-fv &= g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_l \cdot \Delta u + A_z \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}; \\
-fu &= g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_l \cdot \Delta v + A_z \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}; \\
\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0
\end{aligned} \tag{4}$$

Где u, v, w – проекции скорости течений на ось X , направленную на восток, ось Y , направленную на север и ось Z , направленную вертикально вниз; ζ – возмущение свободной поверхности, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; f – параметр Кориолиса; A_l и A_z – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости, м²/с

Исходными данными для математического моделирования послужили: гидрологическая, морфометрическая и гидрохимическая характеристики участка р.Вуокса, климатическая характеристика района, характеристики водовыпусков и параметры сточных вод.

Расчет переноса загрязняющих веществ проводился по модели конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ. Для правобережной части Лесогорского водохранилища была обоснована математическая модель вида:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - K \cdot C; \tag{5}$$

Для левобережной части Лесогорского водохранилища и далее по течению была обоснована математическая модель вида:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - K \cdot C \tag{6}$$

Квотирование нагрузки на водные объекты было проведено по разработанной формуле:

$$Kv_i = 0,8 \cdot \text{НДВ}_{\text{химупри}} \cdot \frac{M_i \cdot K_{ESGj}}{\sum M_i \cdot K_{ESGj}} \tag{7}$$

где K_{ESGj} – коэффициент эффективности управления j -ым предприятием; $\text{НДВ}_{\text{химупри}}$ – установленное НДВ для бассейна на сброс i -го вещества; M_i – фактическая масса сброса j предприятием; $M_{\text{общ}}$ – общая масса сброса вещества всеми предприятиями бассейна.

Суммарная нагрузка на ВХУ по БПК_п составляет 338 т/год, а $0,8\text{НДВ}_{\text{химупр}}$ составляет 304 т/год. Коэффициент ESG для НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус» составил 4,42, при расчете квот полученная величина оказалась ниже технологических нормативов, следовательно, исходя из граничных условий, за квоту принята величина технологического норматива. Перераспределение нагрузки на водный объект представлено на рисунке 5.

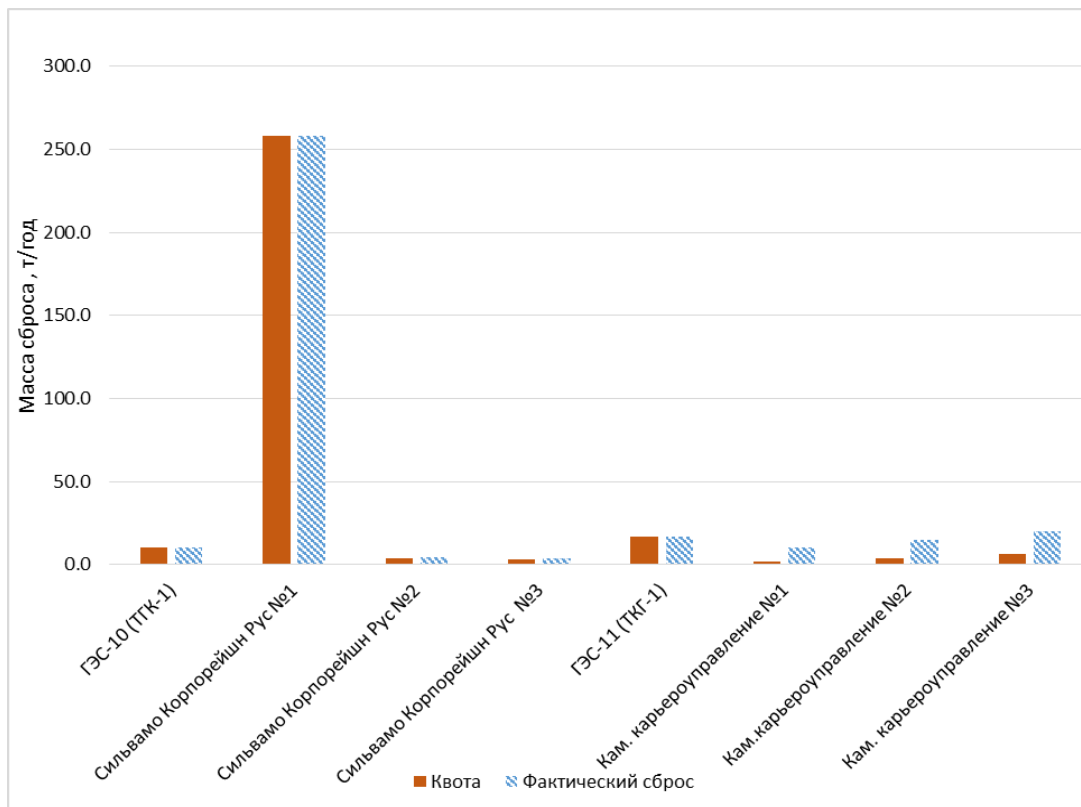


Рис. 5 Перераспределение нагрузки на водный объект

Моделирование переноса загрязняющих веществ на основе рассчитанных квот было проведено по маркерным для комбината веществам: БПК_п, ХПК, взвешенным веществам. Распределение концентраций БПК_п в контрольных и промежуточных створах приведено на рис. 5.

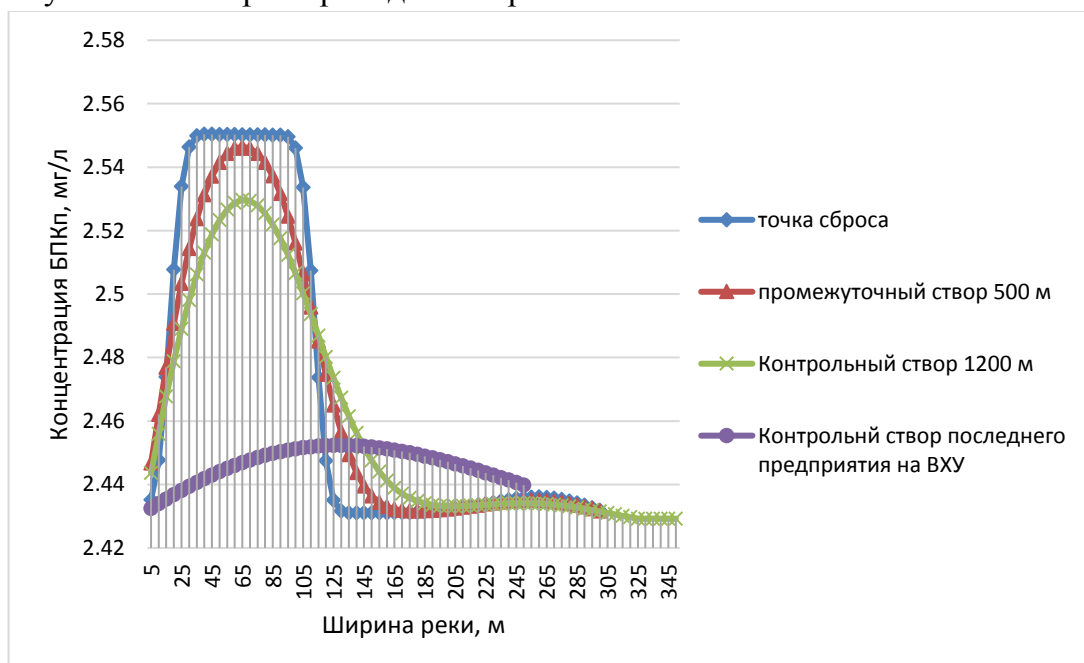


Рис. 5 Поперечные эпюры БПК_п по створам контроля

Результаты математического моделирования переноса БПК_п и ХПК были верифицированы по данным производственного экологического контроля в контрольном створе 1200 метров ниже водовыпуска номер 1. Коэффициенты корреляции между результатами математического моделирования и фактическими

значениями концентраций были рассчитаны за период 2017-2021 года. По БПК_п средний коэффициент корреляции составил 0.72, а по ХПК 0.75, что является сильной корреляцией. В целом ошибка математического моделирования находится в пределах погрешности методик определения ХПК и БПК_п.

ВЫВОДЫ

В диссертации предложен алгоритм эколого-технологического нормирования нагрузки от интегрированных ЦБК на водные объекты, учитывающий негативные воздействия других водопользователей бассейна. Разработаны алгоритмы расчета технологических нормативов сбросов для нескольких объектов технологического нормирования при сбросе сточных вод через общезаводские очистные сооружения; граничные условия нормирования нагрузки от водопользователей в зависимости от категории негативного воздействия на окружающую среду; коэффициенты социальной значимости производства и его технологического совершенства, методы математического моделирования переноса загрязняющих веществ, учитывающие индивидуальные морфометрические и гидрологические особенности водных объектов.

В диссертационной работе были решены следующие задачи:

1. Разработан и апробирован на примере НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус» алгоритм оптимизации нагрузки от ЦБК на основе ESG – подхода, учитывающий технологию производства, локальные и общезаводские очистные сооружения, экологические стандарты качества водных объектов.

2. Разработаны коэффициенты оценки уровня применяемых технологий ЦБК и балансовые модели расчета технологических показателей сброса для объектов технологического нормирования.

3. Разработана комбинированная математическая модель переноса загрязняющих веществ в реке Вуокса в зоне влияния НПАО «Сильвамо Корпорейшн Рус».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Елифанова, М.А.** Алгоритм расчета технологических показателей для нескольких объектов технологического нормирования / М.А. Елифанова, А.В. Елифанов, Э.Л. Аким // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - 2021. - вып. 237. - с. 258–271.

2. **Елифанова, М.А.** Расчет величины негативного воздействия на водный объект от предприятий целлюлозно-бумажной промышленности на основе математического моделирования переноса загрязняющих веществ/М.А. Елифанова, А.В. Елифанов, Э.Л. Аким // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - 2022. - вып. 238. с. 254–266.

Статьи, опубликованные в журналах, входящие в базу данных SCOPUS:

3. Epifanova, M. Functional Model That Evaluates the Impact of Hydrotechnical Works and Facilities on a Water Object/ M. Epifanova, A. Shishkin, A.Chusov, , D.Silka // Advances in intelligent system and computing. – 2017. - vol. 692. – pp. 921-935.

4. Епифанова, М.А. Алгоритм управления перераспределением техногенной нагрузки для территориальных природно-технических комплексов на основе геоинформационных систем / М. А. Епифанова, Н. А. Жильникова, А. И. Шишкин, А. В. Епифанов // Информационно-управляющие системы. - 2017. - №1 (86). - с.93-101.

5. Epifanova, M. A., Modern technologies of the load rationing on large water systems/ М.А. Epifanova, А.В. Epifanov, М.С. Stroganova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. - vol.537(6). – pp. 25-29.

Труды в прочих изданиях

6. Епифанова, М.А. Расчет полей мутности при берегоукреплении острова Тузла при строительстве транспортного перехода через Керченский пролив / М.А. Епифанова, А.И. Шишкин //Сборник материалов XX Международного и межрегионального Биос-форума – СПб.: СПбНЦ РАН, ВВМ; СПб.: Любавич. – 2015. - с.112-115

7. Epifanova, M. A. Methodical Bases of an Assessment of Impact of Dredging Works on the Water Area / М. А. Epifanova, А. I. Shishkin, А. V. Epifanov // 8th Eastern European Young Water Professionals Conference Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław. – 2016. – pp. 61-62.

8. Епифанова, М.А. Программное обеспечение нормирования нагрузки в сложных водохозяйственных системах / М.А. Епифанова, Н.А. Жильникова, А.И. Шишкин, А.В. Епифанов// Вопросы радиоэлектроники. -2017; - вып.10. - с. 48-51.

9. Шишкин, А.И. Алгоритм квотирования нагрузки на водный объект для ОАО «Группа ИЛИМ» в г. Коряжма/ А.И. Шишкин, А.В. Епифанов, М.А. Епифанова //Инновации в науке: научный журнал. - 2017.– № 7(68). – С. 52-55.

10. Епифанова, М.А. Алгоритм управления водоохранной деятельностью АО «Сегежский ЦБК» на основе математического моделирования/ М.А. Епифанова, А.В. Епифанов // Вопросы радиоэлектроники. - 2019. – вып.1(7). - с.106-109.

11. Епифанова, М.А. Оценка динамики переноса взвешенных веществ и образования наносов при берегоукреплении Синопской набережной/ М.А. Епифанова, А.В. Епифанов, Г.Я. Фролов// Сборник материалов XX Международного экологического Форума «День Балтийского моря». – 2019. – с. 221-223.

12. Епифанов, А.В. Обоснование расчетов кратности основного разбавления на основе математического моделирования / М.А. Епифанова, А.В. Епифанов //Менделеев: эл.научный журнал – 2021 - №1(13) – с.8-10.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016662535 «НДС – река». Дата регистрации в Госреестре 15 ноября 2016 г.